



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

**“Diseño de obra civil como aplicación de la
Gestión de Recarga de Acuíferos en la
comunidad El Laurel, Guanajuato”.**

TESIS

Que para optar por el grado de:

Maestría en Ciencias del Agua

PRESENTA:

José Arturo Espinoza Bonilla

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. María Jesús Puy y Alquiza

GUANAJUATO, GTO., ENERO DEL 2022

AGRADECIMIENTOS

A mis padres

Por su amor infinito y su apoyo incondicional en todos los proyectos que he emprendido en mi vida. Gracias por su ejemplo y sus consejos, y, sobre todo, gracias por creer y confiar en mí. Los amo.

A mi hermano

Por tu compañía, tu apoyo, y esas charlas inagotables. Siempre serás un ejemplo para mí. Que nunca te rindas en tu lucha para hacer de este mundo un lugar más justo y feliz. Eres y siempre serás mi más grande amigo.

A Maytee

Por el cariño y amor compartido durante tantos años. Gracias por las risas, abrazos y buenos momentos. Espero que la vida me permita seguir disfrutando a tu lado.

A mis abuelos Gonzalo y María

Gracias por los gratos recuerdos que han dejado en mi corazón. Espero que ya estén caminando juntos abuelos. Gracias por cuidarme y guiarme desde las alturas. Los amo y extraño mucho.

A mis abuelos Rodolfo y Lucha

Gracias por su inmenso amor y por ser los pilares de la familia. Son un ejemplo para cada uno de nosotros. Agradezco a Dios cada día por darme la oportunidad de continuar escuchando su voz. Los amo.

A mi tía Luz

Por tu bondad y cariño. Siempre admiraré en ti el amor tan puro e imparcial para cada uno de los miembros de nuestra familia, la cual, has sostenido a base ternura, paciencia y perdón. Gracias por escucharme y ayudarme cuando más lo necesitaba, me diste calma y esperanza.

A mis primos

Pau, Reny, Regy, Boo, Sam, Lore, Santy, Ricky y Mañomeño, gracias por ser parte de mi familia, soy muy afortunado de compartir mi vida con ustedes. Espero verlos pronto.

A mis tíos

Ninos, Ales, Fidos y Manyos. Gracias por su ejemplo, paciencia y cariño. Les mando un enorme abrazo a todos.

A Luz María Corona

Por sus valiosos consejos en Química, los cuales permitieron enriquecer este trabajo de investigación. Te mando un fuerte abrazo.

A mis colegas

Jesús René Báez Espinosa, Cristina Daniela Moncada Sánchez y César Leonardo Ruíz Jaime, por su gran apoyo durante las distintas etapas de trabajo de laboratorio.

A la Dra. María Jesús Puy y Alquiza

Por su ayuda y confianza. Estaré siempre agradecido por la oportunidad que me brindó para concretar esta importante etapa de mi vida profesional. Un abrazo.

A mis tutores y revisores

Dr. Raúl Miranda Avilés, Dr. Gonzalo Enrique Espinoza Dávalos y Dra. Yanmei Li por su paciencia, tiempo y, sobre todo, sus valiosas contribuciones para enriquecer este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	26
1.1 La importancia del agua subterránea.....	26
1.2 Gestión de Recarga de Acuíferos	28
1.3 Problemática	31
1.4 Justificación del proyecto	32
1.5 Hipótesis	33
1.6 Objetivo general.....	33
1.7 Objetivos particulares	33
CAPÍTULO II. MARCO HISTÓRICO	36
2.1 Caracterización del área de estudio.....	36
2.1.1 Localización y situación geográfica	36
2.1.2 Hidrología superficial	37
2.1.3 Encuadre geológico y estratigráfico.....	40
2.1.4 Geología del subsuelo	43
2.2 Programa Nacional de Reservas de Agua.....	47
2.3 Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.....	48
2.4 Casos de éxito en el manejo de recarga de acuíferos	50
2.4.1 Manejo de recarga de acuíferos en los Ojos del Chuvíscar, Chihuahua, México.....	51
2.4.2 Evaluación de obras de recarga hídrica construidas por comunidades autóctonas en la subcuenca del Valle de Ocotlán, Oaxaca, México.....	53
2.4.3 Propuestas de obras de recarga hídrica para zonas cercanas a la comunidad El Laurel	56
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....	58

3.1 El agua en el planeta Tierra	58
3.2 El ciclo hidrológico	59
3.2.1 Componentes del ciclo hidrológico	60
3.3 Interacción entre las aguas superficiales y subterráneas con la corteza terrestre.....	64
3.3.1 Cuenca hidrográfica e hidrológica	64
3.3.2 Características físicas de una cuenca y sus procesos de escorrentía.....	67
3.3.3 El agua en el suelo	74
3.3.4 Agua subterránea	78
3.5 Determinación del potencial de recarga hídrica en una cuenca	82
3.5.1 Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales	83
3.5.2 Identificación de áreas potenciales de recarga hídrica mediante una Evaluación Espacial Multicriterio	85
3.6 Balance hídrico de una cuenca.....	97
3.7 Balance Hídrico de Suelos.....	99
3.8 Gestión de Recarga de Acuíferos	100
3.8.1 Técnicas para la gestión de recarga de acuíferos	100
3.8.2 Colmatación y calidad del agua de recarga	105
3.9 Normatividad.....	106
CAPÍTULO IV. MARCO DE REFERENCIA.....	108
CAPÍTULO V. METODOLOGÍA	111
CAPÍTULO VI. MÉTODO EMPLEADO	112
ETAPA 1: Delimitación del área de estudio y evaluación espacial multicriterio para identificar zonas de recarga hídrica natural.....	113
ETAPA 2: Estimación de la recarga potencial al acuífero.....	118

ETAPA 3: Análisis de la calidad del agua de recarga.....	120
ETAPA 4: Diseño de propuesta de obra de recarga.....	121
CAPÍTULO VII. RESULTADOS.....	124
7.1 Descripción del área de estudio e identificación de zonas potenciales de recarga hídrica natural.....	124
7.2 Recarga potencial al acuífero	141
7.3 Calidad del agua de recarga.....	152
7.4 Propuesta de obras de recarga	157
CONCLUSIÓN	216
REFERENCIAS.....	220
ANEXOS	237

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Johad en Rajasthan, India. Recuperado de The Water Network (2020).....	30
Figura 2. Cronograma general del proyecto de investigación. Elaboración propia (2020).....	35
Figura 3. Mapa de localización del área de estudio. Elaboración propia (2020).....	36
Figura 4. Mapa de subcuencas en el estado de Guanajuato. Elaboración propia (2020).....	38
Figura 5. Mapa de cuencas en el estado de Guanajuato. Elaboración propia (2020).....	39
Figura 6. Mapa de regiones hidrológicas en el estado de Guanajuato. Elaboración propia (2020).....	40
Figura 8. Columna litoestratigráfica del Distrito Minero de Guanajuato según el Depto. de Geología de las Torres, con modificaciones de Orozco (2014). Recuperado de Orozco (2014).	42
Figura 9. Acuíferos en el estado de Guanajuato. Elaboración propia (2020).....	43
Figura 10. Perfiles geológicos del área de estudio. Elaboración propia (2021).....	45
Figura 11. Sistema de recarga de acuíferos en el río Chuvíscar, Chihuahua. Recuperado de Escolero, Gutiérrez, y Mendoza (2017).....	53
Figura 12. Obras de recarga hídrica construidas por comunidades autóctonas en la subcuenca del Valle de Ocotlán, Oaxaca, México. Recuperado de Escolero, Gutiérrez, y Mendoza (2017). De izquierda a derecha: pozos circulares de adsorción, pozos de tabiques, pequeñas presas y ollas captadoras de lluvia.	54

Figura 13. Pequeñas represas construidas con neumáticos para disminuir la velocidad de escorrentía y mitigar la erosión hídrica en la microcuenca “El Laurel”. Autoría propia (2021).....	57
Figura 14. Representación del ciclo hidrológico. Recuperado de Ordoñez (2011).....	60
Figura 15. Proceso de evapotranspiración. Recuperado de la Agencia Estatal de Meteorología, Gobierno de España (2020).	62
Figura 16. Clasificación de la escorrentía. Recuperado de Sáez (2018).	64
Figura 17. Cuenca hidrográfica ideal. Recuperado de The watershed project (2020).....	65
Figura 18. Efecto de la forma de la cuenca en la escorrentía. Recuperado de MetEd (2011).	69
Figura 19. Patrones de drenaje. Recuperado de Argialas, Lyon, y Mintzer (1988).....	70
Figura 20. Distintos criterios de jerarquización de los cauces que componen la red de drenaje. Recuperado de Vich (1996).....	72
Figura 21. Clasificación de la densidad de drenaje (Dd). Recuperado de Vich (1996).....	73
Figura 22. Zonas de humedad en un suelo. Recuperado de Sánchez (2007).....	75
Figura 23. Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de las partículas. Recuperado de FAO (2020).....	76
Figura 24. Interacción entre el sistema de aguas subterráneas y las corrientes de agua superficiales. Recuperado de Tarbuck y Lutgens (2013).....	79
Figura 25. Clasificación para las formas de pendiente. Recuperado de FAO (2009).	87
Figura 26. Tanque de infiltración o percolación. Recuperado de Lundh (2020).....	102

Figura 27. Diferentes pozos como método MAR. De izquierda a derecha: ASR, ASTR y pozos secos. Recuperado de Lundh (2020).....	102
Figura 28. Presas de arena para almacenamiento. Recuperado de Lundh (2020).....	104
Figura 29. Filtración ribereña. Recuperado de Lundh (2020).....	104
Figura 30. Filtración inter-dunar. Recuperado de Lundh (2020).....	105
Figura 31. Mapa de zonas potenciales de recarga hídrica en El Laurel y El Terrero según el método Matus. Recuperado de Ramos (2018).	109
Figura 32. Método empleado para el proyecto de tesis. Elaboración propia (2021).....	112
Figura 33. Delimitación de la microcuenca “El Laurel”. Elaboración propia (2020).....	124
Figura 34. Mapa de clima. Elaboración propia (2020).....	125
Figura 35. Mapa de orden de drenaje. Elaboración propia (2020).	126
Figura 36. Mapa de pendientes del terreno. Elaboración propia (2020).	128
Figura 37. Mapa de aptitud por pendientes del terreno. Elaboración propia (2020).....	128
Figura 38. Mapa de edafología o tipo de suelo. Elaboración propia (2020).	130
Figura 39. Mapa de aptitud por tipo de suelo. Elaboración propia (2020).	130
Figura 40. Mapa de geología. Elaboración propia (2020).	132
Figura 41. Mapa de aptitud por tipo de roca. Elaboración propia (2020).	132
Figura 42. Mapa de uso de suelo y cobertura vegetal. Elaboración propia (2020).....	134

Figura 43. Mapa de aptitud por uso de suelo y cobertura vegetal. Elaboración propia (2020).....	134
Figura 44. Mapa de densidad de fracturas y lineamientos. Elaboración propia (2020).....	136
Figura 45. Mapa de aptitud por densidad de fracturas y lineamientos. Elaboración propia (2020).....	136
Figura 46. Mapa de número de infiltración. Elaboración propia (2020).	138
Figura 47. Mapa de aptitud por número de infiltración. Elaboración propia (2020).....	138
Figura 48. Mapa de potencial de recarga hídrica. Elaboración propia (2020).....	140
Figura 49. Estaciones climatológicas cercanas a la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).	141
Figura 50. Temperatura media anual en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).	146
Figura 51. Precipitación media anual en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).	146
Figura 52. Ubicación de los sitios de muestreo de suelo. Elaboración propia (2021).....	148
Figura 53. Ubicación del manantial de la comunidad El Laurel y los sitios de muestreo del agua de recarga. Elaboración propia (2021).	152
Figura 54. Afloramiento de pizarras sobre el cauce del río principal de la microcuenca “El Laurel”. Autoría propia (2021).....	157
Figura 55. Mapa de zonas con alto potencial de recarga hídrica natural. Elaboración propia (2020).....	170
Figura 56. Políticas ambientales implementadas en el área comprendida por la microcuenca “El Laurel” como parte del Modelo de Ordenamiento Sustentable del Territorio en el año 2019. Elaboración propia (2021). ..	171

Figura 57. Izquierda: laderas con pérdida de cobertura vegetal en las inmediaciones de la comunidad El Laurel. Derecha: paisaje recurrente en la microcuenca “El Laurel”, con exposición de roca y raíces a causa de la pérdida de suelo por la intensa erosión hídrica. Autoría propia (2021).	172
Figura 58. Sitios puntuales para la implementación óptima de estanques de tierra. Elaboración propia (2021).	179
Figura 59. Sitios puntuales para la implementación óptima de tinas ciegas. Elaboración propia (2021).	180
Figura 60. Sitios puntuales para la implementación óptima de terrazas individuales. Elaboración propia (2021).	181
Figura 61. Sitios puntuales para la implementación óptima de zanjas a nivel. Elaboración propia (2021).	182
Figura 62. Ubicaciones propuestas para la implementación de estanques de tierra en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).	183
Figura 63. Ejemplo de jagüey rectangular. Recuperado de Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017).	185
Figura 64. Parcelas propuestas para la implementación de tinas ciegas en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).	192
Figura 65. Dimensiones propuestas para las tinas ciegas de la parcela 1. Elaboración propia (2021).	196
Figura 66. Distribución en “tres bolillo” de tinas ciegas en una hectárea de la parcela 1 considerando las dimensiones propuestas. Elaboración propia (2021).	197
Figura 67. Parcelas propuestas para la implementación de terrazas individuales en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).	199
Figura 68. Sección transversal de una terraza individual. Recuperado de Cardoza et al. (2006).	201
Figura 69. Distribución de terrazas individuales con especies forestales en “tres bolillo”. Recuperado de Cardoza et al. (2006).	201

Figura 70. Terraza individual con taludes estabilizados. Recuperado de CONAFOR (2007).....	202
Figura 71. Parcelas propuestas para la implementación de zanjas a nivel en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).....	205
Figura 72. Zanja bordo con diques cada 4 metros y a la altura del suelo. Recuperado de Cardoza et al. (2006).....	208
Figura 73. Distribución de las zanjas bordo en una hectárea de la parcela 1 considerando las dimensiones propuestas. Elaboración propia (2021). Nota: la figura no está a escala.....	209
Figura 74. Ubicaciones propuestas para la implementación de tinajas ciegas y terrazas individuales en las zonas boscosas del centro y este de la microcuenca. Elaboración propia (2021).....	212

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores aproximados de los parámetros hidráulicos del acuífero ubicado en El Laurel, Gto. Elaboración propia (2020).....	46
Tabla 2. Distribución del agua en la Tierra. Recuperado de Guerrero (2006).....	59
Tabla 3. Calidad de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico. Recuperado de Sánchez (2007).	82
Tabla 4. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según la pendiente del terreno. Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).	87
Tabla 5. Ponderación de la capacidad de recarga hídrica del suelo según su textura. Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).	88
Tabla 6. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca. Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).	89
Tabla 7. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal. Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).	90
Tabla 8. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según los usos del suelo. Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).	91
Tabla 9. Potencial de recarga hídrica según el modelo propuesto por Matus, Faustino, y Jiménez (2009).	92
Tabla 10. Grados de aptitud por factor. Recuperado de Bravo et al. (2015).....	95
Tabla 11. Clasificación de técnicas MAR. Recuperado de Escolero, Gutiérrez, y Mendoza (2017).....	101
Tabla 12. Pesos relativos asignados a cada factor. Elaboración propia (2020).....	139
Tabla 13. Suma de las áreas con aptitud Alta y Muy Alta por Factor. Elaboración propia (2020).....	139

Tabla 14. Superficie ocupada por nivel de aptitud. Elaboración propia (2020).....	140
Tabla 15. Valores de precipitación media mensual y anual en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).....	142
Tabla 16. Valores de temperatura media mensual y anual en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).....	143
Tabla 17. Valores de temperatura máxima media mensual y anual en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).....	144
Tabla 18. Valores de temperatura mínima media mensual y anual en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).....	145
Tabla 19. Estimación de la Evapotranspiración Potencial (ETP) en la microcuenca El Laurel mediante el método de Hargreaves & Samani (1985). Elaboración propia (2021).....	147
Tabla 20. Parámetros físicos del suelo del área de estudio. Elaboración propia (2021).....	149
Tabla 21. Balance hídrico de suelos de la microcuenca “El Laurel”. Elaboración propia (2021).....	150
Tabla 22. Ubicación de los sitios de muestreo de agua analizados mediante FRX. Elaboración propia (2021).	153
Tabla 23. Metales y óxidos identificados en el agua del rio Laurel mediante FRX con muestras centrifugadas por cinco minutos a 3500 rpm, comparados con los elementos identificados en el manantial de la comunidad y los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994. Elaboración propia (2021).....	153
Tabla 24. Metales y óxidos identificados en el agua del rio Laurel mediante FRX después de dejar las muestras en reposo por 24 hr, comparados con los elementos identificados en el manantial de la comunidad y los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994. Elaboración propia (2021).....	154

Tabla 25. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de estanques de tierra. Elaboración propia (2021).	158
Tabla 26. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de pozos de recarga someros. Elaboración propia (2021).	159
Tabla 27. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de pozos ASR y ASTR. Elaboración propia (2021).	160
Tabla 28. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación del muro de gaviones. Elaboración propia (2021).	161
Tabla 29. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de presas de arena. Elaboración propia (2021).	162
Tabla 30. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de presas subsuperficiales. Elaboración propia (2021).	163
Tabla 31. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de tinajas ciegas. Elaboración propia (2021).	164
Tabla 32. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de zanjas-bordos para retención de humedad. Elaboración propia (2021).	165
Tabla 33. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de terrazas individuales. Elaboración propia (2021). ...	166
Tabla 34. Evaluación de las tecnologías MAR y su viabilidad para implementarse en la microcuenca “El Laurel”. Elaboración propia (2021).	169
Tabla 35. Modelo de Ordenamiento Sustentable del Territorio para la zona comprendida por la microcuenca “El Laurel” en el año 2019. Elaboración propia (2021).	172
Tabla 36. Condiciones particulares de la zona oeste de la microcuenca y obras sugeridas. Elaboración propia (2021).	176

Tabla 37. Condiciones particulares de la zona central y extremo oriental y obras sugeridas. Elaboración propia (2021).	177
Tabla 38. Condiciones particulares de la zona este y obras sugeridas. Elaboración propia (2021).	178
Tabla 39. Ubicaciones propuestas para la implementación de estanques de tierra en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).	183
Tabla 40. Tipos de suelo. Recuperado de la NOM-011-CONAGUA-2015 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2015).	186
Tabla 41. Valores de K en función del tipo y uso del suelo. Recuperado de la NOM-011-CONAGUA-2015 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2015).	187
Tabla 42. Costos aproximados para la construcción del estanque 1. Elaboración propia (2021).	191
Tabla 43. Parcelas propuestas para la implementación de tinas ciegas en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).	192
Tabla 44. Factores para determinar el coeficiente de escurrimiento (C). Recuperado de Recuperado de Rubio, Martínez, y Sánchez (2009).	195
Tabla 45. Costos aproximados para la construcción de una hectárea de tinas ciegas en la parcela 1. Elaboración propia (2021).	198
Tabla 46. Parcelas propuestas para la implementación de terrazas individuales en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021). ...	199
Tabla 47. Costos aproximados para la construcción de una hectárea de terrazas individuales en la parcela 1. Elaboración propia (2021).	204
Tabla 48. Parcelas propuestas para la implementación de zanjas a nivel en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).	205
Tabla 49. Costos aproximados para la construcción de una hectárea de zanjas a nivel en la parcela 1. Elaboración propia (2021).	210

Tabla 50. Ubicaciones propuestas para la implementación de tinajas ciegas y terrazas individuales en las zonas boscosas del centro y este de la microcuenca. Elaboración propia (2021).....	212
Tabla A1. Valores de porosidad para distintas rocas. Recuperado de Custodio y Llamas (1983).	237
Tabla A2. Valores de conductividad hidráulica para distintas rocas, valores en m/día. Recuperado de Heath (1983).	238
Tabla A3. Valores de transmisividad para acuíferos. Recuperado de Iglesias (2002).....	238
Tabla A4. Valores de coeficiente de almacenamiento para distintos materiales. Recuperado de Villanueva e Iglesias (1984).	239
Tabla A5. Infiltración básica según el tipo de suelo. Recuperado de FAO (2001).....	239
Tabla A6. Componentes del coeficiente de infiltración. Recuperado de (Schosinsky y Losilla (2000).....	239
Tabla A7. Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos. Recuperado de Grassi (1976).....	240
Tabla A8. Profundidad de raíces de diferentes cultivos. Recuperado de Grassi (1976).	240
Tabla A9. Radiación solar extraterrestre para el hemisferio norte (mm/día) según Allen, Pereira, Raes, y Smith (2006). Conversión de $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ a mm/día por Sánchez (2007) y recuperado del mismo autor.	241
Tabla A10. Radiación solar extraterrestre para el hemisferio sur (mm/día) según Allen, Pereira, Raes, y Smith (2006). Conversión de $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ a mm/día por Sánchez (2007) y recuperado del mismo autor	242
Tabla C1. Grupos de suelos de acuerdo con sus características. Recuperado de CONAFOR (2007).	255

Tabla C2. Clases de cobertura vegetal. Recuperado de CONAFOR (2007).....	256
Tabla C3. Vegetación y condición hidrológica. Recuperado de CONAFOR (2007).....	256
Tabla C4. Uso, tratamiento y condición hidrológica del suelo. Recuperado de CONAFOR (2007).....	257

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1. Tiempo de concentración en una cuenca. Recuperado de Témez (1991).....	68
Ec. 2. Densidad de drenaje de una cuenca. Recuperado de Ibáñez, Moreno, y Gisbert (2011).	73
Ec. 3. Potencial de recarga hídrica. Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).	91
Ec. 4. Frecuencia de escorrentías. Recuperado de Bravo et al. (2015)...	94
Ec. 5. Densidad de drenaje. Recuperado de Bravo et al. (2015).....	94
Ec. 6. Número de infiltración. Recuperado de Bravo et al. (2015).....	94
Ec. 7. Densidad de fracturas. Recuperado de Bravo et al. (2015).....	95
Ec. 8. Sumatoria lineal ponderada. Recuperado de Bravo et al. (2015)..	96
Ec. 9. Ecuación de la continuidad. Recuperado de Schulz y García (2015).	98
Ec. 10. Ecuación del balance hidrológico. Recuperado de Ordoñez, Cartilla Técnica: Balance hídrico superficial (2011).	98
Ec. 11. Estimación del volumen de excavación para jagüeyes pequeños. Recuperado de Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017).	185
Ec. 12. Estimación del gasto de diseño para pequeñas obras según el método racional modificado. Recuperado de Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017).....	186
Ec. 13. Estimación de Ce. Recuperado de Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017).	187
Ec. 14. Estimación de la carga sobre el vertedor. Recuperado de Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017).....	188
Ec. 15. Determinación de la pendiente media en campo. Recuperado de Rubio, Martínez, y Sánchez (2009).....	194

Ec. 16. Determinación del intervalo vertical entre tinas ciegas. Recuperado de Rubio, Martínez, y Sánchez (2009).	194
Ec. 17. Determinación del intervalo horizontal entre tinas ciegas. Recuperado de Rubio, Martínez, y Sánchez (2009).	194
Ec. 18. Volumen de agua que una tina puede retener. Recuperado de Rubio, Martínez, y Sánchez (2009).....	195
Ec. B1. Cálculo de la retención mensual de lluvia por follaje. Recuperado de Schosinsky (2006).....	243
Ec. B2. Cálculo del coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo. Recuperado de Schosinsky (2006).	244
Ec. B3. Cálculo de del coeficiente de infiltración del suelo considerando la pendiente, vegetación y textura del suelo. Recuperado de Schosinsky (2006).....	244
Ec. B4. Precipitación que infiltra mensualmente al suelo. Recuperado de Schosinsky (2006).....	245
Ec. B5. Cálculo de la escorrentía superficial. Recuperado de Schosinsky (2006).....	245
Ec. B6. Evapotranspiración potencial. Recuperado de Hargreaves y Samani (1985).....	247
Ec. B7. Radiación solar incidente. Recuperado de Samani (2000).	247
Ec. B8. Conversión de peso por porcentaje de suelo seco, a porcentaje por volumen. Recuperado de Schosinsky (2006).....	248
Ec. B9. Conversión de porcentaje de humedad por volumen a milímetros de agua. Recuperado de Schosinsky (2006).	249
Ec. B10. Cálculo del coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración. Recuperado de Schosinsky (2006).	249
Ec. B11. Cálculo del coeficiente de humedad al final del mes una vez ocurrida la evapotranspiración. Recuperado de Schosinsky (2006).	250

Ec. B12. Evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes dado. Recuperado de Schosinsky (2006).	250
Ec. B13. Humedad disponible. Recuperado de Schosinsky (2006).....	251
Ec. B14. Cálculo de la evapotranspiración real. Recuperado de Schosinsky (2006).....	251
Ec. B15. Humedad del suelo al final del mes. Recuperado de Schosinsky (2006).....	252
Ec. B16. Recarga potencial al acuífero. Recuperado de Schosinsky (2006).....	252
Ec. C1. Estimación del escurrimiento medio. Recuperado de CONAFOR (2007).....	254
Ec. C2. Estimación del potencial máximo de retención de humedad. Recuperado de CONAFOR (2007).	254

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se propone una metodología para la propuesta de una o varias obras de recarga hídrica en las inmediaciones de la comunidad de El Laurel, Guanajuato, como parte de la implementación de un plan de Manejo de Recarga de Acuíferos (MAR) en el área. La metodología se dividió en cuatro etapas, comenzando con la estimación del potencial de recarga hídrica natural de la microcuenca que alberga la zona de estudio mediante una Evaluación Espacial Multicriterio aplicando las metodologías propuestas por Matus, Faustino, y Jiménez (2009) y Bravo et al. (2015). Se evalúan los factores de pendiente del terreno, tipo de roca, tipo de suelo, uso de suelo, cobertura vegetal, número de infiltración y densidad de fracturas y lineamientos. Determinando que la microcuenca presenta una aptitud media para la recarga con más del 76% de su superficie. Se estimó la recarga potencial anual al acuífero mediante el balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky (2006), determinando una recarga anual de 145,070 m³, y comprobando así la aptitud favorable de la microcuenca para albergar obras de recarga hídrica. La calidad del agua de recarga de las obras se estableció mediante el análisis de dos muestras de agua del río principal de la microcuenca mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX), estos mostraron una calidad química del agua en general buena, con presencia de S, Mg, Ca, Zr, Ru, Rh, Al, Si, K, Ti, MgO, K₂O, CaO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, TiO₂, MnO y Fe₂O₃, atribuidos en su gran mayoría a la propia composición química de las pizarras sobre las que fluye el río. Para la determinación de las obras de recarga más viables se analizó de manera conjunta el mapa de zonas potenciales de recarga hídrica natural, las políticas ambientales implementadas dentro del área, las necesidades medioambientales de la misma y, por último, la descripción de nueve técnicas MAR considerando las características del terreno sugeridas para su implementación, así como las ventajas y desventajas de su ejecución. Ante los resultados de dicha evaluación se propone la implementación de siete estanques de tierra; cinco parcelas con un área total de catorce hectáreas de tinajas ciegas; seis

parcelas con un área total de seis hectáreas de terrazas individuales y cuatro parcelas con una área total de diez hectáreas de zanjas a nivel, todas ellas en la zona centro y oeste de la microcuenca. Así mismo se identifican cuarenta sitios especialmente degradados con pérdida de suelo y vegetación en la zona oriental de la microcuenca en los que se propone la implementación focalizada de tinas ciegas y terrazas individuales en grupos más reducidos.

ABSTRACT

In this research work, a methodology is presented for the proposal of one or several water recharge methods in the vicinity of the El Laurel community as part of the implementation of a Managed Aquifer Recharge plan (MAR) in the area. The methodology was divided into four stages, beginning with the estimation of the natural water recharge potential of the micro-basin that houses the study area through a Multicriteria Spatial Analysis applying the methodologies proposed by Matus, Faustino, & Jiménez (2009) and Bravo et al. (2015). The factors of slope of the terrain, rock type, soil type, use of soil and vegetation cover, density of fractures and alignments and number of infiltration are evaluated. Determining that the micro-basin presents in its majority a medium aptitude for recharge with more than 76% of its surface. Next, the annual potential recharge to the aquifer was estimated through the soil water balance proposed by Schosinsky (2006), determining an annual recharge of 145,070 m³, and thus verifying the favorable aptitude of the micro-basin to host water recharge works. The quality of the recharge water of the recharge works was established by analyzing two water samples from the main river of the micro-basin using the X-ray fluorescence technique (X-ray fluorescence), these showed a generally good chemical quality of the water, with presence of S, Mg, Ca, Zr, Ru, Rh, Al, Si, K, Ti, MgO, K₂O, CaO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, TiO₂, MnO and Fe₂O₃, attributed mostly to the composition itself chemistry of the slates on which the main river of the micro-basin flows. To determine the most viable recharge methods to implement in the micro-basin, the map of potential natural water recharge zones, the environmental policies implemented within the area delimited by the micro-basin, the environmental needs of the same and, finally, the description of nine MAR techniques considering the characteristics of the terrain suggested for their implementation, as well as the advantages and disadvantages of their implementation were analyzed all together. Given the results of said evaluation, the implementation of seven earthen ponds is proposed; five plots with a total area of fourteen hectares of blind tubs; six plots with a total area of six hectares of individual

terraces and four plots with a total area of ten hectares of level ditches, all of them in the central and western zone of the micro-basin. Likewise, forty specially degraded sites with loss of soil and vegetation are identified in the eastern zone of the micro-basin in which the targeted implementation of blind tubs and individual terraces in smaller groups is proposed.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

A principios del siglo XX, el desarrollo de las grandes ciudades propicio el aumento en la demanda de agua potable, sobre todo en épocas de escases. Derivado de este desarrollo urbano, se generan una serie de problemas como la dificultad de su abastecimiento a poblaciones dispersas; así como la contaminación de aguas superficiales y subterráneas a causa de la propia intervención humana y la limitación de recursos hídricos. El crecimiento poblacional ha venido en aumento desde entonces de manera acelerada, situación que irremediablemente dificulta una correcta distribución de bienes y servicios entre la población mundial. Dentro de los diversos recursos naturales que el ser humano debe gestionar; el agua representa el más importante, no solo por su inherente necesidad para sustentar la vida, sino también por los innumerables procesos domésticos e industriales en los que el agua representa la principal materia prima gracias a sus bondadosas propiedades fisicoquímicas. El aumento en la demanda de agua, los procesos de deforestación, las modificaciones en el uso del suelo, el cambio climático que ocasiona modificaciones en el balance hídrico terrestre propiciando periodos de sequía cada vez más prolongados, así como el aumento global en la temperatura media de nuestro planeta incrementando la evapotranspiración del agua de presas, lagos, ríos y cultivos han planteado un enorme reto al momento de aprovechar de manera racional el agua en nuestro planeta, situación que ha orillado a una sobreexplotación sobre todo de los cuerpos de agua subterráneos.

1.1 La importancia del agua subterránea

Gran parte del agua de la Tierra es poco apta para el consumo humano. El 97.5% es agua salobre localizada en mares y océanos, por lo que se dispone solo del 2.5% de agua dulce, casi toda ella congelada en las profundidades de la Antártida y Groenlandia. De este 2.5% solo se pueden explotar cantidades mucho más pequeñas de agua dulce presente en el suelo, ríos, lagos y acuíferos poco profundos (Organización Meteorológica

Mundial, 1997). El agua subterránea es un recurso estratégico tanto para el ser humano, siendo una fuente importante de abastecimiento de agua para consumo humano, actividades industriales, agrícolas y recreativas, como para el medio ambiente y su ciclo hidrológico. Históricamente, las aguas subterráneas han sido la fuente principal de abastecimiento para las poblaciones, la agricultura bajo riego y el desarrollo industrial en regiones áridas y semiáridas de todo el mundo, ya que, a diferencia de muchas corrientes superficiales, el agua subterránea no está sujeta de manera tan sensible a las variaciones de precipitación pluvial anual, cobrando por lo tanto vital relevancia sobre todo en épocas de sequías. Dentro de las ciudades más pobladas del mundo en las que el agua subterránea ha jugado un factor clave para su desarrollo se encuentran la Ciudad de México, Calcuta, Shanghái, Buenos Aires, Dhaka, Manila, Pekín, París y Londres. Igualmente, extensas zonas de China, India, Estados Unidos y México han experimentado un aumento exponencial del riego con agua subterránea (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017).

En México, el agua subterránea representa la única fuente permanente de agua en las regiones áridas y semiáridas, las cuales ocupan cerca del 50% del territorio nacional, sustentan el riego de dos millones de hectáreas, abastecen cerca del 75% del volumen de agua utilizados en las ciudades, donde se concentran alrededor de 65 millones de habitantes, como también cubren la demanda de agua de la gran mayoría de los desarrollos industriales, y finalmente abastecen casi en su totalidad a la población rural del país que representa cerca de 25 millones de habitantes (Arreguín, 2005). Para su administración, el territorio nacional se ha dividido en 653 unidades denominadas “acuíferos” (Diario Oficial de la Federación, 2001), de los cuales 105 se han catalogado como sobreexplotados (Conagua, 2018), con extracciones superiores a la recarga natural; además se considera que 100 acuíferos tienen un grado de explotación (relación extracción/recarga) entre el 75 y el 99%, volviendo así más crítica la situación de las aguas subterráneas en el país, pudiendo pasar al nivel de

acuíferos sobreexplotados si no se toman medidas urgentes respecto a su administración adecuada y sostenible.

El estado de Guanajuato reporta una sobreexplotación de agua subterránea en 18 de sus 20 acuíferos (Comisión Nacional del Agua, 2016), si bien 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), donde en muchos casos la principal fuente de abastecimiento de agua son los aprovechamientos naturales como pozos artesianos o manantiales. Una problemática se considera también la calidad del agua de los cuerpos de agua superficiales, de ello surge la necesidad de implementar medidas para la protección de las aguas subterráneas.

1.2 Gestión de Recarga de Acuíferos

Ante la problemática de la explotación intensiva de aguas subterráneas la *Gestión de Recarga de Acuíferos* (GRA), también denominado *Manejo de Recarga de Acuíferos* (MAR, por sus siglas en inglés de Managed Aquifer Recharge), anteriormente llamada *Recarga Artificial de Acuíferos*, representa un conjunto de técnicas que buscan de manera general restringir la escorrentía superficial generada durante eventos de precipitación, así como favorecer la infiltración de agua hacia los mantos acuíferos. Un gran porcentaje de las acciones se desarrollan para almacenar agua para su uso futuro, el abastecimiento de agua para uso agrícola y para consumo humano. Otras argumentaciones para gestionar la recarga de acuíferos incluyen el control de la intrusión de agua salobre, mejorar y disminuir las fluctuaciones de la calidad del agua, disminuir las pérdidas de agua por evaporación y escorrentía, disposición/reutilización de agua residual de tormenta, aumentar el caudal base de los ríos, la reducción de la escorrentía y erosión del suelo, la amortiguación de las inundaciones reduciendo así su capacidad destructiva, así como el control de la subsidencia de suelos (Gale, 2005).

La gestión de recarga de acuíferos no solamente pretende proveer un medio eficaz para almacenar el agua y permitir una mejor gestión de los recursos disponibles, sino que, además, impactar en la calidad de agua, usualmente de manera benéfica. Los cambios en la calidad del agua de recarga y del agua subterránea se producen por la remoción física de materia particular, remoción biológica de materia orgánica y agentes patógenos, dilución o sustitución del agua subterránea de baja calidad e interacciones geoquímicas del agua de recarga con el agua subterránea oriunda del lugar y el material del acuífero (Gale, 2005). La gestión de recarga de acuíferos debe ser; por lo tanto, considerada como un método para la gestión de los recursos hídricos juntamente con un amplio espectro de métodos, incluyendo el almacenamiento superficial, la explotación del agua subterránea, la gestión de la demanda, la reutilización del agua, etc.

Se tiene registro de un importante número de casos de éxito en la aplicación de la gestión de recarga de acuíferos en México y en otros países; por ejemplo, el de la gestión de cuenca en Rajasthan, India, donde en el año 1985 la cuenca del río Arvari (al igual que otras cuencas del área) se encontraba en un estado de alta degradación debido al sobrebombeo de agua subterránea, remoción de la vegetación natural y erosión del suelo. Ante esta situación y agravados por una severa sequía, la ONG Tarun Bharat Sangh (TBS) afrontó el problema de la falta de seguridad hídrica iniciando un programa de captación de agua mediante la construcción de represas de tierra con forma de media luna ("johad") (figura 1) para recolectar la escorrentía producida durante breves, pero intensas tormentas que se producían en el área.



Figura 1. Johad en Rajasthan, India. Recuperado de The Water Network (2020).

La implementación de acciones similares por un número creciente de comunidades en el ejercicio de captación ha resultado en que actualmente más de 70 localidades estén involucradas en el plan, construyendo miles de johads en India, así como otras estructuras para la captación de agua. Gracias al aumento de la recarga, combinado con otras iniciativas de gestión de las cuencas, ha dado como resultado un incremento de los niveles de agua subterránea y, desde 1995, el río Avari tiene un caudal permanente (Gale, 2005). A nivel nacional; un ejemplo exitoso de Gestión de Recarga de Acuíferos fue el proyecto piloto de manejo de la recarga de agua subterránea en la zona de Ojos del Chuvíscar en el estado de Chihuahua (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017), donde la disminución en los volúmenes de agua subterránea debido al excesivo uso y aprovechamiento de la capacidad natural del sistema acuífero llevó a la imperiosa necesidad de implementar un sistema que permitiera recargarlo, disminuyendo con ello su déficit. Para ello se erigió un sistema constituido por un muro filtrante (muro-gavión) sobre el lecho del río Chuvíscar y un sistema de tuberías que conducen el agua a un pozo de recarga. En el año 2017 tras 12 años ininterrumpidos de operación fue posible la estabilización

del volumen de agua extraído anualmente del acuífero, sin mayores abatimientos en los pozos.

Considerando la situación actual de múltiples cuerpos de agua subterráneos en el Estado de Guanajuato, se cree pertinente la implementación de un proyecto de gestión de recarga de acuíferos que pueda ser replicado y permita mantener en el caso de los acuíferos catalogados como subexplotados un balance hídrico favorable, y para los acuíferos sobreexplotados, buscar detener su abatimiento freático, recuperando con ello puntos naturales de descarga como manantiales mejorando además la calidad del agua. Una de las mayores aportaciones de las técnicas MAR es el amplio abanico de soluciones tecnológicas para enfrentar los efectos negativos del cambio climático desde la perspectiva de las aguas subterráneas, pero también con una visión global de la gestión integral de los recursos hídricos; se demuestra que un sistema de manejo de recarga de agua subterránea no necesariamente debe ser complejo y costoso, sino que en ocasiones es posible identificar instrumentaciones simples de ingeniería, que funcionan de manera eficiente, a bajos costos y por extensos periodos de tiempo.

1.3 Problemática

El estado de Guanajuato presenta una sobreexplotación de agua subterránea en 18 de sus 20 acuíferos (Comisión Nacional del Agua, 2016), propiciado en gran medida por un aumento en la demanda de agua por parte de la creciente población en el estado de Guanajuato, las modificaciones en el uso de suelo y cobertura vegetal, el uso irracional del agua por múltiples sectores sociales e industriales, la gestión ineficiente del recurso, así como por las condiciones meteorológicas extremas inducidas por el cambio climático global. Esto ha hecho urgente y necesario el aprovechamiento de escurrimientos superficiales mediante la construcción de una o varias obras como aplicación de la gestión de recarga de acuíferos, presentando así una alternativa para mantener favorablemente la calidad del agua de recarga y el balance hídrico de los acuíferos

subexplotados y en el caso de los sobreexplotados recuperar el nivel freático del agua subterránea.

1.4 Justificación del proyecto

Es innegable la delicada situación que están padeciendo los acuíferos en el estado de Guanajuato y la manera en que esta situación compromete la calidad del agua, su disponibilidad y capacidad de abastecimiento para la población. Las complejidades sociales, económicas, normativas y políticas que significan el diseño y construcción de grandes obras hidráulicas de recarga brindan una oportunidad para que obras de menor dificultad para su instrumentación sean consideradas por su viabilidad para implementarse. Dentro de las problemáticas que enfrenta la instrumentación de los métodos de gestión de recarga de acuíferos como mencionan Escolero, Gutiérrez, y Mendoza (2017) radica en que a pesar de ser muy atractivo desde el punto de vista técnico, científico y de investigación por su instrumentación simple, se requiere de estudios previos que toman tiempo y recursos económicos para llevarlos a cabo, además de que la construcción de obras habrá de requerir de mayor tiempo y más recursos económicos, situaciones que por lo general los tomadores de decisiones en los diversos niveles, tanto federal, estatal y municipal deben elegir entre efectuar inversiones en proyectos que ofrecen una solución a su juicio inmediata, u otras medidas de prevención como el caso de la gestión de recarga de acuíferos, que pueden llegar a significar resultados muy favorables en el mediano o largo plazo pero sin los efectos colaterales no deseados, que en algunas ocasiones se tienen que considerar ante la posible solución de problemas de manera inmediata.

Mirando hacia el futuro, cobra mayor relevancia la necesidad de implementar una o varias obras civiles en Guanajuato como parte de un plan integral de gestión para la recarga de acuíferos; un anteproyecto que permita aprovechar los escurrimientos superficiales que en la mayoría de las ocasiones son perdidos por evaporación, evapotranspiración o contaminados por acción antropogénica; con el objetivo de recuperar el

balance hidrológico de las aguas subterráneas del estado, mejorando la calidad del agua durante el proceso de infiltración, además de aprovechar los múltiples beneficios adicionales que suponen la implementación de la GRA, como el aumento de la humedad del suelo permitiendo el desarrollo de la actividad agrícola, o la disminución destructiva ante eventos extremos de avenidas. Si bien; una obra por sí sola no representa una solución inmediata y definitiva, complementada con una estrategia holística para la gestión y protección de recursos hídricos supone una solución eficiente y sustentable al mediano y largo plazo, que no comprometa aún más las reservas hídricas en la actualidad y para las futuras generaciones.

1.5 Hipótesis

La obra civil propuesta (o el conjunto de ellas) para implementar en la microcuenca El Laurel incrementará los caudales en los manantiales localizados en las comunidades de El Terrero y El Laurel, y a su vez favorecerá la recarga hídrica al acuífero Silao-Romita. Así mismo, las estrategias y recomendaciones propuestas para mejorar el uso y manejo del agua en el área permitirán potenciar los beneficios que brinde la obra.

1.6 Objetivo general

Proponer el diseño de una obra civil o conjunto de ellas, como parte de la implementación de un plan de gestión de recarga de acuíferos en la comunidad El Laurel, Guanajuato, que resulte innovador y efectivo para incrementar el caudal del manantial ubicado en dicha comunidad, presentando una metodología que pueda ser replicada en otras zonas del estado de Guanajuato, aumentando el alcance de la tesis y los beneficios que la implementación de un plan de gestión de recarga de acuíferos puede ofrecer a la población que las implementa (Bravo et al., 2015).

1.7 Objetivos particulares

1. Estimar el potencial de recarga hídrica de la zona oriental de la comunidad El Laurel mediante una evaluación espacial multicriterio, aplicando el proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y álgebra de mapas

propuestos por Matus, Faustino, y Jiménez (2009) y Bravo et al. (2015). Se evaluarán los parámetros de pendiente, geología, densidad de fracturas y lineamientos, edafología, uso de suelo, cobertura vegetal y número de infiltración (grado de desarrollo de la red superficial de drenaje).

2. Determinar la recarga potencial del acuífero aplicando la metodología de balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky (2006).

3. Determinar la calidad del agua de recarga mediante análisis químicos de Fluorescencia de Rayos X.

4. Con el establecimiento de las características de la zona de estudio y tomando como referencia los casos de éxito de aplicación de las técnicas MAR reportados en la literatura, diseñar una obra de recarga hídrica (o un conjunto de ellas) que resulte viable e innovadora para implementar en las locaciones seleccionadas dentro del área de estudio.

5. Establecer consideraciones relevantes y adicionales para la gestión y protección de las aguas subterráneas en el área de estudio, potenciando así, los beneficios de la implementación de la o las obras de recarga.

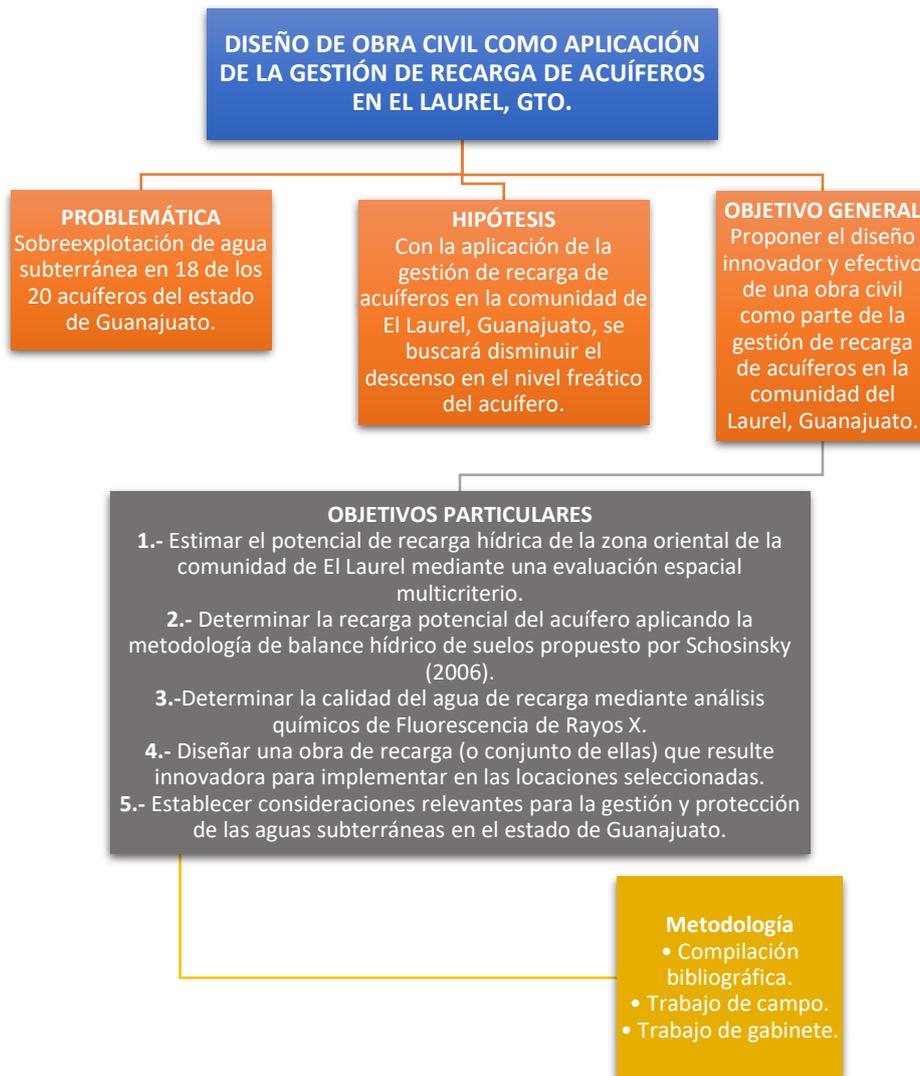


Figura 2. Cronograma general del proyecto de investigación. Elaboración propia (2020).

CAPÍTULO II. MARCO HISTÓRICO

2.1 Caracterización del área de estudio

2.1.1 Localización y situación geográfica

La comunidad El Laurel (figura 3) se ubica en las coordenadas 14 Q 263616 E, 2337028 N a una altitud de 2,414 msnm. Se encuentra 11 km al norte de la ciudad de Guanajuato y 8 km al norte de la Presa de La Esperanza, colinda con las localidades de San Bartolo y Calera de Ruiz al este, El Terrero y la Güilota al oeste y El Chocolate al noreste. Ubicada dentro de la cuenca del Río Lerma-Salamanca, limita 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 lomeríos que lo separan de la zona geohidrológica del Valle de León (INEGI, 1998).

El área de estudio se localiza entre las coordenadas 14 Q 263000 y 270000 E, 2334000 y 2340000 N. La microcuenca de estudio la cual se denominó “El Laurel” representa un área de 15.6 km².

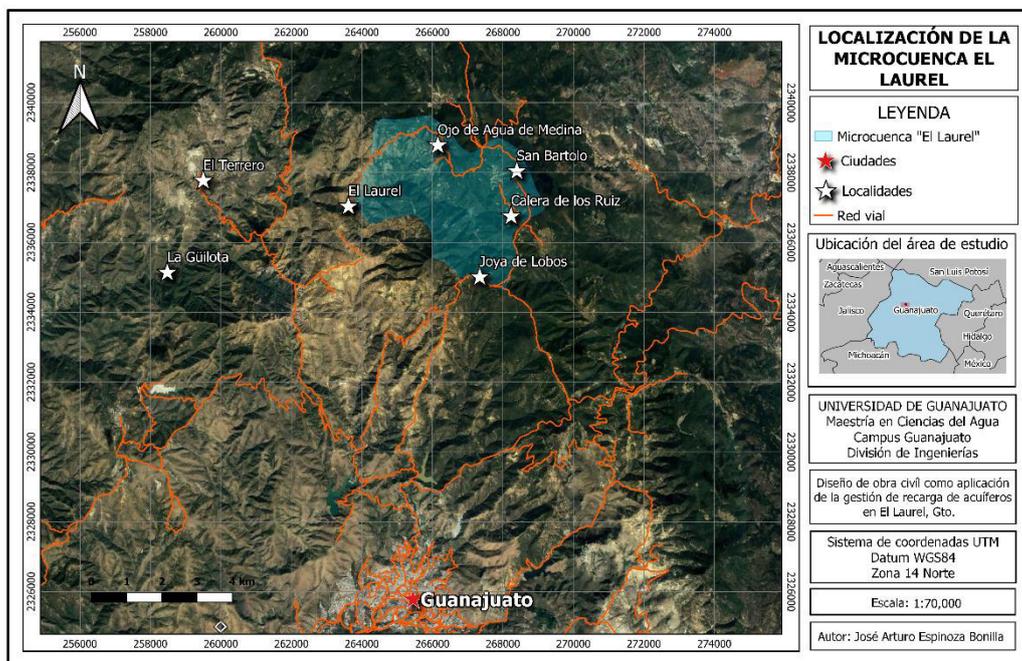


Figura 3. Mapa de localización del área de estudio. Elaboración propia (2020).

Según el censo realizado por el INEGI en la comunidad El Laurel en el año 2010, publicado en el Catálogo de Localidades de la Secretaría del Desarrollo Social (SEDESOL, 2013), la localidad cuenta con un total de 81 habitantes (47 hombres y 34 mujeres) y 16 viviendas de particulares habitadas, de las cuales ninguna cuenta con agua entubada ni drenaje y solo una dispone de sanitario. Se reportó un grado de marginación alto en la comunidad; el 14% de su población de 15 años o mayor es analfabeta y el 49% de la población de 15 años o más no tiene completos sus estudios de educación primaria. Las comunidades de San Bartolo y Calera de los Ruiz presentan condiciones similares: poblaciones inferiores a los 100 habitantes y un alto rezago social.

2.1.2 Hidrología superficial

El área de estudio se ubica en el límite nororiental de la subcuenca del Río Guanajuato (figura 4), la cual forma parte de la cuenca del Río Lerma-Salamanca (figura 5) y la región hidrológica Lerma-Santiago (figura 6). Esta región hidrológica se sitúa como la más grande de México con una extensión de 134,581 km², representando el 7% del territorio nacional (FAO, 2002), en cuanto a su distribución, el 43.75% de su superficie pertenece al estado de Guanajuato, el 30.26% a Michoacán y porcentajes menores a los estados de Jalisco, Estado de México y Querétaro (Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, 2020).

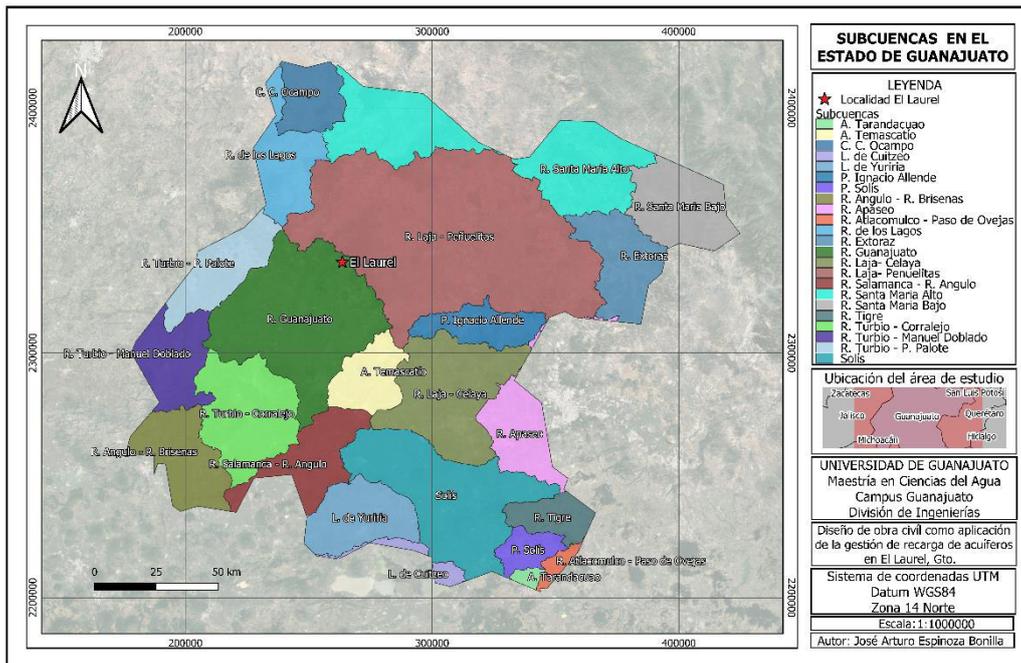


Figura 4. Mapa de subcuencas en el estado de Guanajuato. Elaboración propia (2020).

El río Lerma, principal colector de la cuenca, nace en la Laguna de Chignahuapan en el municipio de Almoloya del Río, Estado de México, y desemboca en el Océano Pacífico, sobrepasando los 700 km de longitud. A lo largo de su recorrido hasta su desembocadura, se integrarán al cauce principal tributarios como los ríos La Gavia, Jaltepec, Laja, Silao-Guanajuato, Turbio, Angulo y Duero. En el estado de Guanajuato el río Lerma surca con dirección noroeste hasta las cercanías de Salamanca, donde cambia su dirección de curso y drena con rumbo general suroeste, hasta las inmediaciones del poblado La Barquilla; a partir de esa localidad constituye el límite natural entre los estados de Guanajuato y Michoacán.

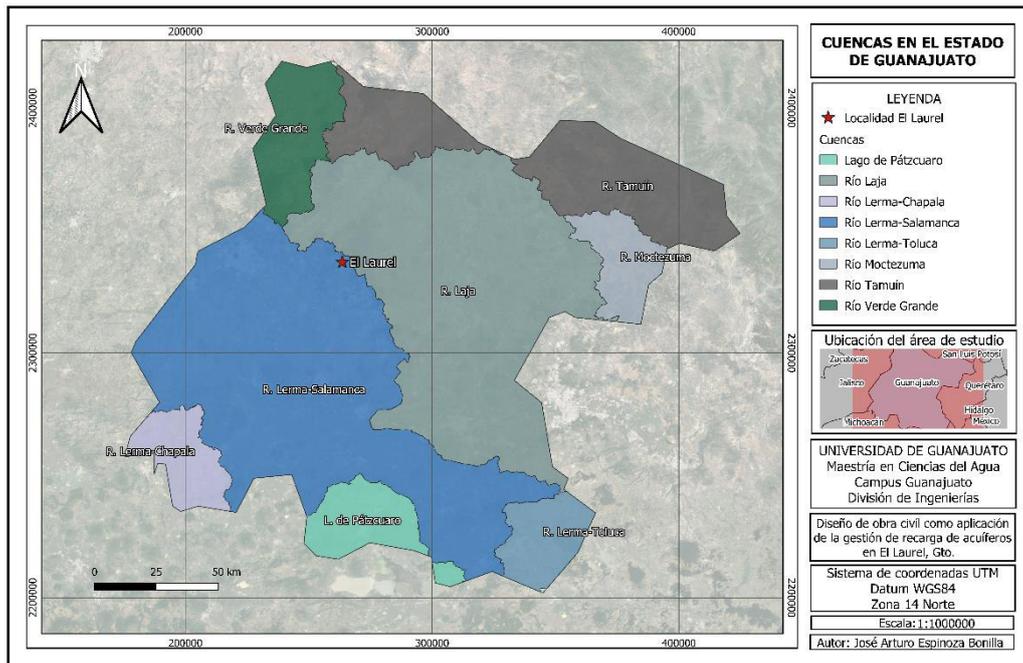


Figura 5. Mapa de cuencas en el estado de Guanajuato. Elaboración propia (2020).

Respecto a las características hidrológicas de la cuenca del Río Lerma-Salamanca, este abarca la porción central y suroriental del estado de Guanajuato, ocupando el 33.8 % de la superficie total estatal, equivalente a 10,400 km² aproximadamente. Según datos proporcionados por el (INEGI, 1998) la cuenca presenta topografía contrastante, ya que se encuentran alternando amplios valles con pendientes suaves distribuidos en toda la cuenca, y zonas montañosas con pendientes fuertes, características de la parte norte de León y Guanajuato, así como de la zona de Pénjamo y Cuerámara.

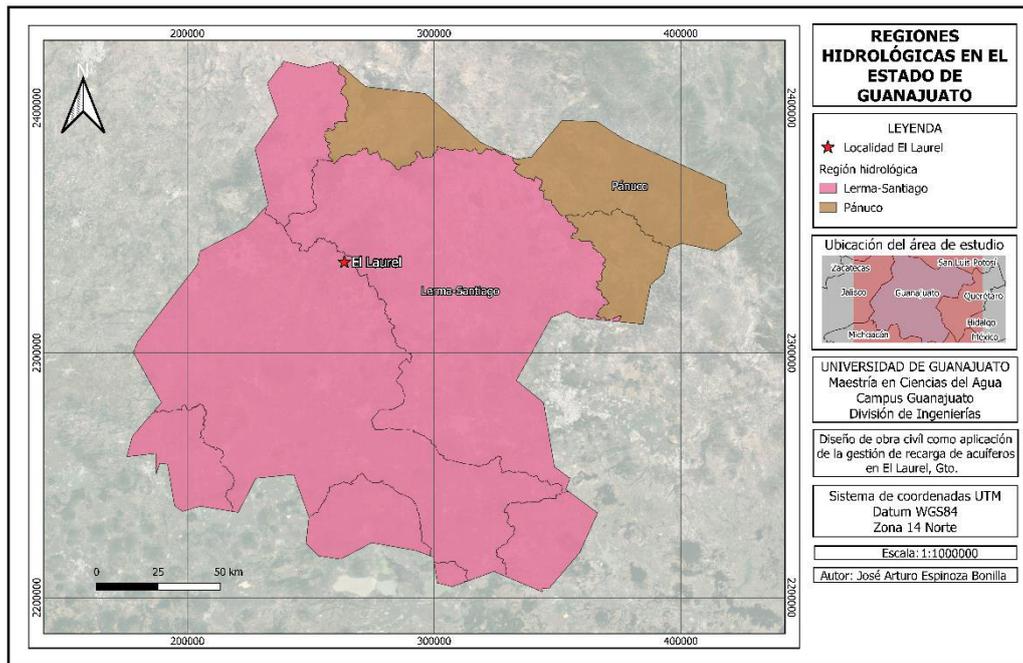


Figura 6. Mapa de regiones hidrológicas en el estado de Guanajuato. Elaboración propia (2020).

2.1.3 Encuadre geológico y estratigráfico

La comunidad El Laurel se localiza en la porción norte de la Cuenca de la Esperanza, siendo así parte de la Sierra de Guanajuato, zona que históricamente ha sido objeto de múltiples estudios e investigaciones científicas en el área de las ciencias de la tierra gracias a sus abundantes yacimientos minerales. Autores como Nieto-Samaniego, García-Dobarganes, y Aguirre (1992), Mengelle et al. (2013), Orozco (2014), Puy-Alquiza, Miranda-Avilés, Loza-Aguirre, Li y Zanor (2017) o Del Rio et al. (2020) han contribuido significativamente a la descripción de la geología y estratigrafía de la Sierra de Guanajuato.

La Sierra de Guanajuato es una serranía de forma alargada con dirección NW-SE ubicada dentro de dos provincias geológicas; la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Transmexicana, extendiéndose por aproximadamente 100 km de largo y 35 km de ancho desde la región de Comanja de Corona, Jalisco, hasta el Graben de la Saucedá (Del Rio et al.,

2020). La estratigrafía general de la sierra se describe consistente en dos conjuntos litológicos claramente diferenciables a los que se han denominado como: 1) Complejo Basal y 2) Rocas Terciarias (Orozco, 2014). El primero de estos paquetes también denominado Ensamble Plutónico de Guanajuato, abarca el rango de edades desde el Mesozoico hasta el Terciario temprano y el segundo, parte del Cenozoico.

En el área de estudio aflora en su mayoría roca metavolcánica sedimentaria correspondiente a la secuencia La Esperanza (figura 7); afiliación del Complejo Basal. Se trata de las rocas más profundas y extendidas en la sierra de Guanajuato; representan una secuencia volcano-sedimentaria pelágica, muy deformada, consiste en series de lutitas negras a grises y localmente pizarras, en capas delgadas, con horizontes intercalados de areniscas, conglomerados oligomícticos y calizas arcillosas localmente marmorizadas, silicificadas y con clorita (Echegoyén, 1978; Martínez-Reyes, 1987; Quintero-Legorreta, 1992). De acuerdo con Orozco (2014), interestratificadas con estas rocas es frecuente encontrar basaltos almohadillados y hialoclastitas de edades inciertas debido a la intensa alteración hidrotermal, así como al metamorfismo de bajo grado que experimento la zona.



Figura 7. Afloramiento de pizarras pertenecientes a la secuencia “La Esperanza” en las inmediaciones de la comunidad El Laurel. Autoría propia (2021).

Respecto a los basaltos que afloran en la zona, estos forman parte de la unidad volcano-sedimentaria La Luz, consistente en lavas submarinas en estructuras tanto almohadillas como masivas, de composición basáltica, intercaladas con pedernal, piroclásticas básicas y más raramente con rocas volcanodetríticas y derrames dacíticos-riodacíticos hacia su cima (Mengelle et al., 2013). Por último, se tiene la presencia de flujos riolíticos del Terciario Temprano aflorando en el norte del área. En la figura 8 se muestra la columna litoestratigráfica del Distrito Minero de Guanajuato según el Depto. de Geología de las Torres, con modificaciones de Orozco (2014); en donde se puede apreciar la disposición relativa de las principales unidades que afloran en el área de estudio.

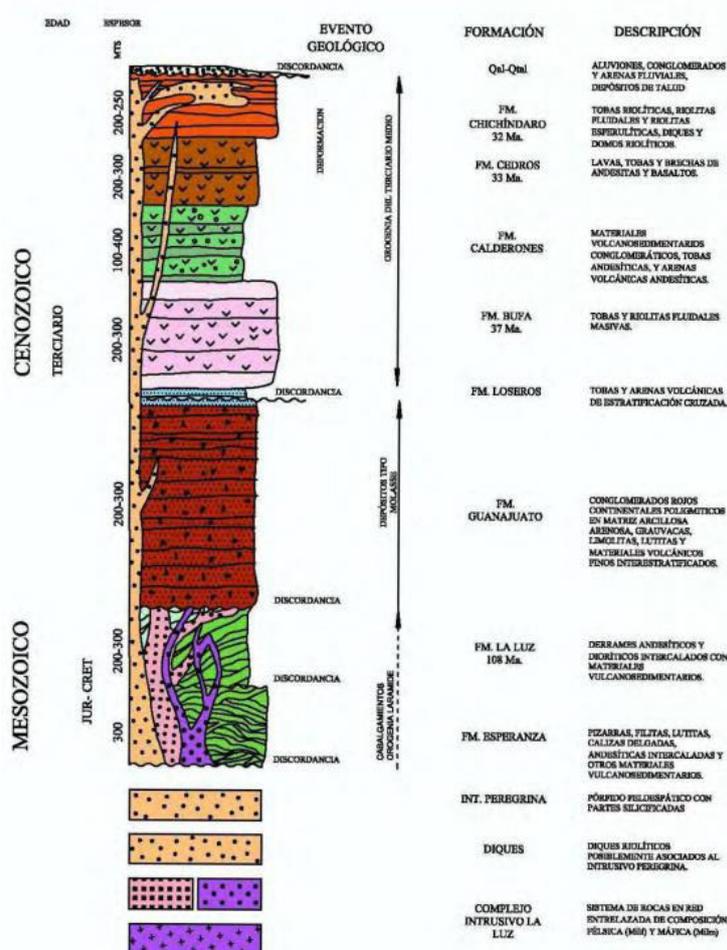


Figura 8. Columna litoestratigráfica del Distrito Minero de Guanajuato según el Depto. de Geología de las Torres, con modificaciones de Orozco (2014). Recuperado de Orozco (2014).

2.1.4 Geología del subsuelo

La comunidad El Laurel se localiza sobre el acuífero Silao-Romita (figura 9), el cual hasta el año 2014 estaba catalogado como sobreexplotado por la Comisión Nacional del Agua, que reportaba un déficit de 120.20 millones de metros cúbicos anuales (CONAGUA, 2015). Por su parte el Subsistema de Información Geográfica, Medio Ambiente, Ordenamiento Territorial y Urbano del estado de Guanajuato (2021) y el INEGI (2018) en su última actualización, aún le otorgan la condición de sobreexplotado.

En cuanto a la constitución general del acuífero Silao-Romita, INEGI (1998) describe que en la porción suroccidental predomina material granular, formado por gravas, arenas y arcillas de gran espesor y de buena permeabilidad; en la porción nororiental, predominan los sedimentos granulares con componente arcilloso, disminuyendo notablemente la permeabilidad; mientras que en el norte de Silao existen acuíferos de rocas riolíticas y basálticas, que se encuentran en explotación moderada.

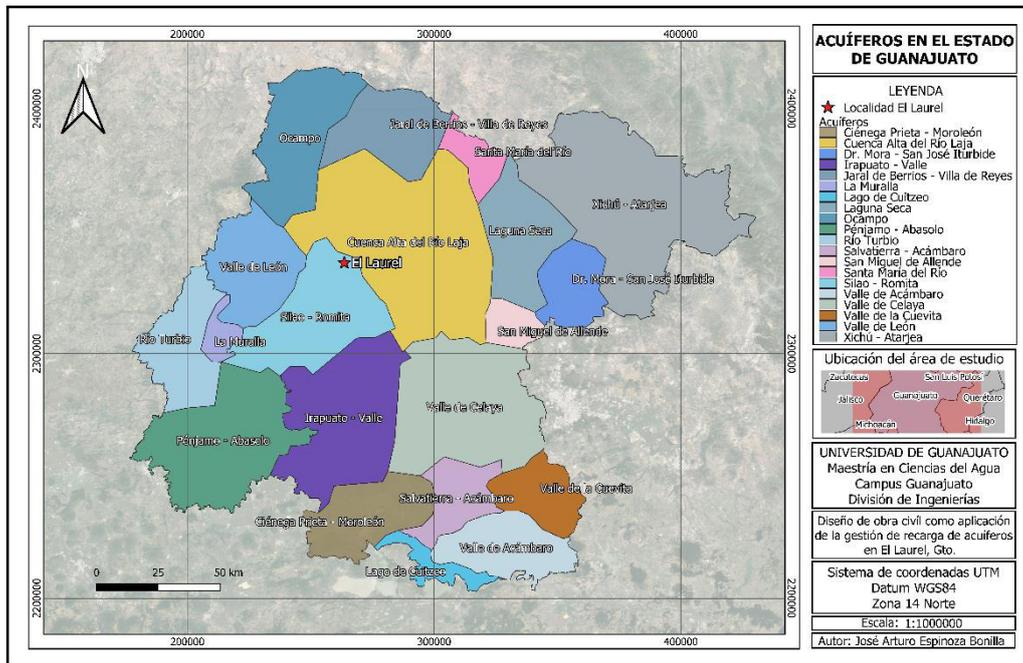


Figura 9. Acuíferos en el estado de Guanajuato. Elaboración propia (2020).

Para obtener de manera particular una aproximación de la constitución y funcionamiento del acuífero localizado en el Laurel se han generado dos perfiles geológicos (figura 10), así como evaluar los parámetros hidráulicos de los materiales que lo componen, para ello se consideraron las tablas de porosidad para distintas rocas, recuperada de Custodio y Llamas (1983) (tabla A1), conductividad hidráulica, recuperada de Heath (1983) (Tabla A2) y coeficiente de almacenamiento, recuperada de Villanueva e Iglesias (1984) (Tabla A4). La transmisividad del acuífero se obtuvo mediante la suma de los productos entre los espesores medios de cada unidad litológica y su conductividad hidráulica, determinando la calificación del acuífero para su explotación mediante la tabla A3 recuperada de Iglesias (2002).

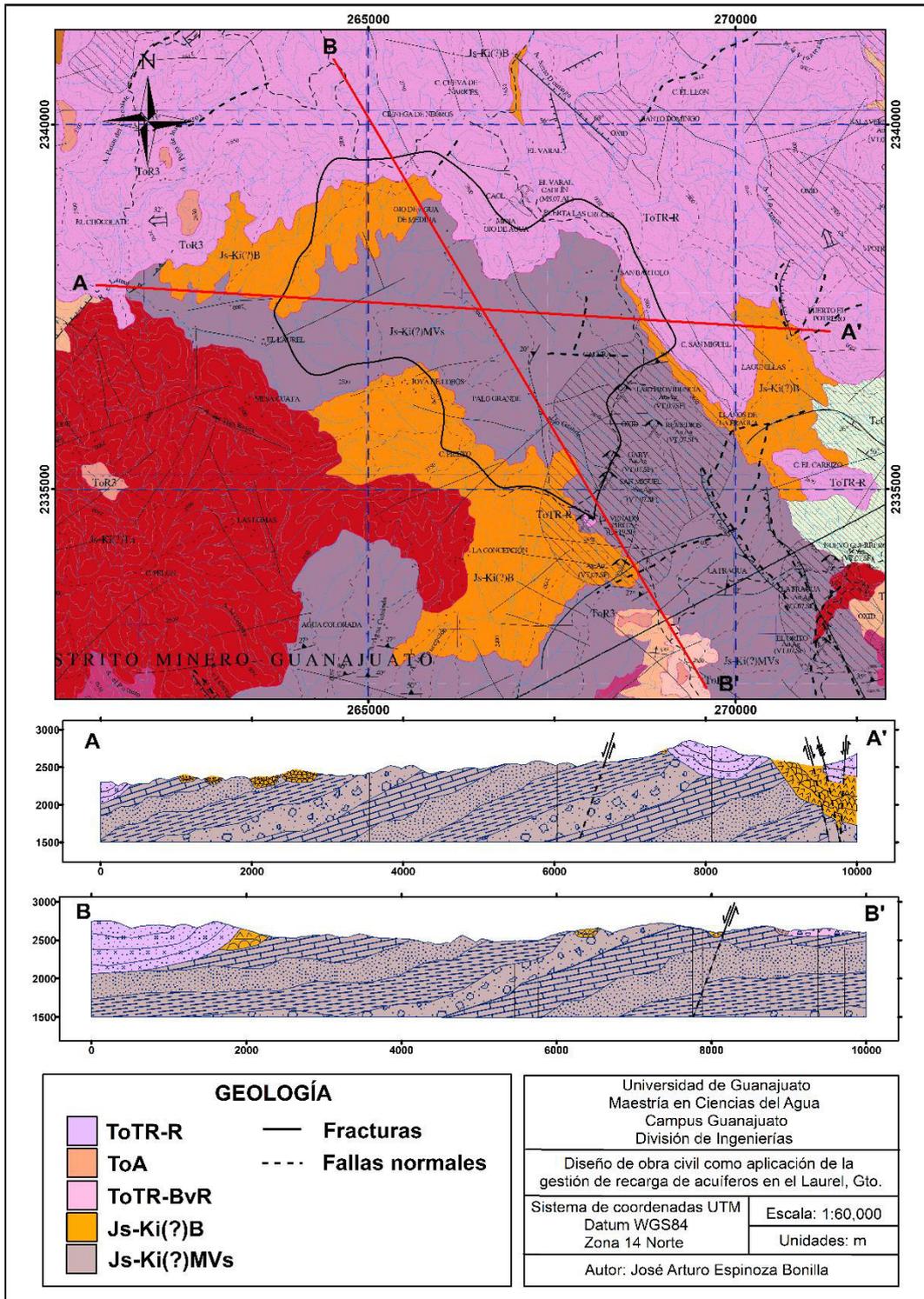


Figura 10. Perfiles geológicos del área de estudio. Elaboración propia (2021). Nota: Perfiles generados a partir de la interpretación de la carta Geológica-Minera GUANAJUATO F14-C43 Escala 1:50,000 publicada por el Servicio Geológico Mexicano y de las capas digitales de fallas y fracturas publicadas por el SIGMAOT.

En los perfiles se observa como aflora principalmente roca metavolcánica sedimentaria del periodo Cretácico inferior - Jurásico superior, presentando una intercalación deformada de calizas, areniscas, lutitas y conglomerados oligomícticos, unidad que supera en algunos sitios los 1000 m de espesor. Suprayaciendo a esta, se depositan flujos basálticos del mismo periodo cuyo espesor oscila entre los 150 y 250 m, alcanzando los 600 m cerca del extremo A' de la sección A-A', zona en la que se identifica también un importante sistema de fallas normales con orientación NW-SE y NE-SW que desplaza tanto a la roca metavolcánica sedimentaria y los afloramientos de basalto, como a los flujos de riolita y toba riolítica del Oligoceno, la cual muestra un espesor comprendido entre los 250 y 700 m. Finalmente en la sección B-B' se observan depósitos menores de andesita, toba riolítica y brecha riolítica también del Oligoceno, cuyos espesores no superan los 120 m. De manera generalizada, las unidades litológicas presentan fracturación que las dotan de una porosidad secundaria.

Tabla 1. Valores aproximados de los parámetros hidráulicos del acuífero ubicado en El Laurel, Gto. Elaboración propia (2020).

PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL ACUÍFERO EN EL LAUREL, GTO							
Afloramiento	Roca	Espesor medio(m)	fallamiento o fracturación	Porosidad total media (%)	Porosidad eficaz media (%)	Conductividad hidráulica (m/d)	T (m ² /día)
ToTR-R	Toba riolítica	180	Sí	30	5	0.1	18
	Riolita	180	Sí	2	0.5	0.1	18
ToA	Andesita	100	No	2	0.5	0.0000001	0.00001
	Toba riolítica	50	No	30	5	0.01	0.5
ToTR-BvR	Brecha riolítica	50	No	30	5	0.01	0.5
Js-Ki(?)B	Basalto	250	Sí	2	0.5	0.001	0.25
	Caliza	200	Sí	10	3	0.0001	0.02
Js-Ki(?)MV	Arenisca	200	Sí	15	10	0.001	0.2
	Lutita	200	Sí	10	3	0.0001	0.02
	Conglomerado	200	Sí	15	10	0.001	0.2
Transmisividad del acuífero (m ² /día)				37.49			
Coeficiente de almacenamiento				Poroso intergranular: 5 x 10 ⁻² Kárstico confinado: 5 x 10 ⁻⁵			
Tipo de acuífero				Semiconfinado - Confinado			
Calificación del acuífero para su explotación				Baja			
Posibilidades del acuífero				Entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión			

De acuerdo con los parámetros hidráulicos de los materiales y su disposición se identifica teóricamente un acuífero semiconfinado-confinado (tabla 1). Las capas de caliza y lutita conforman un acuífero kárstico confinado, mientras que la arenisca y el conglomerado, así como el basalto y la riolita fracturada, conforman un material poroso intergranular con una mayor conductividad hidráulica, presentando las características de un acuífero libre. Con una transmisividad aproximada de 37.49 m²/día para el acuífero, este es poco viable para la explotación de agua subterránea, pero no necesariamente así para la implementación de una obra de recarga hídrica gracias a los sistemas de fallas presentes en la zona.

2.2 Programa Nacional de Reservas de Agua

En la última década se han realizado esfuerzos conjuntos para establecer reservas de agua que aseguren la conservación de los principales ecosistemas de México, así como la disponibilidad del recurso para las generaciones presentes y futuras. Fruto de estos esfuerzos se podría mencionar el trabajo conjunto entre la Comisión Nacional del Agua y la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P (FGRA), la cual se concretó en el año 2010 con el objetivo de crear un Programa Nacional de Reservas de Agua que permitiera identificar aquellas cuencas hidrológicas del país con disponibilidad de agua y condiciones favorables para establecer reservas de agua, garantizando el abasto de agua para los mexicanos en los próximos 50 años, así como la preservación de los ecosistemas de diversas zonas del país.

Dicho proyecto se dividió fundamentalmente en tres etapas (CONAGUA - WWF, 2012): la primera consistió en la coalición entre la Comisión Nacional del Agua y la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P (FGRA) en el año 2010; posteriormente en el año 2011 se elaboró el Inventario Nacional de Reservas Potenciales de Agua, en donde se lograron identificar 19 cuencas con muy alta factibilidad para reservas de agua, 54 con alta factibilidad y 116 con una moderada factibilidad; 189 en total, mismas que serían el objetivo principal de un Programa Nacional de

Reservas de Agua. Finalmente, en el año 2012 se iniciaron los proyectos piloto, a través de la firma del convenio de financiamiento WWF-BID para realizar los estudios técnicos en las cuencas de los ríos Piaxtla 1 y 2 en Sinaloa, Purificación en Jalisco, Papaloapan, Grande, Tesechoacán, San Juan y Llanuras de Papaloapan en Oaxaca y Veracruz, San Pedro Mezquital en Durango y Nayarit, y Coyula en Oaxaca.

Según datos proporcionados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2018), para el año 2018, el volumen total de reserva de agua alcanzado para uso ambiental en el Programa Nacional de Reservas de Agua en México era de 47.5% del total de agua que escurre en todo el país, superando con esto en un 11.7% las recomendaciones internacionales, que establecen que bajo las condiciones geográficas de México, el porcentaje deseable por reservar debería ascender al 35.8%.

2.3 Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica

En la literatura es posible encontrar múltiples ejemplos de la aplicación de la evaluación espacial multicriterio para identificar zonas con alto potencial de recarga hídrica, en muchos casos con el objetivo principal de localizar sitios para la implementación de obras civiles de recarga. Por citar algunos ejemplos: en el trabajo *“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”* (Matus, 2007) se propone una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica la cual combina el conocimiento técnico-científico con el local y/o tradicional. En este trabajo se identifica y evalúa el potencial de recarga hídrica de una subcuenca a partir del análisis espacial de las características biofísicas que condicionan la recarga, como tipo y uso de suelo, tipo de roca, pendiente y cobertura vegetal. Años después dicha investigación sería publicada nuevamente a modo de guía técnica como *“Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua”* (Matus, Faustino, y Jiménez, 2009).

En el trabajo *“Determinación de las áreas principales de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Sibacá, Chinique, Quiché.”* (Noriega, 2005), el autor, utilizando un Sistema de Información Geográfica, logró identificar las zonas con alto potencial de recarga mediante la superposición de mapas temáticos de series de suelos, unidades geológicas y cobertura vegetal. Otro ejemplo sería el del trabajo *“Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos la Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra”* (Chamorro y Rosales, 2017) donde se aplicó la metodología propuesta por Matus (2007) para identificar cartográficamente utilizando un SIG y las herramientas de geoprocésamiento de álgebra de mapas las zonas con mayor potencial de recarga hídrica de los acuíferos en función de las variables de pendiente del terreno, geología, tipo de suelo, cobertura vegetal y uso de suelo.

A nivel nacional también se han implementado con éxito las técnicas de evaluación espacial multicriterio para la delimitación de zonas aptas para la recarga hídrica. En el artículo *“Identificación de áreas potenciales de recarga hídrica al acuífero Cuauhtémoc (Chihuahua), mediante una evaluación espacial multi-criterio”* (Bravo et al., 2015) se generó mediante SIG una zonificación de áreas potenciales de recarga a partir de la construcción, ponderación y superposición de capas como geología, densidad de fracturas y lineamientos, uso del suelo y cubierta vegetal, edafología y grado de desarrollo de la red superficial de drenaje en el área que alimenta al acuífero Cuauhtémoc, así mismo se discuten las ventajas del método para orientar los trabajos prospectivos en campo, y para definir las prioridades de regulación ambiental encaminadas a la protección de acuíferos.

Para la porción centro-sur de la Mesa Central de México se llevó a cabo el trabajo *“Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México”* (Peñuela y Carrillo, 2013), donde la metodología aplicada para el desarrollo

del trabajo se basó fundamentalmente en la Teoría de los Sistema de Flujo (TFA) propuestos por Tóth (2000), la cual ha demostrado ser una herramienta útil gracias a su visión sistemática del ambiente; en cuanto a las zonas de recarga y descarga, el trabajo se fundó en el análisis de mapas sobre el tipo de suelo, vegetación, elevación topográfica, dirección de flujo subterráneo y la presencia de manantiales y cuerpos naturales de agua. Dicho análisis se ejecutó mediante la herramienta de superposición de mapas en el SIG ArcMap.

De manera particular para el estado de Guanajuato, resulta relevante la tesis *“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 la autora identifica zonas potenciales de recarga hídrica a través de la aplicación de las metodologías propuestas por Matus (2007) y el Instituto Nacional de Bosques de Guatemala (INAB), las cuales se fundamentan en la evaluación multicriterio de parámetros físicos de la cuenca como edafología, geología, uso de suelo, pendiente y cobertura vegetal; y su ponderación y superposición mediante las tecnologías de los Sistemas de Información Geográfica.

2.4 Casos de éxito en el manejo de recarga de acuíferos

Comenzando con el hecho de que la gran mayoría de experiencias respecto a las tecnologías MAR se encuentran plasmadas en el idioma inglés, destaca el trabajo en español *“Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica”* (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017), el cual presenta no solo los conceptos fundamentales del manejo de recarga de acuíferos, sino también un extenso compendio de casos prácticos en la aplicación de las distintas técnicas de recarga. Se trata por lo tanto de un trabajo valioso para los profesionistas, técnicos, e interesados de Latinoamérica en la aplicación e implementación de tecnologías para una mejor gestión de los recursos hídricos.

A continuación, se presentan dos ejemplos de aplicación de las tecnologías de manejo de recarga de acuíferos descritos en dicho trabajo. Se consideró pertinente priorizar en aquellos instrumentados en regiones con similitud climática, geográfica o demográfica al área de estudio; omitiendo aquellos aplicados, por ejemplo, en zonas muy húmedas o con altas tasas de precipitación, o en zonas costeras, como sucede con las técnicas MAR encaminadas al control de la intrusión salina a cuerpos subterráneos de agua dulce.

2.4.1 Manejo de recarga de acuíferos en los Ojos del Chuvíscar, Chihuahua, México.

Se trata de un proyecto de Silva. H, González. M, Pinales. A y Villalobos. A; y presentado por Escolero, Gutiérrez, y Mendoza (2017). Como breve antecedente, en el estado de Chihuahua, la posibilidad de implementar un proyecto de manejo de recarga de acuíferos en Ojos de Chuvíscar surge a mediados de los años noventa ante la preocupación derivada de los resultados de diversos estudios hidrogeológicos realizados en el estado, los cuales demostraban niveles de aprovechamiento de agua subterránea superiores a las estimaciones de recarga. Debido a esto se consideró pertinente la implementación de las técnicas MAR como una alternativa de solución, o al menos de mitigación en el abatimiento de los niveles freáticos en algunos de los acuíferos del estado.

Se definió que el origen del agua de recarga serían los escurrimientos torrenciales derivados de tormentas de gran intensidad, las cuales generan flujos importantes durante periodos de tiempo relativamente cortos (fenómeno común en zonas áridas). De los sitios potenciales para la implementación de la obra de recarga se eligió la zona de los Ojos de Chuvíscar, ubicada en la cuenca alta de la presa Chihuahua, ya que en esta zona existe una batería de pozos que abastecen de agua potable de buena calidad a la ciudad de Chihuahua, y la zona presenta condiciones naturales favorables para la recarga, así como un grado de alteración mínimo. Durante la labor de caracterización del sitio se determinó una

precipitación mensual para la zona de 416 mm y una evapotranspiración potencial del orden de 2203 mm/año; el suelo se caracterizó como poco desarrollado con espesores delgados de litosol y feozem háplico, hecho que disminuye la producción de materiales finos y favorece las propiedades hidráulicas del suelo, la geología en la zona se juzgó compleja, con presencia de rocas sedimentarias como calizas, lutitas y areniscas, así como rocas ígneas extrusivas, como tobas y andesitas, las cuales sufrieron intensa fracturación y fallamiento, determinando condiciones hidráulicas favorables debido a la porosidad secundaria de las rocas y a los canales de flujo de los sistemas de fallas y fracturas.

Como obra se optó por construir un sistema consistente en una cortina filtrante de 2 m de altura y 26 m de longitud empotrada en el lecho del río Chuvíscar, formada con un muro de gaviones en un sitio en el que aflora roca fracturada (figura 11). Aguas arriba de la cortina se colocó una tubería ranurada y material filtrante arropándola, a manera de galería filtrante, que se conecta a una tubería de polietileno de alta densidad (PAD) de 10 pulgadas de diámetro, ubicada en la margen izquierda del cauce y que conduce el agua al pozo de infiltración o de recarga, por último se instaló un sistema de medición de caudal instantáneo, un totalizador volumétrico y un sistema de cloración con pastillas de hipoclorito de calcio en la descarga del pozo de descarga; para su limpieza y mantenimiento se instaló una tubería de desfogue entre la cortina y el medidor de flujo. El costo total del proyecto fue de \$450,000 (cuatrocientos cincuenta mil pesos 00/100 M.N.), financiado por la Junta Central de Agua y Saneamiento, y la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua, además de contar con la donación de material por parte de la SEMARNAT. En el año 2017 tras 12 años ininterrumpidos de operación fue posible la estabilización del volumen de agua extraído anualmente sin mayores abatimientos en los pozos; por lo que este representa un caso exitoso gracias a la llaneza del esquema empleado y sus bajos costos de construcción y operación.



Figura 11. Sistema de recarga de acuíferos en el río Chuvíscar, Chihuahua. Recuperado de Escolero, Gutiérrez, y Mendoza (2017).

2.4.2 Evaluación de obras de recarga hídrica construidas por comunidades autóctonas en la subcuenca del Valle de Ocotlán, Oaxaca, México

Se trata de un proyecto elaborado por Ojeda. E, Belmonte. S y Ladrón de Guevara. M; y presentado por Escolero, Gutiérrez, y Mendoza (2017), cuyo objetivo fue evaluar la efectividad de un cuantioso número de pequeñas obras de recarga hídrica construidas en el Valle de Ocotlán, Oaxaca, donde un grupo de 16 comunidades de pueblos autóctonos se unieron para construir obras que ayudarán a la recarga del acuífero; mismas que en su debido momento, no contaron con ningún tipo de asesoría técnica o científica.

Las comunidades contabilizaron más de 600 obras de recarga, donde el 98% son pozos de absorción y el restante ollas captadoras de agua y pequeñas presas (figura 12). Se observaron tres diferentes pozos de absorción, el primero corresponde a pozos circulares de 1 m de diámetro y 2 m de profundidad construidos a la orilla de caminos y parcelas para captar el agua de escorrentía superficial, el cual cuenta con una reja para impedir el paso de basura sin material filtrante en su interior; el otro tipo son pozos circulares para captar el agua proveniente de techos de invernaderos, conectados a los pozos de extracción mediante un tubo PVC de 6 pulgadas de diámetro, y el tercer tipo de pozos están construidos de tabiques, los

cuales tienen un pequeño desarenador sin medio filtrante en su base, utilizados también para captar la escorrentía superficial.

Otras obras encontradas fueron pequeñas presas sobre ríos y arroyos (conocidas en las comunidades como retenes), y, por último; las ollas captadoras de lluvia las cuales tienen dimensiones de 20 x 30 x 2 m de profundidad, y otras más pequeñas sobre pendientes para aprovechar la escorrentía con dimensiones de 2 x 3 x 2 m de profundidad. Los materiales y equipos de construcción (retroexcavadoras) fueron aportados por las presidencias municipales de cada una de las comunidades, y la fuerza de trabajo (mano de obra), por cada comunidad. Los costos de construcción estimados para cada tipo de obra fueron de USD 515.80 para cada pozo de absorción circular, USD 1,564.00 para cada pozo cuadrado construido con tabiques, USD 7,800.00 para las ollas captadoras de lluvia más grandes, USD 360.00 para las ollas pequeñas, y USD 5,937.60 para cada presa construida sobre ríos y arroyos. El 48% del costo fue cubierto por las comunidades y el resto por apoyos del gobierno.



Figura 12. Obras de recarga hídrica construidas por comunidades autóctonas en la subcuenca del Valle de Ocotlán, Oaxaca, México. Recuperado de Escolero, Gutiérrez, y

Mendoza (2017). De izquierda a derecha: pozos circulares de adsorción, pozos de tabiques, pequeñas presas y ollas captadoras de lluvia.

Una vez identificada la ubicación de las obras de recarga se analizó la geología sobre las que se habían construido, tipo y uso de suelo, red hídrica y direcciones de flujo subterráneo para determinar la eficiencia de cada obra de recarga y estimar su aporte anual al acuífero. Mediante pruebas de infiltración y permeabilidad con un infiltrómetro simple, se encontró que los primeros 0.5 m están constituidos por una arcilla altamente plástica, suprayaciendo un estrato de arenas con una permeabilidad alta.

Para conocer la calidad hídrica del agua de los pozos de extracción se emprendió la toma de muestras para su análisis fisicoquímico, mismos que continuaban en proceso para el momento de la publicación del artículo; como alternativa se retomó el análisis de calidad hídrico elaborado por INEGI en el año 2012, el cual muestra altas concentraciones de nitratos. Para el análisis piezométrico se seleccionaron 84 pozos de extracción en donde se midieron sus niveles freáticos mediante una sonda eléctrica y sus elevaciones piezométricas con ayuda de un GPS; la caracterización litológica y del acuífero se hizo mediante 19 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), construyendo 5 perfiles que permitieron identificar un acuífero somero con estratos heterogéneos de conglomerado y depósitos de limos y arcillas; y por último para conocer la recarga potencial en la cuenca se estimó el balance hídrico tomando en cuenta información espacial como evapotranspiración, escorrentía e infiltración.

Después del análisis se concluyó que las obras construidas sobre áreas con mayores conductividades hidráulicas son las que tienen un mayor potencial de recarga que las que están sobre roca ígnea o metamórfica. Respecto a los volúmenes de recarga, estos son difíciles de cuantificar ya que los niveles freáticos medidos a la fecha (3 años) no permiten apreciar un comportamiento que se pueda atribuir a las obras de recarga, no obstante, las ollas de captación son las que mayor volumen aportarían a la recarga del acuífero según el balance hídrico de la cuenca; debe notarse

que estas deberán de estar protegidas por vegetación para no tener grandes pérdidas por evaporación.

Si bien el volumen de agua que aportan las obras para la recarga del acuífero es mínimo en comparación con el volumen de extracción concesionado por parte de la CONAGUA a las comunidades de estudio, la impresión local de una mayor disponibilidad de agua en temporadas de sequía ha motivado la construcción de más obras de recarga por parte de los habitantes y las autoridades, así como la adopción de medidas para el buen uso y la protección del recurso hídrico.

Otro trabajo que destacar es el libro *“Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en Zonas Semiáridas”* (Gale, 2005), documento elaborado bajo la colaboración de la Comisión en Gestión de Recarga de Acuíferos de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos, y el proyecto del Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO sobre Recarga Artificial y Gestión de Recursos Hídricos en Zonas Áridas y de Escasez de Agua (UNESCO-G-WADI). En él se exponen conceptos fundamentales sobre la gestión de recarga de acuíferos, así como consideraciones al evaluar un sitio para la implementación de las técnicas de recarga, como la calidad del agua de recarga o aspectos institucionales y de gestión; resultan útiles también los ejemplos de aplicación que se brindan sobre la gestión de recarga de acuíferos en algunas zonas áridas de India (tal es el caso de los Johad en Rajasthan, India, descritos en el capítulo 1.2), Irán, Australia, África y México.

2.4.3 Propuestas de obras de recarga hídrica para zonas cercanas a la comunidad El Laurel

Para el área de estudio se podría citar nuevamente el trabajo de Ramos (2018) que, estimando una aptitud de recarga moderada para el área comprendida entre la comunidad de el Terrero y El Laurel, considera viable la implementación de jagüeyes en la primer comunidad y anillos de captación de cerros o presas de gaviones en la segunda. Por su parte en la tesis *“Propuesta de obras civiles para la recarga hídrica natural por lluvia*

en la comunidad El Laurel, Guanajuato, México” (Espinoza, 2019) se determina que las tinas ciegas, zanja-bordo para retención de humedad, terrazas de bancos alternos, terrazas de base angosta y terrazas individuales, son obras de recarga aptas para su implementación en las inmediaciones de la comunidad El Laurel, pudiendo ser particularmente útiles las terrazas individuales; tanto por su rendimiento y sencillez de instrumentación, como por los beneficios que podría representar ante la posibilidad de plantar vegetación endémica aprovechando la humedad retenida. Por último, habría de mencionar las estructuras de control de pérdida de suelo construidas de manera aislada y rudimentaria por los pobladores de las comunidades de la zona (figura 13), las cuales han sido implementadas con el objetivo de reducir la velocidad de escorrentía y con ello la pérdida de suelo y cobertura vegetal, demostrando así su interés en tomar acciones ambientales para mitigar el deterioro ambiental de la cuenca.



Figura 13. Pequeñas represas construidas con neumáticos para disminuir la velocidad de escorrentía y mitigar la erosión hídrica en la microcuenca “El Laurel”. Autoría propia (2021).

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

El agua representa para el ser humano y el medio ambiente el recurso natural más importante y único de todos, es también el más abundante en la naturaleza y determinante en los procesos biológicos y químicos que rigen a nuestro planeta, permitiendo así el desarrollo y existencia tanto de los humanos como de los seres vivos en su diversidad de especies animales y vegetales en relación con el medio ambiente. El agua además supone un activo económico fundamental al permitir el desarrollo humano, siendo utilizada en prácticamente todas las actividades que el hombre realiza para satisfacer sus necesidades básicas y económicas.

Si bien se trata del recurso natural más abundante en el planeta, poco menos del 3% es agua dulce apta para el consumo humano, además, de este porcentaje la mayor parte se encuentra permanentemente congelada en los casquetes polares haciendo inviable su acceso y utilización. Si esto supone ya un dato inquietante, habría de considerar también el impacto hídrico que propicia el crecimiento poblacional a nivel mundial, el cual se espera que pase de los 7,700 millones de habitantes actuales a los 9,700 millones en el año 2050 (Naciones Unidas, 2019). El aumento en la demanda de agua, su mala gestión, la contaminación antropogénica por la intensa actividad industrial, así como la escasa conciencia ambiental que aún perdura en un sector importante de la población han sometido de manera negativa las reservas hídricas para presentes y futuras generaciones. Entender la ocurrencia, distribución y movimiento del agua en nuestro planeta, así como las tecnologías que permitan captar, almacenar y administrar el agua, suponen un punto de partida fundamental para su protección.

3.1 El agua en el planeta Tierra

El volumen total de agua en nuestro planeta se ha estimado en 1,358 millones de km² (Guerrero, 2006), si bien esta es una cantidad en apariencia inagotable, el 97% se trata de agua salobre almacenada en los

mares y océanos no apta por el consumo humano debido a su alta concentración en sales minerales. Del 3% que corresponde al agua dulce que podría ser empleada para su consumo o sus aplicaciones industriales más del 76% se encuentra congelada en las capas de hielo de los polos terrestres haciendo prácticamente imposible su utilización, el 22% se encuentra en la corteza terrestre como agua subterránea, en algunos sitios hasta los 5 km de profundidad y el porcentaje restante se encuentra disponible como agua dulce en glaciares, lagos, ríos, humedales y vapor atmosférico (tabla 2).

Tabla 2. Distribución del agua en la Tierra. Recuperado de Guerrero (2006).

DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LA TIERRA		
Fuente	Volumen (km ³)	Porcentaje (%)
Océanos	1,320,500,000	97.22
Capas de hielo	29,000,000	2.13
Agua subterránea	8,300,000	0.611
Glaciares	210,000	0.015
Lagos de agua dulce	125,000	0.009
Mares internos (salados)	104,000	0.008
Humedad de la tierra	67,000	0.005
Atmósfera	13,000	0.001
Ríos	1,250	0.0001
Total	1,358,320,250	100

Las propiedades físicas y químicas del agua hacen de ella un elemento dinámico. A diferencia de otros recursos naturales los cuales suelen establecerse en un lugar de la corteza por mucho tiempo, el agua por el contrario puede cambiar su ubicación en un breve periodo. Es por ello por lo que los volúmenes citados deben cumplir únicamente el propósito de brindar una idea de la magnitud del recurso, teniendo siempre presente que dichos valores no son absolutos.

3.2 El ciclo hidrológico

Se podría definir como la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y reevaporación (Campos, 1998).

El mismo autor describe como el ciclo hidrológico involucra por lo tanto un proceso de transporte recirculatorio y permanente (se debe de descartar la idea de que el agua se mueve a velocidad constante entre las distintas esferas terrestres, pues el movimiento entre cada fase del ciclo es más bien errante tanto temporal como espacialmente), este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que ocasiona que el agua condensada descienda como precipitación y posteriormente escurrimiento.

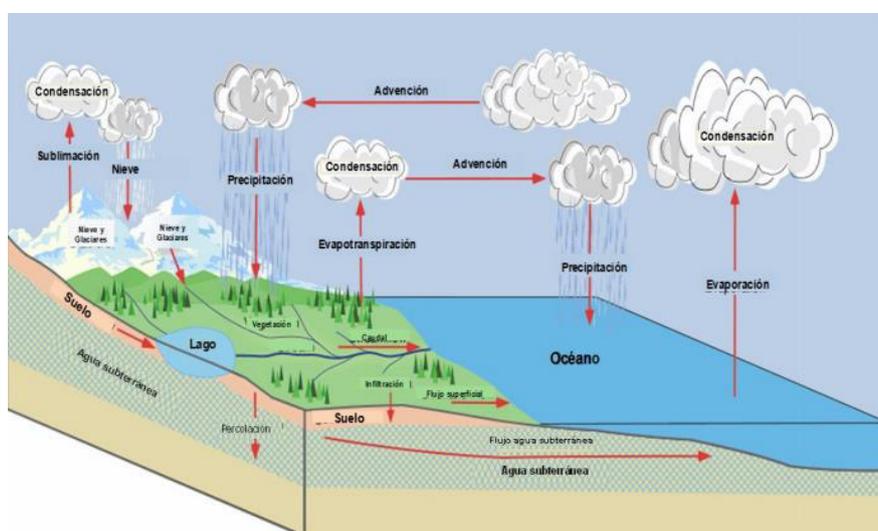


Figura 14. Representación del ciclo hidrológico. Recuperado de Ordoñez (2011).

3.2.1 Componentes del ciclo hidrológico

Se partirá ahora de la precipitación o caída de lluvia para comenzar a describir las distintas fases que componen el ciclo hidrológico, siguiendo el orden propuesto por Córdova et al. (2015).

Se conoce como precipitación al proceso mediante el cual el agua, que previamente fue incorporada a la troposfera en forma de vapor, es saturada y condensada mediante procesos termodinámicos como presión de vapor de agua o turbulencia (Ordoñez, 2011) volviendo a la superficie terrestre ya sea en su fase líquida o sólida, en forma de llovizna, lluvia, nieve, aguanieve

o granizo. Si bien la cantidad de agua contenida en la atmósfera es relativamente pequeña (un cien milésimo de toda el agua implicada en el ciclo hidrológico) su naturaleza aleatoria la dota de enorme significancia en los procesos hidrológicos, siendo además en muchas ocasiones la principal fuente de humedad en el suelo.

Una vez que ha ocurrido la precipitación el primer fenómeno que podríamos considerar es la evaporación, este se trata del cambio físico del agua, desde una fase líquida a una fase gaseosa. Aproximadamente el 80 % del agua evaporada total proviene de los océanos, mientras que el 20 % restante lo hace del agua de las regiones continentales y de la transpiración de la vegetación (Vera y Camilloni, 2007). Por lo tanto, la evaporación puede ocurrir desde diferentes tipos de superficies, tales como lagos, ríos, humedales, áreas impermeables, suelos y follaje vegetal. Cuando la precipitación queda retenida en áreas impermeables o densamente cubiertas por follaje vegetal se le denomina intercepción, cabe decir que durante eventos breves de lluvia sobre ciudades o zonas boscosas este fenómeno puede devolver gran parte del agua precipitada a la atmósfera en forma de vapor sin haber tocado siquiera el suelo (Espinoza, 2019). La tasa de evaporación aumentará a medida que el ambiente es más caliente (Córdova et al., 2015).

Cuando el agua de precipitación ha llegado al suelo y es absorbida por las plantas ocurrirá posteriormente el proceso de transpiración, que consiste en la evaporación del agua contenida en el tejido de las plantas y su regreso a la atmósfera. Resulta importante mencionar que ante la dificultad de diferenciar en la práctica el proceso de evaporación y transpiración debido a que ocurren de manera simultánea, se ha optado en la literatura por definir al proceso de evapotranspiración como la combinación de ambos (figura 15). Se pueden diferenciar dos tasas de evapotranspiración de acuerdo con Sánchez (2017), la evapotranspiración potencial (ETp) la cual por lo general estará en función de la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del viento y el tipo de vegetación; y la evapotranspiración real (ETr) la cual representa la tasa real

de pérdida de agua a través del follaje. La ETr estará en función de la ETp y de la disponibilidad de agua en el suelo. Si existe suficiente agua almacenada en el suelo, la planta podrá evapotranspirar según su tasa potencial, por el contrario, si no existe agua suficiente en el suelo, la evapotranspiración real de la planta será inferior a la tasa potencial.



Figura 15. Proceso de evapotranspiración. Recuperado de la Agência Estatal de Meteorología, Gobierno de España (2020).

Cuando el agua ingresa y “empapa” el suelo se dice que se ha producido infiltración. Esta depende de múltiples factores como la tasa de precipitación, la textura y estructura del suelo o la cobertura vegetal. En general se tendrá una mayor capacidad de infiltración en suelos arenosos o poco compactos, así como en zonas con abundantes pastos. Un factor determinante en la capacidad de infiltración será el porcentaje de humedad contenida en el suelo, pues en general esta capacidad disminuye con el tiempo a medida que el espacio poroso del suelo se va llenando de agua. Por lo tanto, cabría esperar una menor tasa de infiltración en un suelo húmedo que en uno seco. El agua infiltrada puede a su vez ser evaporada desde el suelo húmedo, sin relación con la vegetación; puede ser absorbida por las raíces de las plantas y posteriormente evapotranspirada; puede generar escorrentía subsuperficial tras un corto recorrido lateral incorporándose al nivel freático; o puede continuar su descenso vertical

aportando agua a las raíces de las plantas “freatofitas” hasta finalmente dar lugar a la escorrentía subterránea (Sánchez, 2017).

En algunos casos la precipitación no es interceptada por el follaje y logra llegar al suelo, en donde no es completamente infiltrada, retenida o evaporada, permitiendo su movimiento como flujo o escurrimiento superficial. Así, el agua comienza a correr sobre el suelo, siguiendo la pendiente de este hasta que pasara a formar parte de un cauce de agua mayor como ríos o riachuelos, los cuales pertenecen a la red de drenaje de la cuenca desembocando eventualmente en el mar. Como sucede en todas las partes del ciclo del agua, la relación entre precipitación y escorrentía superficial varía de acuerdo con el tiempo y la geografía (United States Geological Survey, 2020).

Una vez que el suelo alcanza un grado de saturación en donde las fuerzas adhesivas y cohesivas entre las moléculas de agua y las partículas minerales que conforman el suelo son inferiores a la fuerza de gravedad, comenzará el proceso denominado percolación o drenaje del agua hacia la zona del acuífero. En este punto podrían ocurrir dos escenarios, el primero de ellos es la formación de flujo subsuperficial que es el movimiento horizontal a través de la zona no saturada, es común que este flujo en conjunto con el flujo base aflore en los puntos de descarga conocidos como manantiales. En el segundo escenario se dice que existe recarga al acuífero o recarga subterránea, esto es cuando el agua percola por gravedad el subsuelo a través de la zona no saturada hasta llegar al medio saturado o acuífero. El límite entre la zona saturada y no saturada o de aireación se le denomina nivel freático (Duque, 2017). Dentro de la zona saturada puede ocurrir el flujo subterráneo, que es el movimiento horizontal del flujo base. El flujo de agua subterránea o flujo base es aquel que aporta agua a un río o riachuelo al entrar en contacto con el nivel de agua que transporta la red de drenaje, permitiendo así que exista un caudal superficial aun en temporada de estiaje. Finalmente, la escorrentía total (figura 16) que eventualmente será descargada en océanos o lagos para reiniciar el ciclo hidrológico mediante la evaporación del agua a la

atmósfera se compone de la suma de la escorrentía superficial, el flujo subsuperficial y el flujo subterráneo o caudal base.

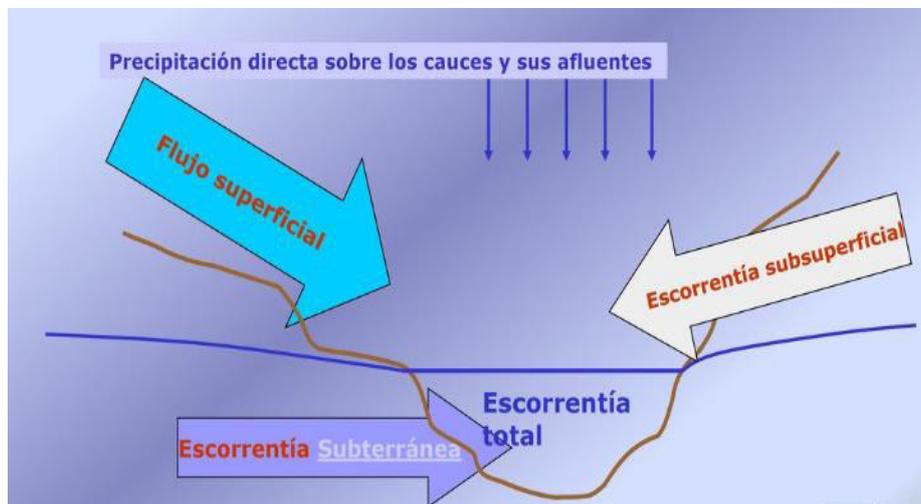


Figura 16. Clasificación de la escorrentía. Recuperado de Sáez (2018).

3.3 Interacción entre las aguas superficiales y subterráneas con la corteza terrestre

En la instrumentación de cualquier proyecto hidráulico que busque la contención y recarga de un determinado volumen de agua al subsuelo resulta necesario comprender en una primera instancia los distintos componentes que forman parte del ciclo hidrológico y en seguida se requiere profundizar en la ocurrencia y movimiento del agua sobre la corteza terrestre como escorrentía superficial; y dentro de ella, como flujo subsuperficial y flujo base.

3.3.1 Cuenca hidrográfica e hidrológica

Si bien el término cuenca es utilizado con frecuencia, el intentar diferenciar el concepto de cuenca hidrográfica e hidrológica puede generar cierta confusión en la población general. Las cuencas hidrográficas (figura 17) son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos de los ríos y arroyos que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca. En una cuenca hidrográfica existe una interrelación e interdependencia espacial y temporal entre el medio

biofísico, es decir, el suelo, los ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica; los modos de apropiación, como serían la tecnología y/o mercados; y las instituciones, con su respectiva cultura, organizaciones sociales, reglas y leyes (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013).

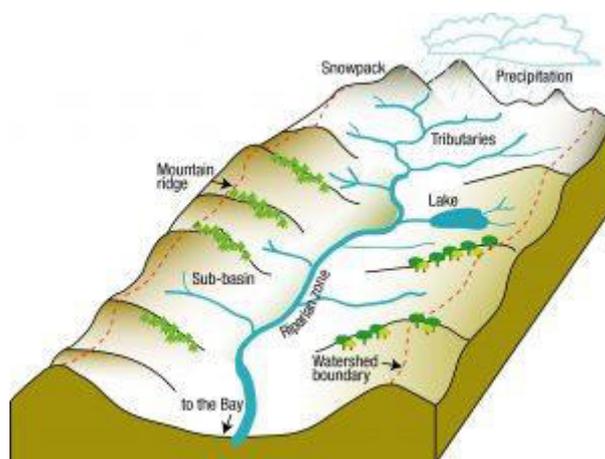


Figura 17. Cuenca hidrográfica ideal. Recuperado de The watershed project (2020).

Por otro lado, una cuenca hidrológica se suele entender como una unidad para la gestión que se realiza dentro de la cuenca (Carabias y Landa, 2005), por lo tanto, se podría considerar a las cuencas hidrológicas como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos (SEMARNAT, 2018). Jerárquicamente, una región hidrológica se encuentra conformada por una o varias cuencas hidrográficas, mismas que se encuentran conformadas por subcuencas y estas a su vez por microcuencas, cuyas salidas secundarias llegan al cauce principal de salida o a un punto determinado de la cuenca (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019).

De acuerdo con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (2010) es posible identificar seis componentes fundamentales dentro de un sistema de cuenca, el primero de ellos es la precipitación, pues esta representa unos de los principales aportes hídricos a la cuenca, además de cobrar enorme relevancia en la ejecución de proyectos de recarga hídrica; la intensidad, duración y movimiento de la célula de precipitación sobre la cuenca será un parámetro determinante en su dinámica. El siguiente

componente sería la línea divisoria de aguas o límite de cuenca, la cual corresponde a la zona topográfica más alta, determinando así el límite entre cuencas adyacentes, cuya área de captación corresponde a toda la superficie de la cuenca dentro de la línea divisoria de aguas; la red de drenaje ocurriría otro de los componentes, este incluye al cuerpo de agua principal y sus tributarios, cumpliendo la función de sistema de drenaje, colectando y drenando agua; el componente acuífero corresponde al agua almacenada en el suelo profundo y unidades rocosas, el agua subterránea es la que permite el flujo superficial a través de la red de drenaje en cualquier época del año (ríos perennes), y el último componente sería el punto de desfogue, el cual es el punto más bajo de la cuenca, es el sitio donde el volumen de agua captado es descargado en otro cuerpo como un río, lago u océano.

A partir del mencionado punto de desfogue se pueden clasificar fundamentalmente tres tipos de cuencas: Las cuencas endorreicas son aquellas en las que el punto de salida o desfogue de agua se encuentra dentro de los propios límites de la cuenca generando así un lago, tal es el caso del Lago de Texcoco en México, el Gran Lago Salado en Utah, Estados Unidos, o el Mar Caspio, el cual su superficie de 371,000 km² (Szalay, 2017) lo convierten en el lago endorreico más grande del mundo. Las cuencas exorreicas son cuencas de circulación abierta, es decir que su punto de desfogue se encuentra en los límites de la cuenca descargando el agua en otros ríos o el mar, un par de ejemplos son la Cuenca de la Plata en Argentina cuyos escurrimientos vierten en el Océano Atlántico, y la Cuenca del Misisipi en Estados Unidos, la cual desemboca en el Golfo de México. Finalmente, las cuencas arreicas son aquellas en las que el agua se evapora o se infiltra en el terreno antes de descargar en un cuerpo de agua o de encauzarse en una red de drenaje, Se trata de cuencas menos comunes que las endorreicas y exorreicas, a modo de ejemplo se podrían citar los arroyos y escorrentías del Sáhara y otras zonas desérticas. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2019) considera también las denominadas cuencas criptorreicas, las cuales fluyen

subterráneamente, como sucede en la península de Yucatán, lugar donde suelos con cal permiten una infiltración casi inmediata de la lluvia y la formación de corrientes subterráneas.

3.3.2 Características físicas de una cuenca y sus procesos de escorrentía

Los parámetros físicos que intervienen en una cuenca describen la forma en que se encuentran conectados los canales dentro de ella y como esto influye en la respuesta de esta ante un evento de precipitación y su subsecuente descarga. El Departamento de Peces y Vida Silvestre en Cuencas Hidrográficas de Oregon (Oregon Department of Fish & Wildlife, 1999) propone los siguientes parámetros físicos: área, forma y pendiente de la cuenca, orientación, patrón y orden de drenaje, y tipo de flujo.

El área de la cuenca afectará de manera directa en la cantidad de agua que va a drenar a través de sus ríos y arroyos, por lo general si se consideran dos cuencas de diferente tamaño sometidas a un evento de precipitación igual y uniforme, cabría esperar un mayor volumen de escorrentía sobre la cuenca de mayor tamaño, esto quiere decir que en igualdad de circunstancias un área de drenaje del triple de tamaño puede generar tres veces el volumen de escorrentía que una cuenca de menor extensión. Sin embargo, podría ocurrir que una cuenca de menor tamaño ubicada en una zona húmeda presente un escurrimiento más abundante en comparación con una cuenca más grande ubicada en una región con clima árido, esto es ocasionado por la saturación hídrica de los poros del suelo, lo que provoca menor capacidad de infiltración y, por lo tanto, un mayor volumen de escorrentía superficial. Como en la mayoría de los casos, sobre todo en cuencas extensas, las tormentas sólo cubren parte de una cuenca, lo común es que el volumen de escorrentía no está determinado por el tamaño total de la cuenca, sino por el área de aporte, es decir la parte de la cuenca que ha sido afectada por la tormenta.

La forma y pendiente de la cuenca, así como su patrón de drenaje tienen una alta influencia en el proceso de escorrentía e infiltración. En una cuenca

ancha y corta, el tiempo de concentración; que es el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, y está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado (Ibañez, Moreno, y Gisbert, 2011), es menor que en una cuenca con forma estrecha y larga (Figura 18). Si bien en la literatura se encuentran numerosas expresiones para determinar el tiempo de concentración de las cuencas hidrográficas, como las propuestas por Bransby-Williams (Wanielista, Kerster, y Eaglin, 1977), Johnstone y Cross (1949) o Izzard (1946), aquí se retomará para fines prácticos la propuesta por Témez (1991), ya que resulta válida para cuencas desde 1 km² hasta 3,000 km² y con tiempos de concentración desde los 15 minutos hasta las 24 horas (Núñez, 2020). La ecuación de Témez es la siguiente:

$$T_c = 0.3 \left[\frac{L}{J^{\frac{1}{4}}} \right]^{0.76}$$

Ec. 1. Tiempo de concentración en una cuenca. Recuperado de Témez (1991).

Donde:

T_c: Tiempo de concentración (horas).

J: Pendiente media del cauce principal (%). Diferencia de nivel entre el punto de desfogue y el punto hidrológicamente más alejado (m) / Longitud del cauce principal (m)

L: Longitud del cauce principal (km)

Factores como la presencia de meandros o la rugosidad de la cuenca condicionada por la presencia de piedras, vegetación o escombros también pueden modificar de manera directa la velocidad con que el agua se desplaza por los canales y la altura del nivel máximo, esto quiere decir que una cuenca sinuosa y rugosa menor será la velocidad de escorrentía.

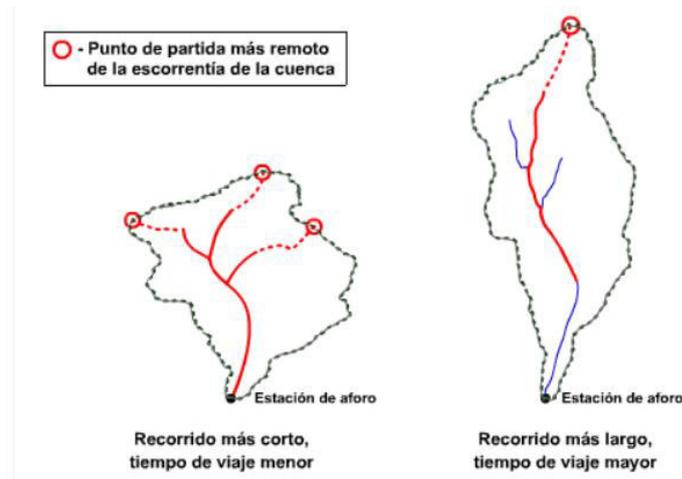


Figura 18. Efecto de la forma de la cuenca en la escorrentía. Recuperado de MetEd (2011).

Una pendiente mayor de la cuenca ocasionaría a su vez una mayor velocidad de escorrentía superficial, provocando la erosión del suelo y representando una posible amenaza a las obras de recarga que puedan encontrarse en la cuenca; además de que en las pendientes pronunciadas se dificulta la proliferación de la cobertura vegetal, así como la capacidad de infiltración hídrica.

La orientación de la cuenca en relación con las tormentas que se desplazan sobre ella también juega un papel muy importante afectando la escorrentía y los caudales máximos, si se considera una célula de precipitación ubicada en la parte alta de la cuenca y una célula de precipitación con igualdad de circunstancias ubicada muy cerca del punto de desfogue, esperaríamos que una estación de aforo localizada en la parte baja de la cuenca registrara una escorrentía más rápida y abundante ante el segundo escenario, siendo sin embargo el mismo volumen de agua descargado en ambos. La orientación de una cuenca en relación con la posición del sol afecta la temperatura, evaporación y transpiración (ODFW, 1999). En terrenos escarpados con muchas horas de incidencia solar, la pérdida de humedad del suelo por evaporación y transpiración será rápida, por el contrario, en terrenos con poca incidencia de luz solar la pérdida de humedad será notablemente menor.

Finalmente habría que considerar el patrón de drenaje de la cuenca, ya que este presenta para el investigador, un primer indicio sobre la evolución reciente de la cuenca y los factores que han influido en su desarrollo, además de jugar un papel fundamental en el proceso de escorrentía dentro de ella. Un sistema de drenaje está formado por corrientes, ríos y lagos dentro de una cuenca, en donde todos ellos se conectan para formar una red de drenaje (Zhang y Guilbert, 2012), a la configuración que presentan los arreglos de cuerpos de agua tributarios dentro de una red de drenaje se le denomina patrón del sistema drenaje o patrón de drenaje (Argialas, Lyon, y Mintzer, 1988). Los patrones de drenaje están íntimamente relacionados con la geología de la cuenca, por lo que son utilizados para identificar fallas e interpretar estructuras, sin embargo, su configuración resulta también de otros factores como la topografía, porosidad, permeabilidad y composición química del suelo y roca. Si bien se han discutido más de 30 configuraciones de patrones de drenaje (Argialas, Lyon, y Mintzer, 1988) aquí se retomarán las descripciones de ocho patrones “básicos” propuestos por Parvis (1950) y Howard (1967) los cuales son comunes de encontrar y cuyas características pueden ser identificadas rápidamente por la mayoría de los foto interpretores (figura 19).

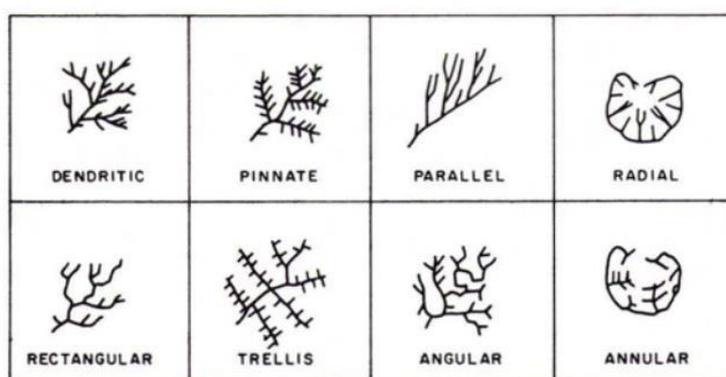


Figura 19. Patrones de drenaje. Recuperado de Argialas, Lyon, y Mintzer (1988).

El patrón dendrítico (dendritic pattern) presenta un sistema de ramificación en forma de árbol donde los afluentes se unen en un ángulo agudo a una corriente principal suavemente curvada; el patrón pinnado (pinnate pattern) es muy parecido al dendrítico con la diferencia de que sus afluentes

secundarios están espaciados de manera uniforme, estrecha y paralela; el patrón paralelo (parallel pattern) tiene afluentes que fluyen casi de manera paralela entre ellos; el patrón radial está formado por corrientes que irradian desde un área central como si fueran los radios de una rueda de bicicleta; el patrón rectangular tiene curvas de ángulo recto distinguibles en tanto la corriente principal como en sus afluentes. El patrón de drenaje enrejado (trellis pattern) contiene afluentes primarios largos, rectos y paralelos entre sí, que son a su vez perpendiculares a la corriente principal, sus afluentes secundarios son numerosos, cortos, perpendiculares a los primarios, paralelos a la corriente principal, y esencialmente del mismo tamaño; el patrón angular consiste en una combinación de ángulos agudos, rectos y obtusos entre los afluentes: y por último el patrón anular (annular pattern) tiene corrientes circulares y algunas corrientes radiales.

Una forma de jerarquizar u obtener una medida de la ramificación y grado de desarrollo del cauce principal es a partir del establecimiento del número de orden de cauce, dicho orden se relaciona con el caudal relativo del segmento de un canal. Existen múltiples sistemas de jerarquización de drenajes (figura 20), siendo los más utilizados los propuestos por Horton (1945) y Strahler (1957). El primer sistema lo propone Horton en el año 1945 al dar un método para la clasificación de los segmentos de canal en órdenes, 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.

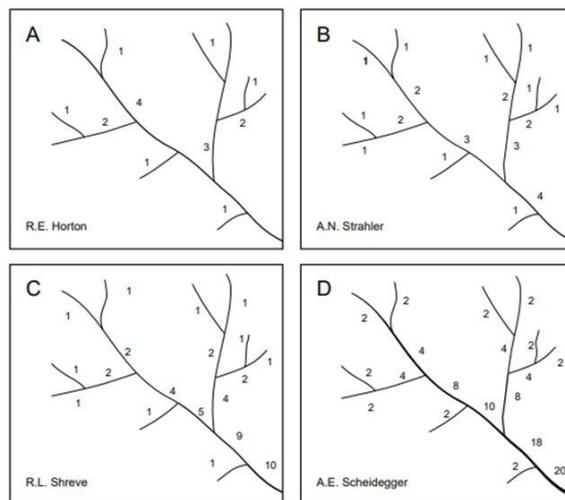


Figura 20. Distintos criterios de jerarquización de los cauces que componen la red de drenaje. Recuperado de Vich (1996).

Posteriormente Strahler (1957) propone una simplificación del sistema Horton; mismo que actualmente es el más utilizado, debido a su simplicidad y al hecho de que no introduce aspectos subjetivos (Vich, 1999). El método de Strahler es muy parecido al de Horton, con la diferencia de que en el esquema de Strahler se siguen los siguientes principios:

- a) 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.
- b) El orden no se incrementa cuando a un segmento de un determinado orden confluye uno de orden menor.

Continuando con la definición de las múltiples propiedades de una cuenca llegamos al denominado índice de densidad de drenaje (Dd), el cual ha sido reconocido como una característica fundamental que refleja la presencia de controles topográficos, litológicos y de vegetación sobre la red de drenaje de la cuenca (Vich, 1996) este índice permite por lo tanto tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje.

La densidad de drenaje se calcula según la ecuación 2 dividiendo la longitud total de las corrientes de la cuenca por el área total que las contiene (Ibáñez, Moreno, y Gisbert, 2011):

$$Dd = L / A$$

Ec. 2. Densidad de drenaje de una cuenca. Recuperado de Ibáñez, Moreno, y Gisbert (2011).

Donde:

Dd: Densidad de drenaje (km/km²).

L: Σ de la longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca (km).

A: Superficie de la cuenca (km²).

Smith (1950) y Strahler (1957) establecieron una clasificación de la densidad de drenaje (figura 21) como: gruesa, $Dd < 0.5 \text{ km/km}^2$; media, $5.0 < Dd < 13.7 \text{ km/km}^2$; y fina $Dd > 13.7 \text{ km/km}^2$.

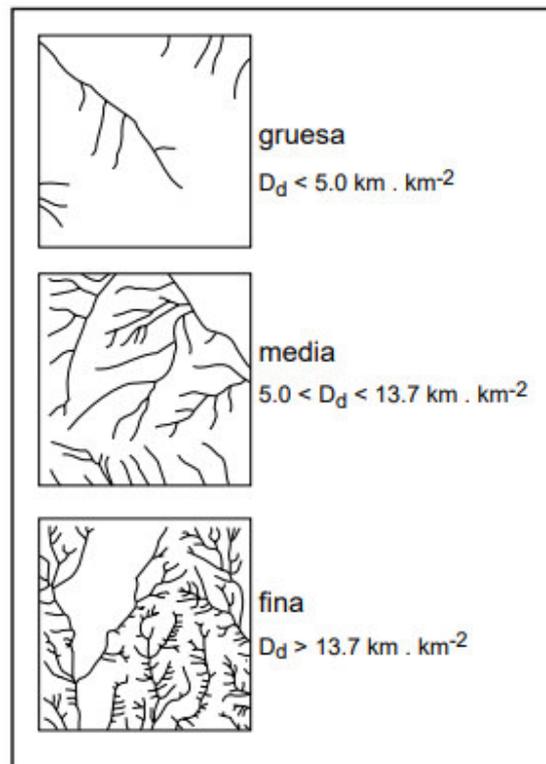


Figura 21. Clasificación de la densidad de drenaje (D_d). Recuperado de Vich (1996).

En general, una mayor densidad de escurrimientos indica mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor potencial de erosión. La Densidad de drenaje varía inversamente con la extensión de la cuenca (Ibáñez, Moreno, y Gisbert, 2011).

3.3.3 El agua en el suelo

Resulta importante saber predecir el movimiento del agua y de la escorrentía dentro de la cuenca dadas las características del suelo; saber identificar las propiedades físicas del suelo más importantes en el área que se está estudiando y comprender como determinados factores de origen natural y humano influyen en el movimiento del agua en el suelo.

Las propiedades físicas del suelo propuestas por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2020) son: su estructura, profundidad, características del agua en el suelo, disponibilidad de agua en el suelo, textura, color, consistencia, porosidad, densidad y movimiento del agua en el suelo, mismas que serán retomadas y descritas a continuación. La estructura del suelo está constituida por agregados formados a partir de asociaciones de partículas texturales del suelo como arena, limo y arcilla, dicha estructura afectará de manera directa la aireación, el movimiento de agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento de raíces y la resistencia a la erosión, cabe decir que el agua representa el componente elemental que afecta la estructura del suelo debido a su solución y a la precipitación de minerales y sus efectos en el crecimiento de las plantas. La profundidad del suelo consiste en su espesura efectiva (capa superficial del suelo, subsuelo y estratos con poca formación edafogenética), en la práctica los estudios con levantamiento de suelos utilizan límites de profundidad arbitrarios (200 cm), sin embargo, será un dato sumamente variable incluso en áreas pequeñas, que deberá ser corroborado en campo. En valles fluviales con suelos fértiles, la roca madre puede encontrarse a más de 200 cm de profundidad, por otra parte, existen lugares, como las regiones de montaña, donde la profundidad del suelo puede ser inferior a los 25 cm, por lo general se observa una mayor

capacidad de absorber y almacenar el agua en las áreas donde el suelo es más profundo (MetEd, 2011). Es también más probable que en estas áreas de suelo profundo el interflujo sea mayor, por lo tanto, existirá mayor escorrentía en suelos poco profundos o con estratos impermeables.

Las características del agua en el suelo, como el contenido de humedad, ya sea almacenada o fluyente, afectarán en la formación del suelo, su estructura, estabilidad y erosión, además de que el agua almacenada es el factor principal para satisfacer la demanda hídrica de las plantas.

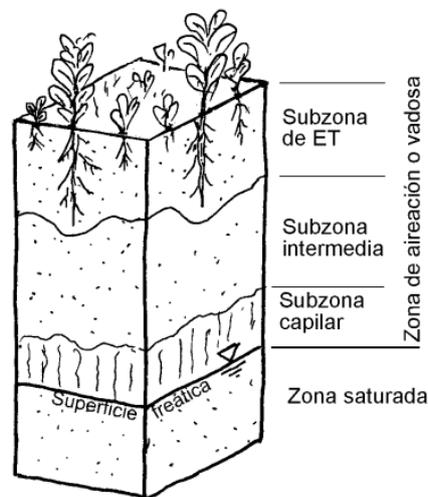


Figura 22. Zonas de humedad en un suelo. Recuperado de Sánchez (2007).

Ya se ha descrito al nivel freático como la discontinuidad entre la zona saturada y la no saturada; lo que se encuentra por encima de la superficie freática se denomina también zona de aireación o zona vadosa. Si bien la disponibilidad de agua en la zona de aireación puede estar distribuida de manera irregular, es posible identificar tres subzonas (figura 22) (Sánchez, 2007). La subzona de evapotranspiración es la afectada por este fenómeno, puede tener desde unos pocos centímetros si no existe vegetación, hasta varios metros; la subzona capilar se encuentra inmediatamente sobre la superficie freática, el agua en esta zona ha ascendido por capilaridad, su espesor es muy variable, dependiendo de la granulometría de los materiales; y la subzona intermedia que se encuentra

entre las dos anteriores, pudiendo ser prácticamente inexistente hasta llegar a los varios metros de espesor.

Se han definido por el mismo autor distintos parámetros relativos a la disponibilidad de agua en suelo, los cuales serán necesarios en la estimación de la evapotranspiración de una cuenca. El grado de humedad es el peso de agua en una muestra respecto al peso de la muestra seca, expresado en porcentaje; la capacidad de campo es el máximo grado de humedad de un suelo que ha perdido su agua por efecto de la gravedad a través de los poros del suelo; el punto de marchitez es el grado de humedad cuando las plantas no pueden absorber más agua, mientras que el agua utilizable por las plantas resulta de la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez.

La textura del suelo se refiere a la proporción de componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños como arena, limo y arcilla; la textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa, así como su contenido de materia orgánica. Para la clasificación del suelo se utiliza el triángulo de texturas de suelos (figura 23) propuesto por la FAO (2020).

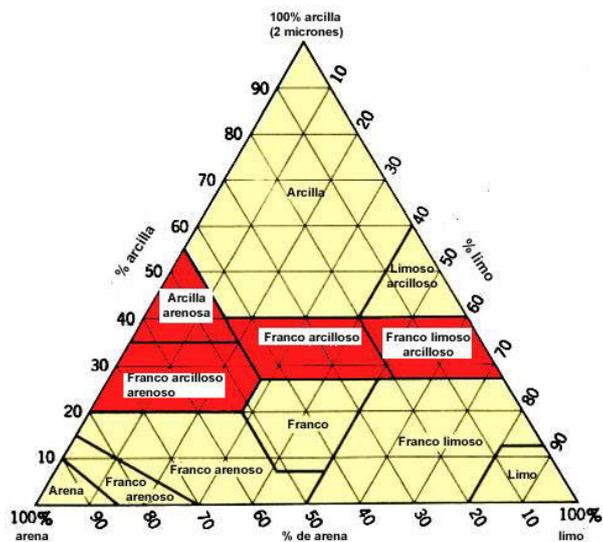


Figura 23. Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de las partículas. Recuperado de FAO (2020).

El suelo puede componerse de uno o varios tipos de texturas, de manera general cuando el suelo contiene un alto porcentaje de arena, el mayor espacio poroso permite que el agua infiltre y drene más rápidamente, permitiendo a este tipo de suelos absorber grandes cantidades de agua; por otro lado, un suelo con altos contenidos de arcillas es más denso y tiene un espacio poroso menor, y por lo tanto una capacidad de infiltración inferior. Las partículas limosas gozan de un tamaño intermedio, de modo que un suelo limoso tendría tasas de infiltración y drenaje mayores que un suelo arcilloso, pero menores que un suelo arenoso. Por consiguiente, ante un evento de precipitación intensa un suelo arcilloso produciría mucha más escorrentía superficial que un suelo arenoso (MetEd, 2011). Cabe señalar que cualquier suelo saturado de agua, ya sea arenoso, limoso o arcilloso, producirá igualmente escorrentía superficial. En cuanto a su capacidad de almacenamiento, un suelo arcilloso paradójicamente tiene una cantidad de espacio vacío mayor que un suelo arenoso, lo que significa que, ante condiciones de llovizna, un suelo arcilloso puede almacenar más agua, drenando eso sí, mucho más lento que un suelo arenoso.

El color del suelo depende de sus componentes y varía con el contenido de humedad, materia orgánica presente y grado de oxidación de minerales presentes. El color del suelo puede ser usado como medida indirecta para ciertas propiedades como, perfil del suelo, origen del material parental, presencia de materia orgánica, estado del drenaje y presencia de sales y carbonatos (FAO, 2020). La consistencia del suelo es la propiedad que define la resistencia del suelo a la deformación o ruptura, estando en función de la humedad en el suelo (aire-seco, húmedo o mojado), pudiendo ser dura, muy dura o suave, dicha propiedad es fundamental para la construcción de obras civiles; y por último habrá de tener en cuenta el movimiento del agua en el suelo, la cual se verá sometida a fuerza de gravedad, ascenso capilar u osmosis, y estará en gran medida condicionada por la conductividad hidráulica del suelo, es decir su capacidad para permitir el flujo de agua.

De este modo ya se han descrito las propiedades del suelo y los parámetros que condicionarán los fenómenos de evapotranspiración, escorrentía superficial e infiltración. Si embargo habrá que mencionar como último parámetro, pero en muchos casos siendo el más importante en el comportamiento de la cuenca y su ciclo hidrológico; el uso de suelo y la modificación en la superficie de la cuenca ocasionado por la actividad antropogénica. Tal es el caso de la compactación del suelo, o la colocación de materiales impermeables en la superficie de las cuencas, como cemento y asfalto, reduciendo así la capacidad de agua que puede infiltrarse en el suelo; también ocurre con la deforestación de bosques o incendios forestales, en donde la ausencia de materia vegetal ocasiona que el agua se desplace más rápido en la superficie. En términos generales, la actividad humana reduce la infiltración y el almacenamiento de agua, y aumenta la escorrentía superficial.

3.3.4 Agua subterránea

Si se continúa con el camino descendente del agua a través de la zona vadosa (no saturada), una vez que el agua atraviesa la subzona capilar se llega a la ya mencionada zona saturada o zona freática; la zona saturada que se encuentra limitada en su parte superior por el nivel freático tiene todos los espacios libres de sedimento y roca completamente llenos de agua. Al agua que se encuentra en esta zona saturada o acuífero se denomina agua subterránea.

La interacción entre el sistema de aguas subterráneas y las corrientes de agua superficiales es un fenómeno sumamente importante en el ciclo hidrológico, dicha interacción puede presentarse de tres maneras según Tarbuck y Lutgens (2013). Las corrientes superficiales pueden recibir agua de la aportación de aguas subterráneas a través del cauce de la corriente (figura 24A) a este tipo de corrientes se les denomina efluentes, para que suceda dicha interacción, el nivel freático debe ser mayor que el nivel de la superficie de la corriente superficial, las corrientes efluentes son las responsables de la formación de ríos perennes. Por otro lado, las corrientes

superficiales también pueden perder agua hacia el sistema de aguas subterráneas por la salida de agua a través del lecho de la corriente, en este caso se emplea el término de corriente influyente y sucede cuando el nivel freático es inferior a la superficie de la corriente superficial. En el caso de las corrientes influyentes pueden ser de dos tipos: conectada, si existe una zona saturada continua hasta la superficie de corriente (figura 24B) o desconectada, si existe zona no saturada entre el nivel freático y la superficie de corriente (figura 24C).

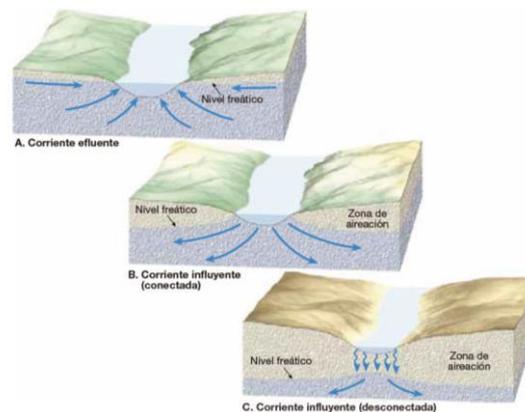


Figura 24. Interacción entre el sistema de aguas subterráneas y las corrientes de agua superficiales. Recuperado de Tarbuck y Lutgens (2013).

Otro tipo de conexión considerado por Cruickshank (1992) son los manantiales, los cuales se forman cuando el nivel piezométrico del acuífero sube sobre el nivel del terreno haciendo que el agua aflore y alimente cuerpos superficiales; los aislados (ojos de agua) se dan por lo general en acuíferos semiconfinados, por fisuras o partes débiles de la capa confinante.

De igual forma como se deben identificar las propiedades físicas del suelo en el área que se está estudiando, resulta necesario saber interpretar la naturaleza geológica del subsuelo, pues ello influirá mucho en la velocidad del movimiento del agua subterránea, la cantidad de agua subterránea que puede almacenarse y en la interacción entre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Cuatro parámetros hidráulicos resultan especialmente importantes para caracterizar los acuíferos; porosidad (m),

permeabilidad o conductividad hidráulica (k), transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S).

La porosidad (m) se define como la relación entre vacíos y el volumen total de un material (Pérez, 2016), por lo tanto, el agua subterránea que pueda almacenarse depende de la porosidad del material. Es posible identificar dos tipos de porosidad según Villarroya (2009), la porosidad total (m o m_t) es definida como el cociente entre el volumen de poros que presenta el acuífero referido al volumen total del mismo, expresado en porcentaje (%), y la porosidad eficaz (m_e) es el cociente entre el volumen de poros conectados que presenta el acuífero por donde puede circular efectivamente el agua subterránea referidos al volumen total del mismo. Esto quiere decir que una muestra puede poseer una alta porosidad total, pero si dichos poros se encuentran aislados entre sí, se dice que la misma no es efectiva y no participa activamente en el transporte del fluido ya que los potenciales canales de conducción no se encuentran interconectados. Así mismo es posible reconocer una porosidad derivada de la depositación, cristalización o enfriamiento de una roca, a la que se denomina porosidad primaria, la cual puede ser alterada posteriormente por fenómenos geoquímicos, tectónicos, diagenéticos, etc., para generar una porosidad secundaria (Goldmann, 2018). En la tabla A1 ubicada en el Anexo A se presentan valores de porosidad para distintas rocas según Custodio y Llamas (1983).

La permeabilidad o conductividad hidráulica (k) es el caudal de agua que circula por una sección de acuífero con altura la unidad, anchura la unidad, bajo un gradiente hidráulico unitario (Villarroya, 2009); representa la facilidad que tiene una roca para que el agua circule a través de ella. La permeabilidad depende tanto del medio físico como del fluido que lo atraviesa. En la tabla A2 se presentan valores de permeabilidad para diferentes agrupaciones litológicas.

La transmisividad (T) es la capacidad de un acuífero para transmitir agua. Es un parámetro que indica la posibilidad que ofrece un acuífero para ser

explotado, y cuyo valor se obtiene del producto entre la conductividad hidráulica del acuífero y el espesor saturado del mismo (Heath, 1983). En la tabla A3 se presentan valores de transmisividad para diferentes acuíferos y su calificación ante la posibilidad de ser explotados. Por último, el coeficiente de almacenamiento (S) o porosidad drenable es un parámetro adimensional que puede definirse como la cantidad de agua que cede un prisma de acuífero de base cuadrada unitaria cuando se le deprime la unidad (Villanueva e Iglesias, 1984). En el caso de que el acuífero actúe como libre el coeficiente de almacenamiento coincidirá con la porosidad eficaz. En la tabla A4 se muestran valores de coeficiente de almacenamiento para distintos materiales.

A lo largo del presente trabajo se ha llamado de manera genérica acuífero a la zona saturada; si bien el término es correcto, las formaciones geológicas que almacenan agua subterránea pueden denominarse de una manera específica considerando los ya mencionados parámetros hidráulicos del material o los materiales que lo componen, como lo es la porosidad o la permeabilidad, lo cual sería aconsejable. El autor Sánchez (2007) propone la siguiente clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico (tabla 3): acuífero, acuicludo, acuitardo y acuífugo.

Se denomina acuífero a la formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad, algunos materiales que forman acuíferos son las arenas, gravas, granito u otra roca compacta con fracturación importante; dentro de los sistemas acuíferos se pueden considerar a su vez tres tipos según sus circunstancias hidráulicas y estructurales (Villanueva e Iglesias, 1984): los acuíferos libres son aquellos en los que el nivel del agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable, el agua que ceden es el agua que tienen almacenada en sus poros; los acuíferos cautivos o confinados son aquellos que están completamente aislados en el subsuelo, es decir, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados, el nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de dicho material acuífero; y

en los acuíferos semiconfinados los materiales que los rodean no son todos impermeables, así, el paquete superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables, que permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado.

Un acuicludo se define como aquella formación geológica que, conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no es aprovechable (García y Fernández, 2008), ejemplos de materiales que componen un acuicludo son limos y arcillas; el acuitardo es una formación geológica que contiene agua en cantidad considerable, sin embargo el agua circula a través de ella con dificultad, por lo que vendría a ser un concepto intermedio entre un acuífero y un acuicludo, ejemplos de materiales formadores de acuitardos serían las arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración y/o fracturación moderadas. Por último, el acuífugo es una formación geológica que no contiene agua, ya que el agua no puede transmitirse a través de ella; ejemplos de materiales formadores de acuífugos serían un granito o esquisto inalterados y no fracturados.

Tabla 3. Calidad de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico. Recuperado de Sánchez (2007).

CALIDAD DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS SEGÚN SU COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO		
Tipo	Porosidad total	Permeabilidad
Acuíferos	Alta o moderada	Alta
Acuitardos	Alta o moderada	Baja
Acuicludos	Alta	Nula
Acuífugos	Nula o muy baja	Nula

3.5 Determinación del potencial de recarga hídrica en una cuenca

A través de la descripción de los principales fenómenos hidrológicos que suceden en una cuenca, quedó en evidencia la relevancia que tiene cada uno de sus componentes en el ciclo hidrológico dentro del sistema, así

como en la interacción entre el agua superficial y subterránea con la superficie terrestre; parámetros como clima, cobertura vegetal, uso del suelo, topografía, estructura y textura del suelo, formaciones rocosas, o pendiente del terreno, son factores que determinarán en gran medida la infiltración, percolación y recarga profunda. Siguiendo el principio del análisis sistemático de una cuenca y sus componentes, en los siguientes capítulos se definirán los métodos para identificar las zonas de recarga y descarga hídrica en una cuenca, se describirá la aplicación de la *Evaluación Espacial Multicriterio*, el *Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)* y la utilización de los *Sistemas de Información Geográfica y Álgebra de mapas* para la delimitación de las zonas potenciales de recarga hídrica de una cuenca, y por último se describirá el balance hídrico general y se retomarán algunas metodologías para la estimación de la recarga hídrica potencial al acuífero, describiendo de manera particular el *balance hídrico de suelos* propuesto por Schosinsky (2006).

3.5.1 Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales

Al contemplar la instrumentación de una obra de recarga hídrica que tiene como objetivo el mantenimiento o la recuperación de acuíferos resulta necesaria la aplicación de técnicas útiles para definir el funcionamiento del agua superficial y subterránea, mediante una evaluación y análisis sistemático de su interacción con otros componentes de la cuenca. De acuerdo con Tóth (2000), los parámetros de un régimen de agua subterránea bajo el efecto gravitacional están controlados por tres componentes del ambiente hidrogeológico: topografía, clima y geología, los cuales permiten la formación de tres sistemas generales de flujo: local, intermedio y regional, en los que el tiempo de residencia del agua subterránea es de menor a mayor, respectivamente. Estos flujos representan cada uno su zona de recarga, tránsito y descarga particular. Comparando la respuesta fisicoquímica de uno local con uno regional, el último presenta mayor profundidad y distancia de recorrido, lo que le permite mayor interacción agua-roca; por tal motivo, el agua en su zona de

descarga presentará mayor temperatura, menor contenido de oxígeno disuelto, mayor salinidad y pH más alcalino (Peñuela y Carrillo, 2013). Generalmente, la descarga de un sistema de flujo regional se manifiesta en una cuenca hidrográfica diferente a aquella donde se originó la recarga.

La teoría de los sistemas de flujo resulta útil ya que, al evaluar el concepto de agua subterránea y ambiente como un sistema, el resultado de la interpretación de cualquiera de sus parámetros debe mostrar congruencia con el resto de ellos, dando así mayor confiabilidad a las conclusiones que se lleguen. Partiendo de este funcionamiento sistemático, en el que existe dependencia o relación entre los diversos componentes del ambiente, Peñuela y Carrillo (2013) proponen una serie de características que permiten identificar zonas de recarga y descarga, bajo la premisa de que los elementos presentes en superficie son el resultado de diferentes procesos que se originan en el subsuelo.

La zona de descarga es la evidencia más viable de identificar el funcionamiento de agua subterránea, pues ésta representa la fase final del recorrido del flujo. Una zona de descarga podrá estar representada por un manantial, lago, suelo salino, presencia de vegetación freatofita, halófila y/o gipsófila, y/o un nivel de agua subterránea somero. Un suelo asociado con una zona de descarga tiende a ser más salino y alcalino, bien desarrollado (buena diferenciación de horizontes), y con alto contenido de materia orgánica, pudiendo llegar a tener rasgos hidromórficos como moteado y concreciones de Fe y Mn, dotándolo así del color propio del grupo de suelos Gleysol; por último, la descarga de agua subterránea ocurre a una elevación topográfica más baja que donde se origina la recarga. La identificación de las zonas de recarga es más complicada debido a que el agua se infiltra y no se tiene evidencia superficial como en el caso del agua de descarga, no obstante, es posible considerar una serie de indicadores que pueden evidenciar una zona de recarga, el primero está asociado con la conductividad hidráulica de la roca, la cual puede permitir la infiltración del agua de lluvia; otro indicador es la elevación topográfica de la roca, pues como ya se mencionaba, la recarga ocurrirá en una elevación topográfica

más alta que la descarga. En la zona de carga el nivel freático se encuentra profundo, el suelo es ácido, poco desarrollado, con poca cantidad de materia orgánica y baja concentración de sodio y/o sales. La vegetación suele ser xerófila con raíz larga para alcanzar a captar el agua infiltrada en su proceso de percolación.

3.5.2 Identificación de áreas potenciales de recarga hídrica mediante una Evaluación Espacial Multicriterio

La Evaluación Espacial Multicriterio se podría definir como un conjunto de operaciones espaciales para lograr un objetivo teniendo en consideración simultáneamente todas las variables que intervienen (Barredo, 1996), bien sean factores o restricciones (Bosque y Mass, 1995). Esta se basa en la ponderación y combinación de variables en un sistema de información geográfica, bajo un esquema que permite generar índices de aptitud para algún uso o actividad determinada (Bravo et al., 2015), frecuentemente relacionada con la toma de decisiones espaciales y en ocasiones derivada hacia la evaluación multiobjetivo cuando entran en juego fuerzas de competencia entre diferentes usos (Moreno, 2001).

En el caso particular de la evaluación espacial multicriterio enfocada a la recuperación de aguas subterráneas destaca la metodología propuesta por Matus, Faustino, y Jiménez (2009) para la identificación de zonas con potencial de recarga hídrica. Esta es presentada por sus autores a modo de guía, constando de diez pasos; el primero de ellos trata la evaluación biofísica y socioeconómica de las cuencas de interés para definir las zonas donde se va a aplicar la metodología, ya que esto permitirá determinar las cuencas prioritarias, y también permitirá determinar la viabilidad de implementar la metodología en determinado lugar tomando en cuenta la incidencia que pudieran tener sobre el área organismos, instituciones o comités. El siguiente paso consiste en la capacitación de los habitantes de las comunidades con el objetivo de que conozcan y se familiaricen con los conceptos y elementos necesarios para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica, así mismo se les alentará a compartir sus conocimientos y

experiencias prácticas relacionados con el tema del agua, ya que ellos conocen mejor que nadie su territorio, pudiendo representar un importante apoyo para la caracterización de la cuenca.

El paso número tres radica en la identificación y ubicación de las fuentes de agua como pozos, manantiales u ojos de agua; pues como ya se definió capítulos arriba, la zona de descarga representa el punto de partida para comprender la dirección de los flujos de agua subterránea. Una vez localizadas las fuentes de agua, en el cuarto paso se procede a realizar un análisis teórico en colaboración con los habitantes del lugar para identificar las posibles zonas de recarga, para ello se buscarán los lugares que presenten las características de una zona de recarga, como pendiente suave, suelos permeables, roca porosa, buena cobertura vegetal o usos de suelo con prácticas que favorezcan la infiltración. El quinto paso consiste en la evaluación de los elementos del modelo propuesto, donde las zonas potenciales de recarga hídrica podrán ser identificadas evaluando los elementos biofísicos de pendiente y microrelieve, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo. La ponderación para usar en la evaluación de cada elemento va de 1 a 5, donde 1 corresponde al valor más bajo (características menos favorables para que ocurra la recarga hídrica). Si bien las características biofísicas que consideran los autores ya fueron definidas durante la descripción del ciclo hidrológico y los parámetros físicos de una cuenca, a continuación, se retomarán únicamente consideraciones puntuales para la evaluación de dichos elementos, y sus respectivas ponderaciones.

a) Pendiente y microrelieve

En el relieve es posible identificar superficies planas (S), cóncavas (C), convexas (V), complejos irregulares (X) o una combinación de ellas (FAO, 2009). En la figura 25 se ilustra la dirección de flujo superficial a partir de la forma del relieve; de manera general en lugares con relieves planos, semiplanos y cóncavos se favorece el proceso de infiltración y recarga hídrica. De la misma manera la pendiente del lugar estará directamente

relacionada con el escurrimiento superficial y la capacidad de infiltración, ya que en las pendientes más fuertes se favorece el escurrimiento superficial disminuyendo por consiguiente la recarga hídrica, y por otro lado en un área con pendientes suaves se tendrá un mayor tiempo de contacto agua-superficie, aumentando así su capacidad de infiltración. En la tabla 4 se muestra la ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según la pendiente del terreno.

Tabla 4. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según la pendiente del terreno. Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).

POSIBILIDAD DE RECARGA SEGÚN LA PENDIENTE DEL TERRENO				
Descripción	Pendiente (%)	Pendiente (grados)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Plano a casi plano, con o sin rugosidad	0 - 6	0° - 3.4°	Muy Alta	5
Moderadamente ondulado o cóncavo	6 - 15	3.4° - 8.5°	Alta	4
Ondulado/cóncavo	15 - 45	8.5° - 24°	Moderada	3
Escarpado	45 - 65	24° - 33°	Baja	2
Fuertemente escarpado	> 65	>33°	Muy Baja	1

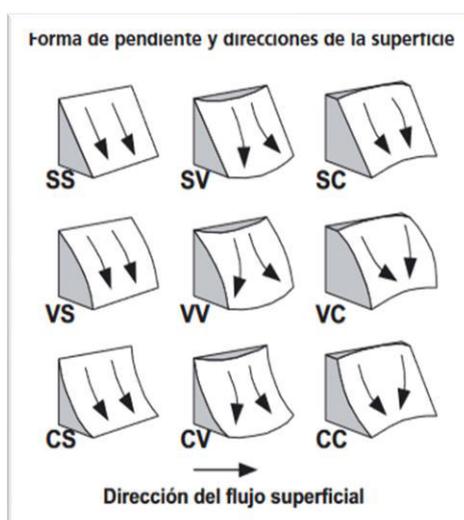


Figura 25. Clasificación para las formas de pendiente. Recuperado de FAO (2009).

b) Tipo de suelo

La infiltración de agua en el suelo estará determinada en gran medida por su textura, porosidad, permeabilidad y compactación. Para asegurar una alta capacidad de infiltración los suelos deben ser permeables, es decir, suelos con textura gruesa y porosos. Por el contrario, suelos de textura fina, arcillosos, pesados y compactados dificultarán o inclusive impedirán la recarga hídrica. En la tabla 5 se presenta la ponderación de la capacidad de recarga en los diferentes tipos de texturas.

Tabla 5. Ponderación de la capacidad de recarga hídrica del suelo según su textura.
Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).

CAPACIDAD DE RECARGA SEGÚN LA TEXTURA DEL SUELO		
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

c) Tipo de roca

El análisis del tipo de roca presente en el área de estudio permitirá determinar si la recarga hídrica será subsuperficial o subterránea. De la

misma manera que el suelo, los parámetros de porosidad y permeabilidad presentes en la roca determinarán su capacidad de recarga y almacenamiento. Las rocas compactas, con poros finos y sin facturación no favorecerán la recarga, por el contrario, las rocas más suaves o permeables, con poros grandes e interconectados, con presencia de fallas o fracturas si favorecen el flujo y la recarga de agua a los acuíferos. La tabla 6 presenta la ponderación para cada tipo de roca en función de su capacidad de recarga hídrica.

Tabla 6. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca.
Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).

POSIBILIDAD DE RECARGA SEGÚN EL TIPO DE ROCA		
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

d) Cobertura vegetal permanente

Se trata del porcentaje de estratos vegetales perennes localizados sobre el suelo del área de estudio, pudiendo ser árboles, arbustos, hierbas o una combinación de ellos. Representa un factor muy importante a evaluar, ya que la cobertura vegetal reduce la velocidad de escorrentía, permitiendo

así tener un mayor tiempo de contacto entre el suelo y el agua, favoreciendo de esta manera la recarga hídrica inclusive en suelos arcillosos o duros. Así mismo una buena cobertura vegetal disminuirá el impacto de la erosión hídrica, permitiendo la prevalencia de las características del suelo que favorecen la recarga, y por último brindará protección a las obras de recarga. En la tabla 7 se presenta la ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según su cobertura vegetal.

Tabla 7. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal. Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).

POSIBILIDAD DE RECARGA SEGÚN EL PORCENTAJE DE COBERTURA VEGETAL		
Cobertura vegetal permanente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
>80	Muy alta	5
70 – 80	Alta	4
50 – 70	Moderada	3
30 – 50	Baja	2
<30	Muy baja	1

e) Usos del suelo

Este parámetro busca establecer la existencia de 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, mismas que potencian la evaporación hídrica, disminuyendo así la capacidad de infiltración del suelo. El uso del suelo es un parámetro muy cambiante debido a la influencia de la actividad humana; un uso inadecuado del suelo puede disminuir la recarga subterránea hasta en un 50%, a la vez propicia el aumento de riesgos naturales y la pérdida de suelo por erosión hídrica o eólica (Matus, Faustino, y Jiménez, 2009). La tabla 8 muestra la ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el uso del suelo.

Tabla 8. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según los usos del suelo.
Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).

POSIBILIDAD DE RECARGA SEGÚN LOS USOS DEL SUELO		
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

Una vez evaluados los parámetros según las tablas propuestas, el siguiente paso dentro de la metodología consiste en la determinación del potencial de recarga de las zonas evaluadas mediante la aplicación de la ecuación de potencial de recarga hídrica (ecuación 3), en dicha ecuación se sustituye cada uno de los elementos del modelo por los valores respectivos obtenidos en la evaluación de campo.

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

Ec. 3. Potencial de recarga hídrica. Recuperado de Matus, Faustino, y Jiménez (2009).

Donde:

Pend: Pendiente y microrelieve.

Ts: Tipo de suelo.

Tr: Tipo de roca.

Cve: Cobertura vegetal permanente.

Us: Usos del suelo.

La asignación de pesos relativos a cada atributo se hará en función de la importancia de ese atributo en el proceso de infiltración del agua, lo que significa que los criterios que más condicionan la infiltración del agua en el suelo serán los de mayor importancia. En el caso de los indicadores presentes en la ecuación anterior corresponden a los pesos relativos consensuados para una subcuenca particular en la región central de Nicaragua, de modo que estos deberán modificarse según las características de la cuenca. En el proceso de asignación de pesos relativos es conveniente contar con la experiencia de los extensionistas que trabajen en la zona que se estudia. En la tabla 9 se presenta el potencial de recarga hídrica según el modelo propuesto.

Tabla 9. Potencial de recarga hídrica según el modelo propuesto por Matus, Faustino, y Jiménez (2009).

POTENCIAL DE RECARGA	
Posibilidad 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

Continuando con la metodología, corresponde la elaboración del mapa de zonas potenciales de recarga hídrica, lo cual permitirá tener una representación gráfica del territorio y dejar evidencia de las zonas potenciales de recarga identificadas. Por un lado, el mapa será útil como herramienta al establecer planes, estrategias y acciones orientadas en el ordenamiento, protección y manejo sostenible de los recursos naturales, y por otro servirá a los habitantes de las comunidades asentadas en el área, para que identifiquen las zonas de infiltración y tomen conciencia de los usos y manejos que se dan a dichas zonas, y como eso afectará la calidad y cantidad del agua que consumen.

La construcción del mapa se realiza a partir de la aplicación de la técnica denominada *álgebra de mapas*, la cual consiste en el análisis de un conjunto de datos espaciales como, capas de datos geográficos, tablas de datos, o escalares y vectores; mediante la combinación de un tipo único de datos o de varios a través de una operación o procedimiento concreto (Castellanos, 2017). Por lo tanto, los distintos elementos con los que se trabaje dentro de una o varias capas de información geográfica cobrarán relevancia relacionándose entre sí, generando resultados en función de ellas. Las operaciones espaciales son según Castellanos (2017): operaciones de superposición (*overlaying*), unión, intersección, generalización (*disolver*) extracción (*cortar*), *buffer* (áreas de influencia), y análisis de proximidad.

Si bien, antes de la existencia de los Sistemas de Información Geográfica, estos procedimientos se hacían manualmente mediante la combinación de mapas, acetatos y transparencias, el desarrollo de los SIG brindó una plataforma ideal para llevar a cabo estos análisis geográficos multivariable. El siguiente paso consiste en la caracterización de las zonas identificadas mediante una descripción de las características presentes en el área, para determinar cuáles pueden estar afectando la recarga hídrica, a fin de definir las medidas que se deben implementar para favorecer la recarga. En el penúltimo paso dentro de la metodología se propondrán recomendaciones para la implementación de estrategias y acciones que permitan garantizar la sostenibilidad de los flujos de recarga hídrica y la calidad del agua, como serían las acciones para el manejo de fuentes de contaminación, tomando siempre en cuenta el contexto físico y legal de zona, y por último esta la difusión de los resultados, en compañía de campañas de enseñanza, aprendizaje y sensibilización acerca de las zonas de recarga hídrica, ya que con ello será posible el trabajo en conjunto entre los habitantes de la zona, organismos e instituciones, en pro de la conservación del recurso hídrico en la subcuenca hidrográfica estudiada.

La siguiente metodología para la identificación de áreas potenciales de recarga hídrica mediante una evaluación espacial multicriterio corresponde

a la propuesta por Bravo et al. (2015), en ella se retoman los criterios de evaluación formulados por Matus (2007), Sáenz (2015), Gómez y Soriano (2013) y Hsin-Fu et al. (2009). Para la generación del modelo, Bravo et al. (2015) identifican los siguientes factores espaciales: pendiente, geología, densidad de fracturas y lineamientos, edafología, uso del suelo y número de infiltración. Para su evaluación dichos factores deben ser cartografiados a partir de información digital preexistente, fotointerpretación, procesamiento espectral y edición de bases de datos cartográficos. Los mapas de densidad de fracturas (Dfa) y número de infiltración (NI), el cual indica el grado de desarrollo de la red superficial de drenaje, son desarrollados por los autores a partir de fotointerpretación y la aplicación de las ecuaciones de frecuencia de escorrentía, densidad de drenaje, número de infiltración y densidad de fracturas.

$$Fs = Nu / A$$

Ec. 4. Frecuencia de escorrentías. Recuperado de Bravo et al. (2015).

Donde:

Nu : Número total de segmentos de escorrentías.

A : Unidad de área (1 km^2).

$$Dd = \Sigma Lu / A$$

Ec. 5. Densidad de drenaje. Recuperado de Bravo et al. (2015).

Donde:

ΣLu : Longitud de escorrentías.

A : Unidad de área (1 km^2).

$$If = Fs * Dd$$

Ec. 6. Número de infiltración. Recuperado de Bravo et al. (2015).

Donde:

F_s: Frecuencia de escorrentías.

D_d: Densidad de drenaje.

$$Df = \Sigma Fa / A$$

Ec. 7. Densidad de fracturas. Recuperado de Bravo et al. (2015).

Donde:

ΣFa: Longitud total de fracturas y lineamientos.

A: Unidad de área (1 km²).

Una vez elaborados los mapas, se procede a asignar un valor de aptitud para cada uno de los parámetros evaluados según su capacidad de infiltración, siendo estos: 1 (muy baja), 2 (baja), 3 (media), 4 (alta) y 5 (muy alta), como se muestra en la tabla 10, elaborando ahora los mapas de aptitud para cada parámetro.

Tabla 10. Grados de aptitud por factor. Recuperado de Bravo et al. (2015).

GRADOS DE APTITUD POR FACTOR	
Factor	Aptitud
Pendiente °(Pe)	
0 - 6°	5
6 - 15°	4
15 - 45°	3
45 - 65°	2
Mayor a 65°	1
Geología (Ge)	
Aluvial, Eólico	5
Arenisca, Conglomerado	4
Conglomerado	3
Andesita, Granodiorita, Riolita, Toba ácida	2
Basalto	1
Densidad de Fracturas y lineamientos (km/km ²) (Dfa)	
2.59 y mayores	5
1.94 - 2.58	4
1.29 - 1.93	3

0.64 - 1.28	2
0 - 0.63	1
Edafología (Ed)	
Cambisol, Phaozem, Regosol, Umbrisol	3
Luvisol, Planosol	2
Durisol, Gleysol, Leptosol, Vertisol	1
Uso de suelo y Vegetación (USV)	
Bosques, matorrales y Vegetación riparia	5
Agricultura de perennes (huertas)	4
Agricultura de anuales	3
Asentamientos humanos	2
Cuerpos de agua	1
Número de infiltración (If)	
0 - 6.57	5
6.58 - 18.26	4
18.27 - 39.04	3
39.05 - 101.15	2
101.16 y mayores	1

Una vez que se clasifican los niveles de aptitud para cada parámetro, estos deben ser ponderados mediante el Proceso de Jerarquía Analítica, asignando un peso numérico o jerarquía de importancia a cada uno de los mapas según su relevancia dentro de la evaluación. De la misma manera que Matus, Faustino, y Jiménez (2009), los autores proponen la evaluación multicriterio mediante una sumatoria lineal ponderada que integra los pesos de cada factor, como se muestra en la ecuación 8.

$$Ap = \sum w_i x_i$$

Ec. 8. Sumatoria lineal ponderada. Recuperado de Bravo et al. (2015).

Donde:

Ap: Aptitud para la recarga hídrica.

w = Peso del factor.

x = Factor.

De manera análoga, una vez definidas las aptitudes y el peso de cada factor se genera un mapa a partir de la sumatoria lineal ponderada con los pesos asignados a cada factor, que permite observar las zonas que tienen mayor potencial de recarga al acuífero.

3.6 Balance hídrico de una cuenca

Una vez que se ha determinado el potencial de recarga hídrica de la zona de estudio, es necesario hacer una evaluación cuantitativa del volumen de agua que interviene en el ciclo hidrológico de la cuenca mediante el cálculo del balance hídrico. El balance hídrico superficial se basa en el principio de conservación de masa en un sistema cerrado, donde todo cambio en el agua almacenada en la cuenca, en un volumen de suelo, durante un periodo de tiempo, es igual a la diferencia entre el agua introducida al suelo y el agua extraída del mismo (Ministerio de Medio Ambiente y Agua y Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, 2016). Si bien la definición anterior implica la estimación del balance hídrico superficial en un volumen determinado de suelo dentro de una cuenca, el balance hídrico indica los valores relativos de entrada y salida de flujo, y la variación del volumen de agua almacenada en cualquier zona o masa de agua (Sokolov y Chapman, 1981), por lo tanto, se podría estimar dicho balance en suelos, cuencas, ríos, lagos, humedales, acuíferos o cualquier otro sitio.

La necesidad de calcular el balance hídrico para solucionar distintos problemas teóricos y prácticos de geohidrología, radica en el hecho de realizar una evaluación cuantitativa de los recursos disponibles de agua en determinada área y tiempo, así como las modificaciones que esta disponibilidad pueda sufrir por influencia de distintas actividades humanas o eventos naturales; por consecuencia, conocer el balance hídrico de la zona o cuerpo de agua que se estudia, supone uno de los datos más importantes a considerar durante la planeación, diseño e instrumentación de cualquier infraestructura hidráulica. La ecuación del balance hidrológico se encuentra fundamentada en el principio de conservación de masas, también conocida como ecuación de la continuidad (ecuación 9), la cual

establece que “para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada” (Sokolov y Chapman, 1981).

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

Ec. 9. Ecuación de la continuidad. Recuperado de Schulz y García (2015).

Donde:

I: Ingresos.

E: Egresos.

Δv : Variación del almacenamiento.

De manera general, se podría afirmar que del agua que cae en un determinado sitio como precipitación (*P*), parte vuelve a la atmósfera ya sea por evaporación directa o por transpiración de la vegetación, fenómeno que en conjunto ya se le ha denominado evapotranspiración (*ETR*); mientras que otra parte de la precipitación escurrirá sobre la superficie de la cuenca como escorrentía superficial (*ES*). Este escurrimiento, fluirá a través de la red de drenaje hasta alcanzar los cauces principales para desembocar eventualmente en el mar, finalmente el resto de agua se infiltrará (*I*) en el terreno y se incorporará al sistema de aguas subterráneas (Ordoñez, Cartilla Técnica: Balance hídrico superficial, 2011). Es a partir de estas variables de entrada y salida al sistema, que se formula la ecuación del balance hidrológico (ecuación 10).

$$P = ETR + ES + I$$

Ec. 10. Ecuación del balance hidrológico. Recuperado de Ordoñez, Cartilla Técnica: Balance hídrico superficial (2011).

Donde:

P: Precipitación.

ETR: Evapotranspiración.

ES: Escorrentía superficial.

I: Infiltración.

Para su aplicación a ciertos cálculos, la ecuación del balance hidrológico podrá simplificarse o hacerse más compleja, dependiendo de los datos disponibles, del objeto del cálculo, del tipo de masa de agua (cuena de un río, lago, embalse, etc.), de las dimensiones de la masa de agua, de sus características hidrográficas e hidrológicas, de la duración del balance, y de la fase del régimen hidrológico (crecida, baja crecida) para el cual se calculará el balance hídrico (Sokolov y Chapman, 1981); si bien la ecuación puede ser aplicada a una región o unidad de estudio cualquiera y en un tiempo cualquiera, cuando la unidad de tiempo es muy grande se debe 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).

3.7 Balance Hídrico de Suelos

Se ha mencionado como el estudio del balance hídrico se fundamenta en principio de la conservación de la materia, si esto se plantea para una determinada extensión de suelo, se puede afirmar que el agua que entra a un suelo es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él; siendo la entrada la infiltración del agua hacia el suelo y las salidas la evapotranspiración de las plantas, más la descarga de los acuíferos (Schosinsky, 2006). Siguiendo dicho principio, Schosinsky (2006), mediante un balance hídrico de suelos, propone estimar la cantidad de agua que queda libre para recargar el acuífero que se encuentra debajo del suelo analizado, a partir de la determinación de la lluvia que penetra el suelo, cobertura vegetal, profundidad de las raíces extractoras de agua, capacidad de campo, punto de marchitez del suelo, evapotranspiración potencial y humedad del suelo al inicio del análisis. El procedimiento para determinar los valores de las variables necesarias para estimar la recarga potencial al acuífero se ubica en el anexo B.

3.8 Gestión de Recarga de Acuíferos

La denominada gestión de recarga de acuíferos o manejo de recarga de acuíferos, en inglés MAR (Managed Aquifer Recharge), son un conjunto de técnicas que implican la recarga gestionada por el hombre de aguas subterráneas con aguas superficiales con el propósito de obtener un beneficio ecológico, como el incremento de los niveles de los acuíferos, la recuperación de la calidad del agua mediante un tratamiento natural agua-suelo, almacenamiento en el subsuelo de agua para enfrentar las sequías en zonas áridas y semiáridas, mitigación de inundaciones, reducción de escorrentía y erosión, así como el control de subsidencia e intrusión salina en los acuíferos localizados en zonas costeras (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017). A continuación, se retomará la clasificación y descripción de las distintas técnicas MAR propuestas por los mismos autores, en donde cada una de ellas busca atender un problema hídrico en particular.

3.8.1 Técnicas para la gestión de recarga de acuíferos

Si bien las técnicas para llevar a cabo la gestión de recarga de acuíferos son muchas, estas se pueden clasificar en dos grandes grupos: las que infiltran agua y las que la interceptan (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017) (tabla 11). Respecto a la técnica de infiltración de agua, esta se puede subdividir en las tecnologías de distribución y pozos. Entre los métodos de distribución se encuentran las cuencas y estanques de infiltración / percolación (figura 26), que tienen por objeto disponer de agua en depresiones naturales (cuencas o embalses) y estanques construidos con dicho propósito, donde el agua es conducida para ser infiltrada a través del subsuelo y ser almacenada en el acuífero. En la implementación de esta técnica habrá de determinarse si las propiedades del suelo permiten la infiltración del agua, así como delimitar la zona de influencia del domo de recarga para no afectar a terceros, la obstrucción por sedimentación podrá retrasarse cubriendo el fondo y los lados del estanque con una capa de arena de grano medio, aproximadamente de 0.5 m de espesor (Gale, 2005); el método de tratamiento suelo-acuífero (TSA) es utilizado para

mejorar la calidad química del agua proveniente de una planta de tratamiento, utilizando el suelo como filtro para eliminar organismos patógenos, estabilización de parámetros químicos, absorción de compuestos orgánicos, etc., para su implementación se requieren grandes extensiones de terreno para la construcción de los tanques de infiltración (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017).

Tabla 11. Clasificación de técnicas MAR. Recuperado de Escolero, Gutiérrez, y Mendoza (2017).

CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS MAR		
Técnica	Tecnología	Clasificación
INFILTRA AGUA	Distribución	Cuencas y estanques de infiltración
		Tratamiento suelo-acuífero (TSA)
		Inundación controlada
		Riego
INTERCEPTAR AGUA	Pozos	Pozos de recarga someros
		ASR
		ASTR
INTERCEPTAR AGUA	Modificación de cauce de arroyos y ríos	Estanques de percolación a represas de control, gaviones
		Presas de arena para almacenamiento
		Presas subsuperficiales (subterráneas)
	Captación de agua de lluvia	Filtro de bancos de río (RBF)
		Filtración inter-dunar
		Técnicas de ampliación de los cauces
		Recolección de agua de lluvia
		Zanjas de infiltración, tinas ciegas, surcos, anillos de agua, jaguey y terraplenes

La inundación controlada utiliza como fuente principal una corriente superficial, de la cual un volumen controlado es conducido para ser esparcido en terrenos inundables. Entre sus ventajas está el bajo costo de construcción y mantenimiento, por otro lado la sedimentación será una desventaja, ya que esta disminuirá paulatinamente la capacidad de infiltración, así mismo será recomendado la implementación de bancos o

zanjas alrededor de la planicie de inundación con el objetivo de controlar el proceso de inundación en todo momento (Gale, 2005); la recarga por riego se da en las zonas bajo riego cuando no hay cultivos y existe agua en exceso, en este tipo de recarga habrá de prestar mayor atención a factores como la precipitación, irrigación, evapotranspiración, tipo de suelo o drenaje, ya que estas afectaran de manera directa la infiltración.

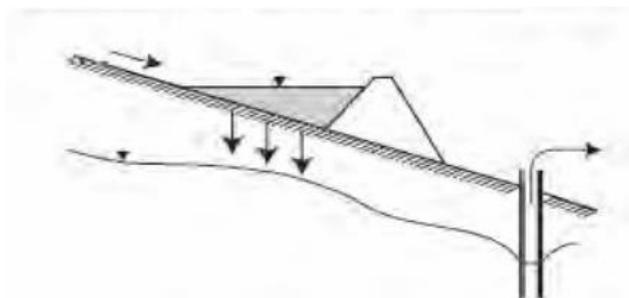


Figura 26. Tanque de infiltración o percolación. Recuperado de Lundh (2020).

La recarga con pozos (figura 27) busca infiltrar agua al acuífero mediante perforaciones someras, como es el caso de los pozos de recarga someros o pozos secos (Dry well), pudiéndose instrumentar en acuíferos con niveles freáticos altos con capas de material impermeable cerca de la superficie. Entre sus desventajas está el incremento en el costo de la estructura, la posibilidad de introducir contaminantes al subsuelo, o la obstrucción por sólidos en suspensión de las paredes del pozo (National Research Council, 1994), para prevenir esto, se deberá de dar tratamiento previo al agua que se vaya a inyectar, disminuyendo en esta instancia su carga en suspensión.

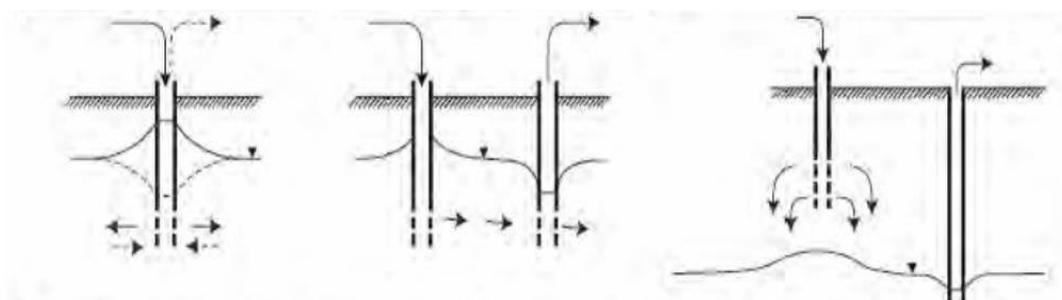


Figura 27. Diferentes pozos como método MAR. De izquierda a derecha: ASR, ASTR y pozos secos. Recuperado de Lundh (2020).

Los pozos ASR (almacenamiento y recuperación) utilizan un mismo pozo para recargar y extraer agua, cuya desventaja radica en que el agua recuperada puede estar influenciada por la química del agua que originalmente se inyectó; por otro lado, en los pozos ASTR (almacenamiento, transferencia y recuperación), a diferencia de los ASR, la recuperación del agua se hace desde un pozo ubicado lejos del pozo de inyección, disminuyendo así la influencia química entre el agua recargada y recuperada (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017).

Pasando a las tecnologías de interceptación de agua, estas son utilizadas predominantemente en regiones áridas. Consisten en estructuras que interceptan o detienen el flujo de corrientes de agua superficial, incrementando la recarga natural de los acuíferos. Las tecnologías de interceptación se pueden dividir en dos grupos: modificación de cauce de arroyos y ríos, y captación de agua de lluvia. Las tecnologías que modifican el cauce de arroyos y ríos se clasifican de acuerdo con Escolero, Gutiérrez, y Mendoza (2017) en: estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones; presas de arena para almacenamiento (figura 28), cuyo vaso de almacenamiento es relleno con arena para disminuir la evaporación; presas subsuperficiales (subterráneas), en donde la construcción de una barrera impermeable origina la elevación del nivel freático, cumpliendo el doble propósito de almacenamiento y como barrera a la intrusión marina en zonas costeras; filtración ribereña (RBF, por sus siglas en inglés de river bank filtration), en el cual se induce el flujo de agua superficial a través de los sedimentos permeables del subsuelo (figura 29); filtración inter-dunar (figura 30), útil en zonas costeras, y técnicas de ampliación de los cauces, en donde se amplía el área mojada y la capacidad de infiltración; por último dentro de las modificaciones en ríos y cauces esta la implementación de diques en forma de “L” con el que se reduce la velocidad de flujo superficial, con el eventual aumento en la infiltración. Esta técnica no será viable en ríos o arroyos con inundaciones repentinas violentas, ya que los diques podrían ser destruidos.

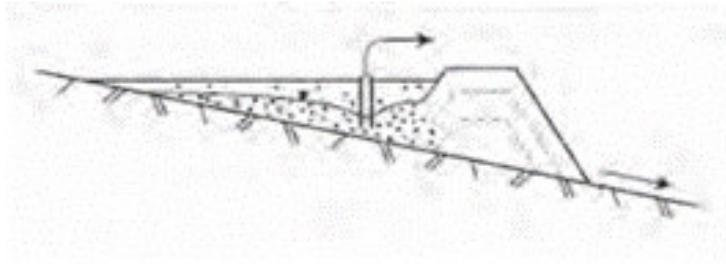


Figura 28. Presas de arena para almacenamiento. Recuperado de Lundh (2020).

Las modificaciones a los ríos se aplicarán a la escala requerida en cada sitio, dependiendo de las características del terreno y la hidrología del lugar. A pesar de la mayoría de los beneficios que representa esta técnica, al igual que el resto de las técnicas MAR, habrá que considerar sus desventajas, como la colmatación o la evidente intervención del balance hídrico, por lo que siempre se deberá evitar el impacto a terceros.

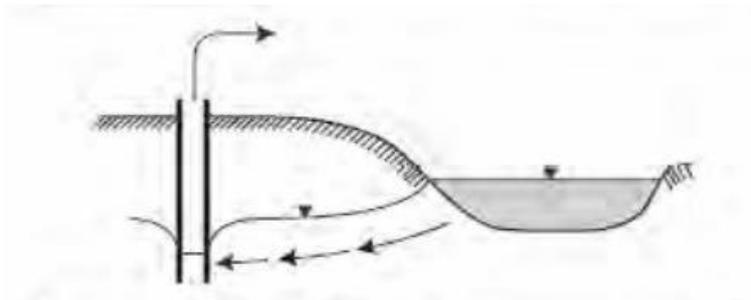


Figura 29. Filtración ribereña. Recuperado de Lundh (2020).

Por último, las técnicas de captación de agua de lluvia buscan interceptar el agua de lluvia, colectarla y almacenarla para su uso posterior; la recolección se puede realizar en techos de casas u otras estructuras urbanas (centros comerciales, edificios o desarrollos habitacionales) mediante tuberías y depósitos artificiales, zanjas de infiltración, surcos, tinas ciegas o terraplenes. Se trata de obras económicas y simples de implementar, pero que habrá de ser cuidadosos ante la amenaza de coleccionar agua contaminada, sobre todo en zonas urbanas.

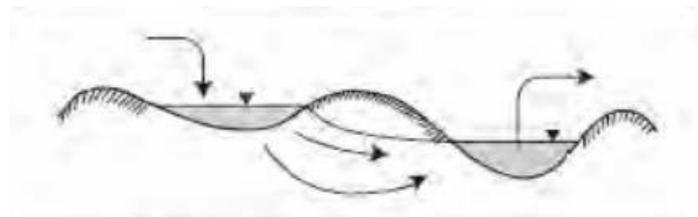


Figura 30. Filtración inter-dunar. Recuperado de Lundh (2020).

Definidas las técnicas MAR, cabe reiterar que la implementación exitosa de una u otra técnica dependerá de las características geográficas y físicas de la región en la que se busca ejecutar, sus parámetros climáticos, así como de la capacidad económica y técnica que se disponga para la adaptación e instrumentación de las distintas obras de recarga; por lo que el abanico de posibilidades en cuanto a técnicas disponibles es enorme.

3.8.2 Colmatación y calidad del agua de recarga

El principal problema que presentan tanto las obras de recarga superficiales como profundas es mantener la capacidad de carga a lo largo del tiempo, y esto depende sobre todo de la calidad del agua de recarga. Se le denomina colmatación al proceso de acumulación de materiales en las proximidades de la superficie de entrada del agua, reduciendo la tasa de infiltración o caudal específico. Cabe distinguir cuatro formas principales de reducción progresiva de la capacidad de recarga (Sukia, 2009): por alteración de la superficie del suelo, por sedimentación de la materia en suspensión, por actividad biológica y por precipitación mineral.

Para disminuir en lo posible el ritmo de colmatación de las obras de recarga se procede al pretratamiento del agua a recargar; se considera un sistema de pretratamiento cualquier dispositivo o sistema utilizado para reducir la cantidad de contaminantes, eliminarlos o alterar la naturaleza de sus propiedades en el agua antes de su introducción al acuífero; estos sistemas pueden ser desde una simple decantación, hasta la construcción de diques en ríos o acueductos, la implementación de filtros de arena para recarga por pozos, o inclusive instalaciones complejas similares a una planta de potabilización (Sukia, 2009). Si bien para mantener la capacidad de

infiltración de una obra, será necesario en la mayoría de los casos, desazolvar la superficie de infiltración después de un determinado periodo de tiempo, el ritmo de colmatación se controlará reduciendo los parámetros que lo causan, no obstante, hay que tener en cuenta que siempre se tendrá el problema de la colmatación por muchas medidas que se tomen (Sukia, 2009); se trata por lo tanto de reducirlo en la manera de lo posible, haciendo un balance de costes económicos, cantidad de agua tratada, etc.

Además de la colmatación por la materia en suspensión habrá que considerar la calidad química del agua de recarga, la cual cobra relevancia cuando el agua que se pretende recargar pueda ser utilizada posteriormente en zonas de descarga como manantiales o pozos sin ningún tipo de tratamiento, ya que la carga de contaminantes en la esorrentía de zonas agrícolas puede incluir residuos de plaguicidas y fertilizantes. Además de los elementos químicos, otros parámetros indicadores de la calidad del agua serán los sólidos disueltos, nutrientes, compuestos orgánicos, aspectos bacteriológicos, virológicos, radiológicos u organolépticos.

Es importante señalar que los límites permisibles de contaminantes en el agua no serán los mismos para cada país, así mismo, estos límites serán diferentes según el uso que vaya a tener el agua. Por lo que será necesario consultar la normativa que expida cada país con el objetivo de conocer los límites de contaminantes que para cada situación en particular se exigen.

3.9 Normatividad

Las normas aplicables en este proyecto de tesis son las siguientes:

- **Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”**. Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de

abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

- **Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, “Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y el agua”.** Esta NOM tiene como objetivo proteger la calidad del agua de los acuíferos y aprovechar el agua pluvial y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial.
- **Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, “Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis”.** Esta Norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional y tiene por objetivo establecer las especificaciones técnicas de muestreo y análisis de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, a partir de sus características específicas de constitución, formación y distribución.
- **NOM-230-SSA1-2002, “Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.”** Esta Norma establece los requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua, para preservar la calidad del agua para uso y consumo humano, así como los procedimientos sanitarios para su muestreo.

CAPÍTULO IV. MARCO DE REFERENCIA

En el presente trabajo se retomará la metodología propuesta por Matus, Faustino, y Jiménez (2009) en el trabajo *“Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua”* para realizar la evaluación espacial multicriterio en el área de estudio y la determinación de zonas potenciales de recarga hídrica; del mencionado trabajo se retomará también el criterio de evaluación de la pendiente del terreno; en el caso de los parámetros de edafología, geología, uso de suelo y cobertura vegetal, densidad de fracturas y número de infiltración serán evaluados según los criterios propuestos por Bravo et al. (2015) en el artículo *“Identificación de áreas potenciales de recarga hídrica al acuífero Cuauhtémoc (Chihuahua), mediante una evaluación espacial multicriterio”*.

Cabe mencionar que en los trabajos *“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) y *“Propuesta de obras civiles para la recarga hídrica natural por lluvia en la comunidad de El Laurel, Guanajuato, México”* (Espinoza, 2019) se identificaba ya en la porción este y noreste de El Laurel un potencial de recarga hídrica favorable; sin embargo estas investigaciones limitaban el área de estudio desde unas decenas de metros al este de la comunidad El Laurel, para continuar hacia el oeste abarcando hasta la comunidad de Rosita de San Juan (figura 31). Por lo tanto, la fracción oriental de la zona representaba una importante área de interés para determinar el potencial de recarga hídrica, la cual ameritaba una evaluación exclusiva con el objetivo de definir la viabilidad y el sitio de implementación de una obra de recarga.

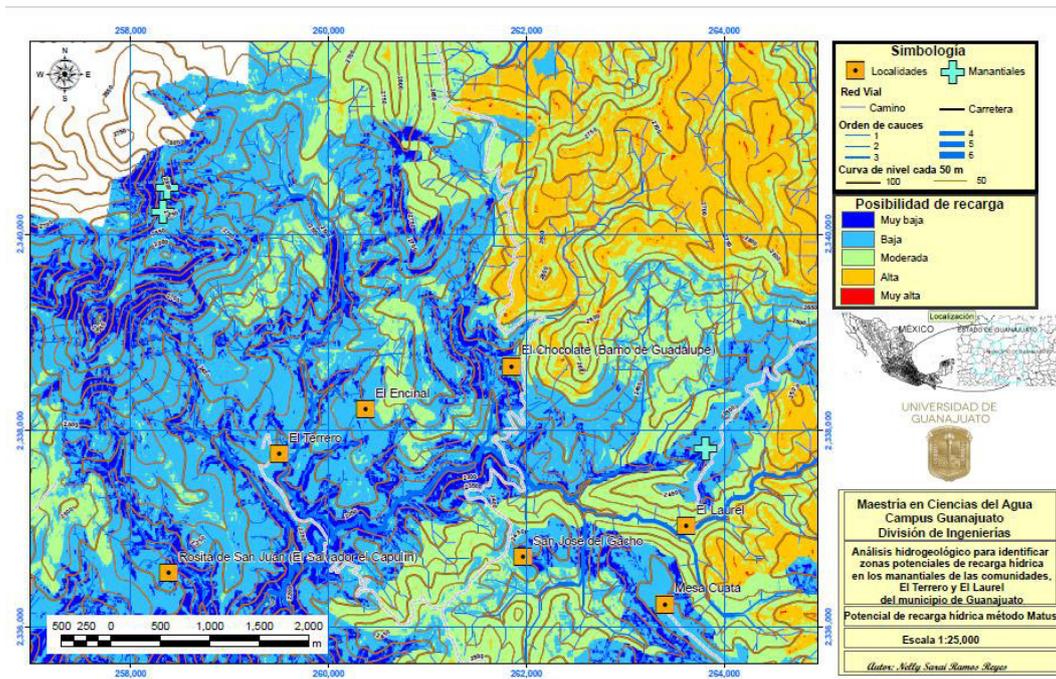


Figura 31. Mapa de zonas potenciales de recarga hídrica en El Laurel y El Terrero según el método Matus. Recuperado de Ramos (2018).

En la tesis de Ramos (2018) se identificó un manantial como sitio de descarga asociado a zonas de moderada a alta capacidad de recarga en las inmediaciones de la comunidad El Laurel. En dicho trabajo se registró el caudal de este manantial, mostraron un promedio de descarga de 100.1 l/s para los meses de mayor precipitación y 25.3 l/s en los meses de secas. Para la determinación de la calidad del agua de los manantiales se efectuó el muestreo del agua según la NOM-230-SSA1-2002 y se realizaron análisis fisicoquímicos. Propiedades físicas como la temperatura y el pH se midieron con un termómetro de mercurio y un potenciómetro Corning 610A; sólidos disueltos totales, cloro y conductividad eléctrica se determinaron a partir de pruebas in situ con un Kit de monitoreo ambiental HI3814, así mismo se realizaron pruebas organolépticas para analizar color, turbidez, olor y sabor. Para la calidad química, las muestras se sometieron a un Análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX), así como de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS). Los resultados obtenidos de calidad de agua fueron comparados con los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994; mismos que fueron mayormente

favorables, con excepción de algunos elementos como el Cr, As, Cd, Al o Pb los cuales excedían los límites permisibles por la NOM.

Para el presente trabajo se propone realizar un Análisis de Fluorescencia de Rayos X para la determinación de la calidad química del agua, pero en esta ocasión para el agua de recarga, evaluación que hasta el momento no se ha realizado en el área de estudio. Para la determinación del balance hídrico de la microcuenca estudiada se aplicará la metodología propuesta por Schosinsky (2006) en su artículo *“Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un Balance Hídrico de Suelos”*. Finalmente para la propuesta del diseño de obra de recarga se tomará como referencia principal el trabajo *“Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica”* de Escolero, Gutiérrez, y Mendoza (2017) gracias a los numerosos ejemplos de aplicación de técnicas MAR que en él se presentan.

CAPÍTULO V. METODOLOGÍA

El proyecto de tesis se desarrolló fundamentalmente en cuatro etapas. En una primera instancia se desarrollaron los mapas temáticos de las características biofísicas del área de estudio, con el objetivo de realizar una evaluación espacial multicriterio que permitió identificar las zonas potenciales de recarga dentro del área. En la siguiente etapa se determinó el volumen de agua que infiltra al acuífero dentro de los límites de la microcuenca, mediante el cálculo del balance hídrico de suelos propuesto (Schosinsky, 2006). Como penúltima etapa se analizó la calidad del agua de recarga en la microcuenca y finalmente, tomando como referencia distintas obras de recarga implementadas con éxito, se propuso el diseño de una obra de recarga para la comunidad de El Laurel como parte de la implementación de los métodos de Gestión de Recarga de Acuíferos en la zona.

CAPÍTULO VI. MÉTODO EMPLEADO

El método empleado se divide en cuatro etapas (figura 32) que se describen a continuación.

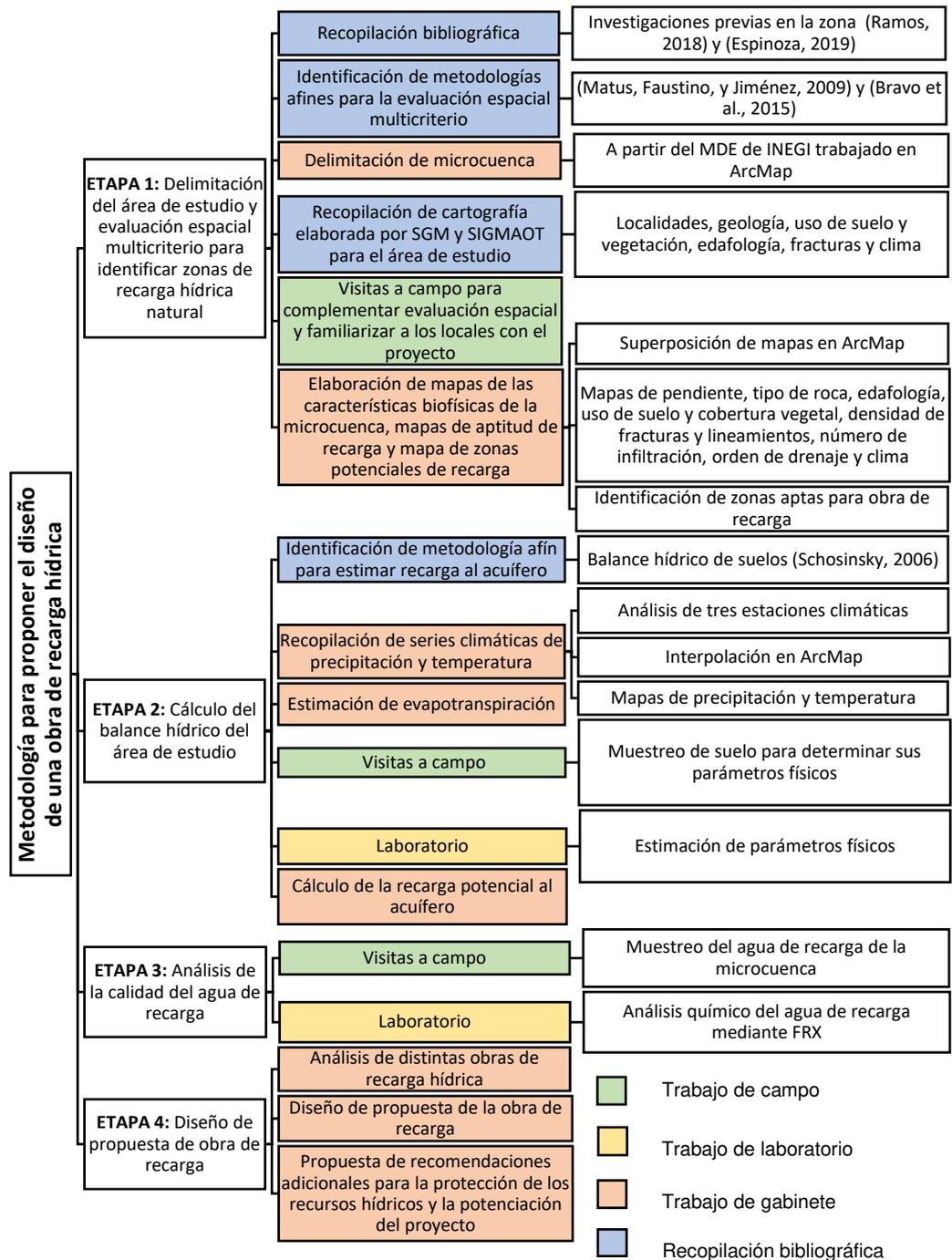


Figura 32. Método empleado para el proyecto de tesis. Elaboración propia (2021).

ETAPA 1: Delimitación del área de estudio y evaluación espacial multicriterio para identificar zonas de recarga hídrica natural

Se realizó una amplia recopilación bibliográfica de la información que resultará útil para delimitar la zona de estudio y la caracterización del área. A partir de la georreferenciación y caracterización realizada por Ramos (2018) a tres manantiales localizados en las comunidades El Laurel y El Terrero, se pudo inferir que las zonas de recarga hídrica asociadas a estos puntos de descarga se ubican hacia la porción oriental de la comunidad El Laurel (Espinoza, 2019), por lo que para este trabajo la evaluación espacial para identificar zonas potenciales de recarga se centró en dicha zona. En esta primera fase de la etapa uno también se realizó una amplia búsqueda de aspectos biofísicos presentes en el área, como rasgos geomorfológicos, geología, tipos de suelos, cobertura vegetal, información meteorológica e hidrometeorológica.

Identificación de metodologías afines para la evaluación espacial multicriterio

Para el objetivo del proyecto se optó por seguir la metodología propuesta por Matus, Faustino, y Jiménez (2009) la cual se describió ampliamente en el capítulo 3.5.2. Para el modelo del presente trabajo se consideran los elementos biofísicos de pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso de suelo; además, se evalúa también la densidad de fracturas y lineamientos y el número de infiltración propuestos por Bravo et al. (2015) al considerarse que la zona presenta una compleja geología, en donde las fracturas pueden jugar un papel importante en la recarga hídrica.

Delimitación de la microcuenca

La delimitación de la microcuenca de estudio se hizo a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) de Alta resolución LiDAR con resolución de 5 m desarrollado por el INEGI. Para abarcar una amplia extensión del área de estudio se realizó un mosaico en el SIG ArcMap 10.4.1 con los MDE

correspondientes a las cartas F14C43A3, F14C43A4, F14C43B3, F14C43D1, F14C43D2 y F14C43E1. Para obtener la delimitación automática, a este mosaico se aplicaron las Herramientas Hidrológicas de Análisis Espacial disponibles en ArcMap de “Flow Direction”, “Flow Accumulation”, y para la obtención del polígono de la microcuenca, la herramienta “Watershed”. El punto de desfogue necesario para la delimitación topográfica de la microcuenca se estableció 50 m al oriente de la comunidad El Laurel, con el objetivo de que la posible agua de recarga de una obra civil no sea sometida a contaminación por intervención antrópica.

Recopilación cartográfica y visita a campo

Las capas (.shp) de clima, uso de suelo y vegetación, edafología, fracturas, ciudades y localidades se obtuvieron a través del Subsistema de Información Geográfica, Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial y Urbano (SIGMAOT, 2020); en el caso de la geología se utilizó como referencia la carta Geológica-Minera GUANAJUATO F14-C43 Escala 1:50,000. En esta etapa se efectuó también una visita a campo con el objetivo de familiarizar a los habitantes de la comunidad El Laurel con el proyecto de investigación, lo que sirvió también para verificar y complementar la información recabada al realizar una evaluación in-situ de las características biofísicas del terreno en compañía y apoyo de los actores locales.

Elaboración de mapas de las características biofísicas de la microcuenca, mapas de aptitud de recarga y mapa de zonas potenciales de recarga

Para generar las unidades de mapeo de las características biofísicas de la microcuenca se utilizó la información recabada en el apartado anterior y se trabajó también con los datos obtenidos durante el recorrido en campo. Se utilizó el SIG ArcMap 10.4.1 para los análisis geoespaciales y QGIS 3.10.9 para la elaboración de mapas. Para su incorporación posterior en todos los mapas, se desarrollaron inicialmente las capas de curvas de nivel, red

hídrica y orden de drenaje a partir del mosaico MDE y la aplicación de las herramientas en ArcMap 10.4.1 de “Contour”, “Flow Accumulation” y “Stream Order” respectivamente. La imagen base del área fue obtenida de Google Earth Pro, el cual detalla que la fotografía fue realizada el 4 de enero del año 2019. A continuación, se describen los métodos empleados para la elaboración de cada mapa.

a) Mapa de clima

Se elaboro a partir de la capa de climas del estado de Guanajuato publicada por el SIGMAOT, la cual se recortó en ArcMap para considerar únicamente el área de la microcuenca de estudio.

b) Mapa de red hídrica y orden de drenaje

Se realizó a partir del mosaico hecho con las cartas del Modelo Digital de Elevación (MDE) de Alta resolución LiDAR con resolución de 5 m desarrollado por el INEGI. La red hídrica se obtuvo con la herramienta hidrológica en ArcMap de “Flow Accumulation”, y el orden de drenaje se obtuvo mediante la herramienta “Stream Order”; en esta última se seleccionó el método de Strahler para su clasificación.

c) Mapa de pendientes

Se elaboró a partir de la aplicación de la herramienta “Slope” al MDE en ArcMap, donde una vez obtenida la capa ráster de pendientes, se realizó su reclasificación en un rango de 1 a 5 según la ponderación de la posibilidad de recarga propuesta por Matus, Faustino, y Jiménez (2009), con la cual se elaboró el mapa de aptitud para recarga hídrica según la pendiente del terreno.

d) Mapa de edafología o tipo de suelo

Se elaboro a partir de la capa de tipos de suelo del estado de Guanajuato publicada por el SIGMAOT, la cual se recortó en ArcMap para considerar únicamente el área de la microcuenca de estudio. Para la elaboración del mapa de aptitud de recarga hídrica según el tipo de suelo, se realizó la

reclasificación de los suelos presentes en el área en un rango de 1 a 5 según la ponderación de posibilidad de recarga propuesta por Bravo et al (2015).

e) Mapa de geología

Para su elaboración se digitalizó en ArcMap la geología de la microcuenca según la carta Geológica-Minera GUANAJUATO F14-C43 Escala 1:50,000. La construcción del mapa de aptitud de recarga hídrica según el tipo de roca se realizó a partir de la reclasificación en un rango de 1 a 5 de las unidades rocosas presentes en el área según la ponderación de posibilidad de recarga propuesta por Bravo et al (2015).

f) Mapa de uso de suelo y cobertura vegetal

Se elaboró a partir de la capa de uso de suelo y vegetación del estado de Guanajuato para el año 2018 publicada por el SIGMAOT, la cual se recortó en ArcMap para considerar únicamente el área de la microcuenca de estudio. Para la elaboración del mapa de aptitud de recarga hídrica según el uso de suelo y cobertura vegetal, se realizó la reclasificación de las unidades presentes en el área en un rango de 1 a 5 considerando la ponderación de posibilidad de recarga propuesta por Matus, Faustino, y Jiménez (2009) y Bravo et al (2015).

g) Mapa de densidad de fracturas y lineamientos

Se desarrolló a partir de la capa de fracturas en el estado de Guanajuato publicada por el SIGMAOT. Para obtener la capa de densidad de fracturas se ejecutó la herramienta de análisis espacial en ArcMap de "Line Density" a la capa de fracturas. A continuación, para la elaboración del mapa de aptitud de recarga hídrica según la densidad de fracturas, se realizó la reclasificación de las densidades de fracturas en un rango de 1 a 5 considerando la ponderación de posibilidad de recarga propuesta por Bravo et al (2015).

h) Mapa de número de infiltración

Para su elaboración se utilizó la capa de red hídrica creada a partir del MDE y el polígono correspondiente al área delimitada de la microcuenca. La densidad de drenaje se calculó mediante la aplicación de la Ecuación 5, la frecuencia de escorrentía se calculó mediante la Ecuación 4 y finalmente el número de infiltración se obtuvo a partir de la Ecuación 6. Estos tres cálculos se realizaron de manera semiautomática con la calculadora de ArcMap utilizando la tabla de atributos tanto de la red hídrica como la del polígono de la microcuenca. Para la elaboración del mapa de aptitud se procedió a la reclasificación de la capa de número de infiltración en un rango de 1 a 5 según la ponderación de posibilidad de recarga propuesta por Bravo et al (2015).

i) Mapa de zonas potenciales de recarga

Para la obtención de este mapa se utilizó la herramienta de análisis espacial “Weighted Overlay” en ArcMap, pudiendo aplicar de manera automática las Ecuaciones 3 y 8. Con ella se hizo una superposición ponderada con las capas de aptitud de recarga de pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, uso de suelo y cobertura vegetal, densidad de fracturas y número de infiltración, con el objetivo de obtener una nueva capa con valores en un rango de 1 a 5 representando los diferentes potenciales de recarga presentes en la microcuenca. El análisis de jerarquías o peso otorgado a cada factor se asignó a partir de las características específicas de cada elemento biofísico en el área, de la asesoría de los habitantes de la zona y de los valores sugeridos en la literatura.

ETAPA 2: Estimación de la recarga potencial al acuífero

Identificación de metodología afín para estimar la recarga potencial al acuífero

Se propone aplicar la metodología propuesta por Schosinsky (2006) la cual permite estimar la recarga potencial a un acuífero mediante el cálculo del balance hídrico de suelos. Se optó por utilizar esta metodología ya que para su aplicación se requieren conocer de manera previa únicamente los datos meteorológicos de temperatura y precipitación del área estudiada, los cuales son comúnmente registrados por cualquier estación climática; así como los parámetros físicos del suelo de: humedad inicial, punto de marchitez, capacidad de campo, infiltración básica y densidad aparente; mismos que pueden ser determinados en un laboratorio de suelos, o bien pueden ser aproximados mediante una serie de tablas y ecuaciones propuestas por el propio autor, las cuales se describen ampliamente en los anexos A y B.

Procesamiento de series climáticas

Para la obtención de los valores climáticos de precipitación media mensual, temperatura media mensual, temperatura media mensual máxima y temperatura media mensual mínima del área de estudio se procesaron las series climáticas de las tres estaciones climatológicas más cercanas a la microcuenca El Laurel: Estación La Luz, Estación Ciénega de Negros y Estación Santa Julia. Con el objetivo de generar valores medios representativos para el área de la microcuenca, se realizó un conjunto de interpolaciones por el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW) en ArcMap de las tres estaciones y sus parámetros meteorológicos para cada mes del año. Una vez generadas las capas ráster de interpolación, estas fueron cortadas de acuerdo con el polígono de la microcuenca y convertidas a capas de puntos para poder obtener sus valores medios. Finalmente se generaron dos mapas: precipitación media anual y

temperatura media anual, mediante la suma de las capas ráster de interpolación mensual de precipitación y temperatura, respectivamente.

Estimación de la evapotranspiración potencial de la microcuenca

Para la estimación de la evapotranspiración potencial se aplicó la Ecuación 16, propuesta por Hargreaves y Samani (1985), ya que solo requiere datos climáticos mensuales de temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar. Para la estimación de la radiación solar se utilizó la Ecuación B7 y la tabla A9.

Determinación de parámetros físicos del suelo

Para la determinación de los parámetros físicos del suelo se realizaron dos muestreos de suelo en el área de estudio y se analizaron en el laboratorio de mecánica de suelos (Sede La Perlita, Universidad de Guanajuato). Para su recolección y transporte se utilizaron dos bolsas de plástico con capacidad de 10 L, las cuales fueron selladas y marcadas para su identificación. Los muestreos se realizaron en sitios con perfiles de suelo expuestos y bien diferenciados, procediendo a recolectar las muestras con ayuda de una pala metálica de manera vertical, procediendo desde la parte superior hasta la parte inferior del perfil edafológico. Los parámetros determinados en laboratorio fueron: Granulometría; Clasificación SUCS; Masa volumétrica natural (g/cm^3); Masa específica relativa de los sólidos; Relación de vacíos; Porosidad total (%); Permeabilidad (mm/día); Humedad (%) y Contenido de materia vegetal (%).

Determinación de la recarga potencial al acuífero

Para su determinación se programó en una hoja de cálculo las ecuaciones propuestas por Schosinsky (2006) en su metodología para la determinación de la recarga potencial a un acuífero mediante un balance hídrico de suelos (Anexo B). Para su estimación se utilizaron las series climáticas de precipitación media mensual, temperatura media mensual, temperatura media mensual máxima, temperatura media mensual mínima y evapotranspiración potencial. Los parámetros físicos del suelo

determinados en el laboratorio se utilizaron para establecer los valores de infiltración básica del suelo (F_c), humedad inicial (H_{si}), capacidad de campo (CC) y densidad aparente (D_a). En el caso del resto de parámetros físicos necesarios para el cálculo del balance hídrico como K_p , K_v , punto de marchitez (PM) y profundidad de las raíces (PR), se aproximaron mediante las tablas propuestas en el Anexo A.

ETAPA 3: Análisis de la calidad del agua de recarga

Muestreo del agua

Se recolectaron dos muestras de agua sobre el río principal de la microcuenca en la época de lluvias. La primera muestra se tomó 150 m aguas abajo de la comunidad El Laurel, y la segunda 100 m aguas arriba, esto con la finalidad de identificar una posible influencia antropogénica en su calidad química. Para el muestreo, preservación y manejo de las muestras de agua se optó por apegarse a la NOM-230-SSA1-2002 (Procedimientos sanitarios para el muestreo). La recolección y almacenamiento de muestras se realizó en recipientes de polietileno de 1000 ml, los cuáles se rotularon indicando el código asignado para su identificación.

Durante el muestreo se evitó la contaminación de la tapa, boca e interior de los envases, realizando la recolección de las muestras de la siguiente manera: se tomó un poco de agua de la fuente a analizar, se cerró el envase y se agitó enérgicamente para enjuagar, desechando dicha agua, finalmente, tras efectuar esta operación dos veces, se procedió a la recolección de la muestra. Su transporte a laboratorio se realizó a temperatura ambiente.

Análisis de laboratorio

Para el análisis químico de las muestras de agua se empleó la técnica de Fluorescencia de Rayos X (Laboratorio LICAM, Departamento de Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato). En total se realizaron doce ensayos para cada una de las muestras de agua:

- Tres ensayos centrifugados por cinco minutos a 3500 rpm para determinar la presencia y concentración de metales (S, Cl, Cr, Ni, As, Pb, Na, Mg, K, Ca, Sr, Rb, Cs, Ba, Ra, Fr, Sc, Ti, Y, Zr, Hf, Ta, Nb, V, Mo, W, Mn, Tc, Re, Os, Ru, Fe, Co, Rh, Ir, Pt, Pd, Cu, Ag, Au, Hg, Cd, Zn, Al, Si, P, Ge, Ga e In).

- Tres ensayos centrifugados por cinco minutos a 3500 rpm para determinar los óxidos presentes y su porcentaje de masa (Na_2O , MgO , K_2O , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , SO_3 , TiO_2 , MnO y Fe_2O_3).

- Tres muestras con 24 hr de reposo para determinar la presencia y concentración de metales.

- Tres muestras con 24 hr de reposo para determinar la presencia de óxidos y su porcentaje de masa.

Comparativa entre la calidad del agua de recarga y la calidad del agua de descarga

Obtenidos los resultados de Fluorescencia de Rayos X, los promedios de las concentraciones de metales presentes en el agua son comparados con los resultados obtenidos por Ramos (2018) para la determinación de metales presentes en el agua de descarga del manantial ubicado en la comunidad El Laurel. Así mismo, se comparan las concentraciones identificadas en las muestras con los límites permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 para el uso y consumo humano de agua.

ETAPA 4: Diseño de propuesta de obra de recarga

Análisis de las distintas obras MAR y su viabilidad para su implementación dentro de la microcuenca

Para la elección de la obra o las obras que pudieran ser implementadas con un alto grado de efectividad dentro del área, se realizaron un conjunto de tablas en las que se presentan las condiciones biofísicas deseables para la eficiente implementación de las distintas técnicas MAR descritas en el

capítulo 3.8.1, así como las ventajas y desventajas de su ejecución, permitiendo de esa manera establecer una comparación con las características biofísicas presentes en la microcuenca El Laurel, las cuales fueron definidas en la ETAPA 1. Para el objetivo del presente trabajo y tomando en cuenta las características del área de estudio, se ha optado por omitir la evaluación de las técnicas de inundación controlada, riego, ampliación de cauces, filtración inter-dunar y RBF, ya que, dada la naturaleza de su funcionamiento, su implementación quedaría descartada para la microcuenca. De la misma manera se omite el método de tratamiento suelo-acuífero, ya que este se encuentra orientado a la recarga de agua residual tratada, además de requerir grandes extensiones de terreno con poca pendiente. Se optará por considerar el tratamiento suelo-acuífero como un beneficio común producido por la mayoría de las técnicas de manejo de recarga de acuíferos.

Para la elección definitiva de las obras y las zonas de mayor interés para su implementación se evaluaron de manera conjunta el mapa de potencial de recarga hídrica, las tablas comparativas de ventajas y desventajas de cada tecnología MAR, las políticas ambientales implementadas en la zona, sus condiciones biofísicas y las propias necesidades medioambientales de la microcuenca.

Determinación de sitios viables de implementación para cada obra

Para la determinación de los sitios viables de implementación de las obras seleccionadas en el apartado anterior, se realizó una superposición de mapas en ArcMap para cada tipo de obra, considerando las capas de pendiente del terreno, cobertura vegetal y tipo de suelo, proponiendo como sitios viables aquellos cuyos rangos biofísicos se acoplan a los recomendados en la literatura para dichas obras. Los sitios y parcelas definitivos de implementación se sugieren a partir de la evaluación de los mapas de sitios viables, evitando que las áreas de implementación se superpongan, buscado así una distribución óptima para la totalidad de las obras dentro de la microcuenca.

Diseño de obras

Para el diseño de las obras se toman en cuenta las características meteorológicas y del terreno de cada ubicación y/o parcela, así como los procedimientos y consideraciones de diseño propuestos en la literatura para cada tipo obra. Finalmente, durante la descripción de la metodología de diseño para cada tipo de obra se desarrolla un ejemplo de aplicación para la microcuenca El Laurel.

Recomendaciones adicionales para la protección de los recursos hídricos en el área de estudio y la potenciación del proyecto

Se consideran para su establecimiento las medidas complementarias expuestas en la literatura para la protección de los recursos hídricos que generalmente se incorporan en los programas de gestión de recarga de acuíferos, como también se consideran las necesidades ambientales de la propia microcuenca.

CAPÍTULO VII. RESULTADOS

7.1 Descripción del área de estudio e identificación de zonas potenciales de recarga hídrica natural

Delimitación de la microcuenca

La microcuenca de estudio la cual se denominó “El Laurel” (figura 33) tiene un área de 15.6 km². Se trata de una microcuenca endorreica con forma ancha y corta, la cual presenta una orientación E-W; se encuentra ubicada dentro de las coordenadas 14 Q 263000 y 270000 E, 2334000 y 2340000 N. Topográficamente su cota más alta se sitúa en los 2,876 msnm y la más baja en 2,331 msnm.

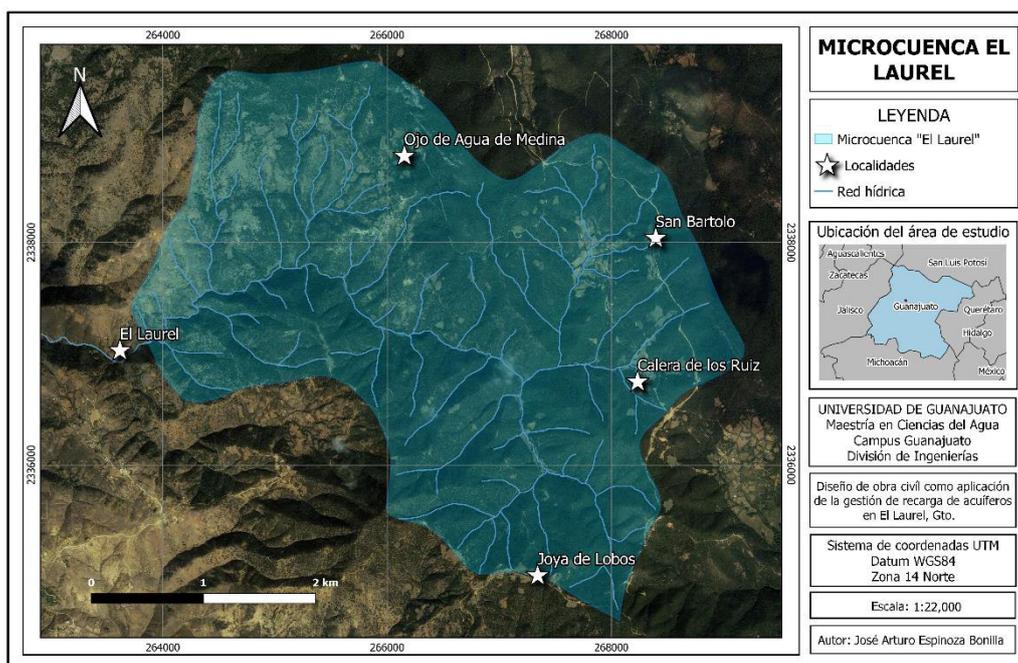


Figura 33. Delimitación de la microcuenca “El Laurel”. Elaboración propia (2020).

Clima

De acuerdo con la clasificación propuesta por Köppen (1936), el área presenta un clima Cw2 (figura 34), el cual corresponde a un clima de tipo templado-subhúmedo. Acorde con la Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica propuesta por el INEGI (2020), este tipo de clima presenta una temperatura media anual entre 12° y 18°C y una temperatura media del mes más frío entre -3° y 18°C, donde la temperatura durante el mes más caliente rara vez sobrepasa los 22°C. Con presencia de lluvias en verano y sequías en invierno, la precipitación anual se sitúa entre los 200 mm y los 1,800 mm, siendo menor a 40 mm durante el mes más seco (CONABIO, 1998). Las lluvias en verano tienen un índice P/T alto (eficiencia de la precipitación total en relación con la temperatura media anual) al ser mayor de 55.0, y un porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual (CONABIO, 1998).

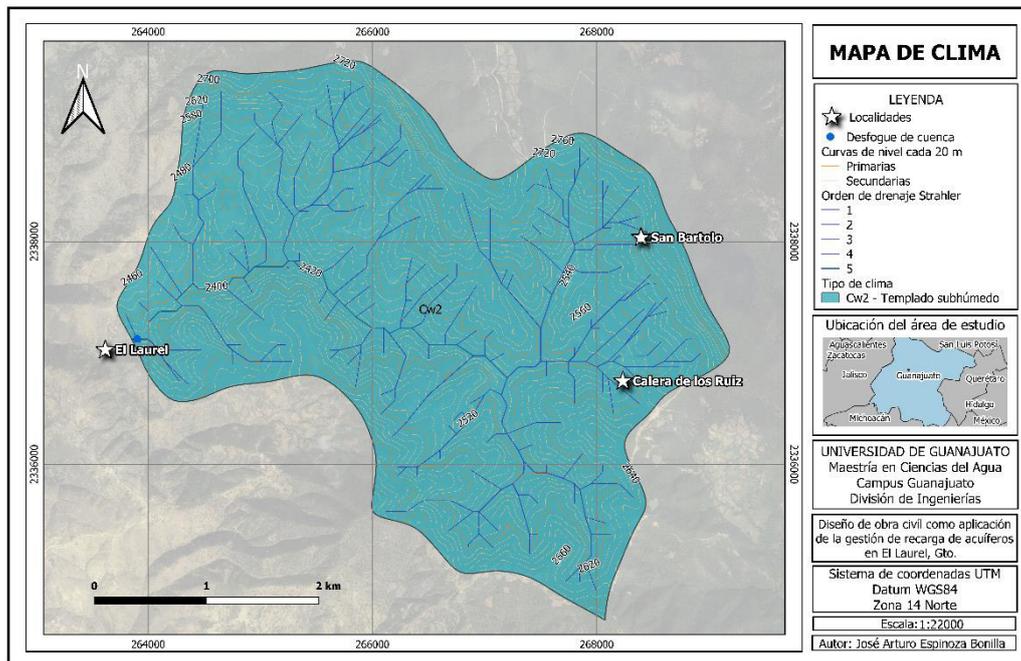


Figura 34. Mapa de clima. Elaboración propia (2020).

Red hídrica

La red hídrica dentro de la microcuenca (figura 35) presenta un patrón de drenaje dendrítico de régimen intermitente con una densidad de 4.15 km/km², que de acuerdo con Smith (1950) y Strahler (1957) corresponde a una densidad de drenaje gruesa, indicando un bajo potencial erosivo de la zona. Sin embargo, es necesario reiterar que la densidad de drenaje varía inversamente con la extensión de la cuenca, como también que la red de drenaje está fuertemente determinada por la resolución del MDE con la que fue obtenida. Si consideramos que la microcuenca representa un área pequeña con un alto desarrollo de drenaje (orden 5), se puede inferir que existe una erosión hídrica apreciable. La longitud total del cauce principal es de 4.217 km con dirección E-W, la diferencia de nivel entre el punto de desfogue y el punto hidrológicamente más alejado es de 292 m y la pendiente media del cauce principal es de 6.92%; parámetros que condicionan un tiempo de concentración para la microcuenca de 0.78 horas o 46.8 minutos.

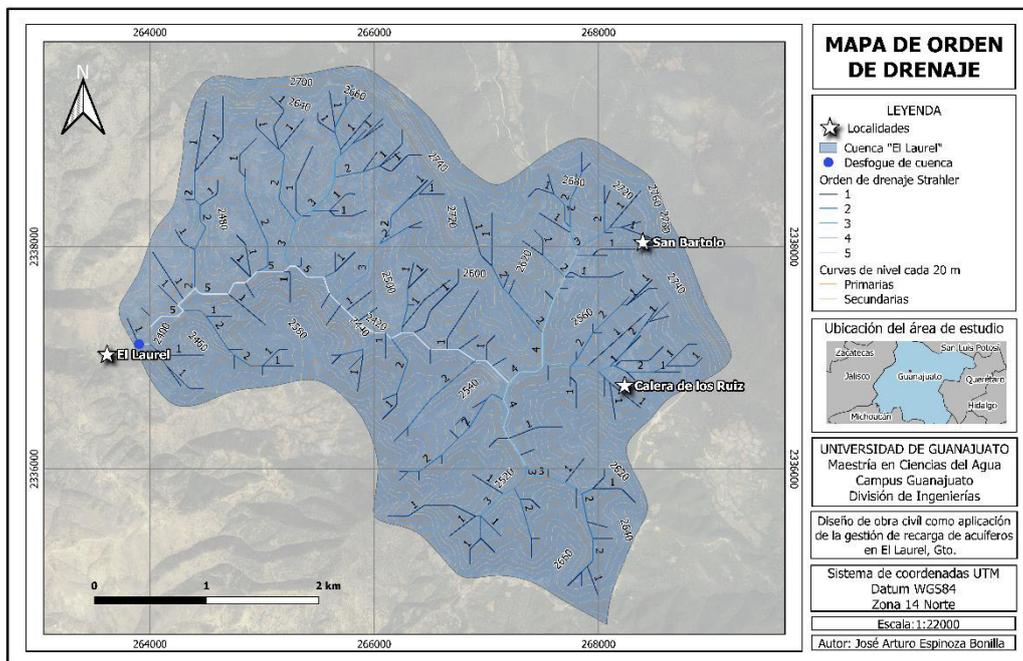


Figura 35. Mapa de orden de drenaje. Elaboración propia (2020).

Pendiente del terreno y aptitud para recarga

La microcuenca muestra sitios dispersos con pendientes planas entre 0 y 3.4°, así como algunas zonas ligeramente escarpadas con pendientes en el rango de 3.4 a 8.5°. Predominan sin embargo las pendientes mayores a 8.5°, llegando inclusive a encontrar zonas que oscilan entre los 50 y 79° buzando hacia los afluentes. Si bien el margen meridional del río principal presenta pendientes muy escarpadas, el curso en si exhibe pendientes casi planas o ligeramente escarpadas (figura 36).

El mapa de aptitud para recarga por pendiente del terreno (figura 37) muestra en su mayoría zonas con Media y Baja aptitud para la recarga. Sin embargo, sobre la red hídrica predominan pendientes bajas, lo que favorecería la infiltración.

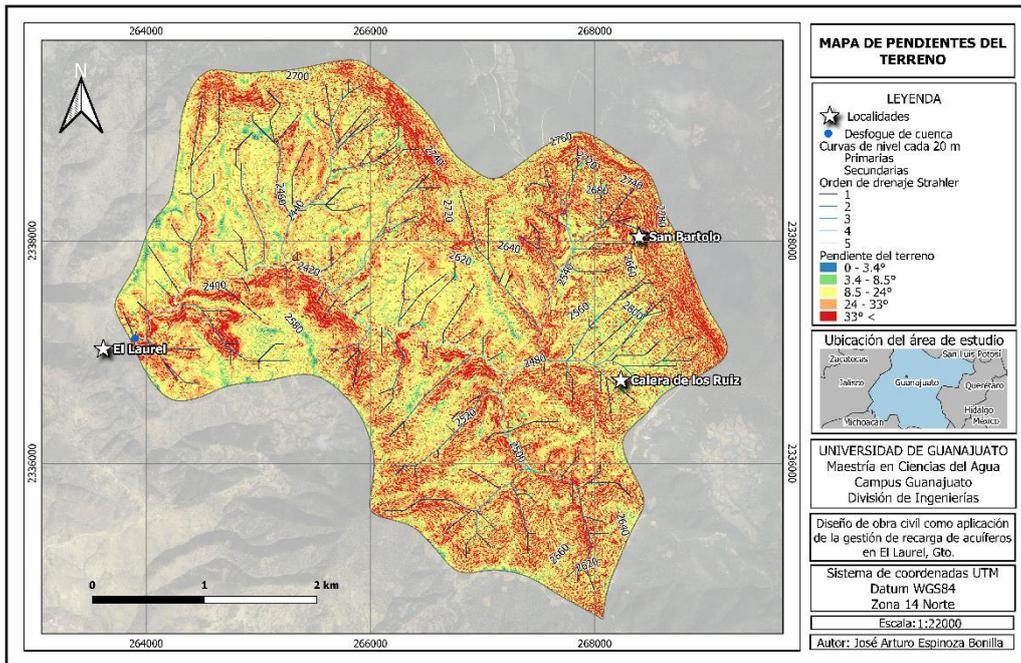


Figura 36. Mapa de pendientes del terreno. Elaboración propia (2020).

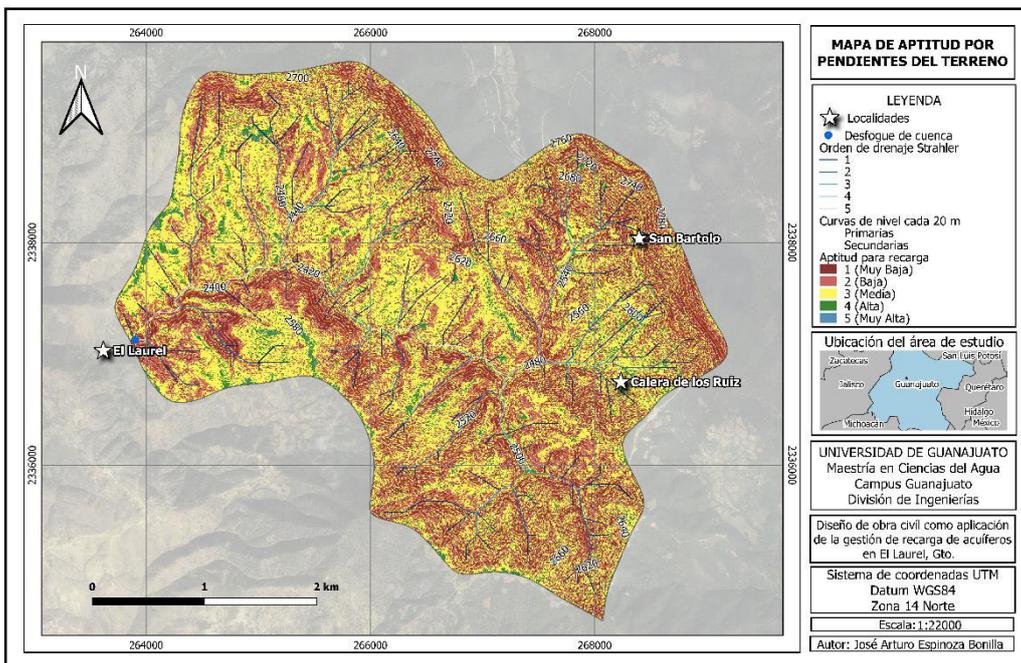


Figura 37. Mapa de aptitud por pendientes del terreno. Elaboración propia (2020).

Tipo de suelo y aptitud para recarga

La microcuenca presenta dos unidades de suelo bien diferenciadas (figura 38). Cerca del 95% del total de suelo presente en el área es Luvisol órtico (Lo+I+Hh/2c), mientras que el resto corresponde a Feozem lúvico (HI+3I/3c) ubicado en su mayoría en el límite occidental de la microcuenca. De acuerdo con la descripción propuesta por la FAO (2008), los Phaeozems o Feozem son suelos porosos, fértiles y oscuros ricos en materia orgánica, cuyo material parental se componen principalmente de materiales básicos no consolidados de origen eólico o till glaciario. Se trata de un suelo presente tanto en regiones húmedas como secas, con pendientes planas a onduladas, y cuya vegetación asociada son las praderas, los pastos altos y los bosques. Por otro lado, el Luvisol, es un suelo fértil que tiene un alto contenido de arcilla en el subsuelo como resultado de procesos pedogenéticos (migración de arcillas). Dicho suelo presenta como material parental una gran variedad de materiales no consolidados propios de depósitos de till glaciario, eólicos, aluviales y coluviales. Se presenta en regiones templadas frescas y cálidas, con tierras llanas o suavemente inclinadas (FAO, 2018).

El mapa de aptitud para recarga por tipo de suelo (figura 39) muestra que el área correspondiente al suelo tipo de Luvisol órtico (Lo+I+Hh/2c) presenta una aptitud Baja para la recarga. Por otro lado, el tipo Feozem lúvico (HI+3I/3c) muestra una aptitud Media; pues si bien este tipo de suelo es más poroso, la unidad presente en el área de estudio se encuentra asociada a un horizonte árgico (arcilloso) que disminuye su permeabilidad.

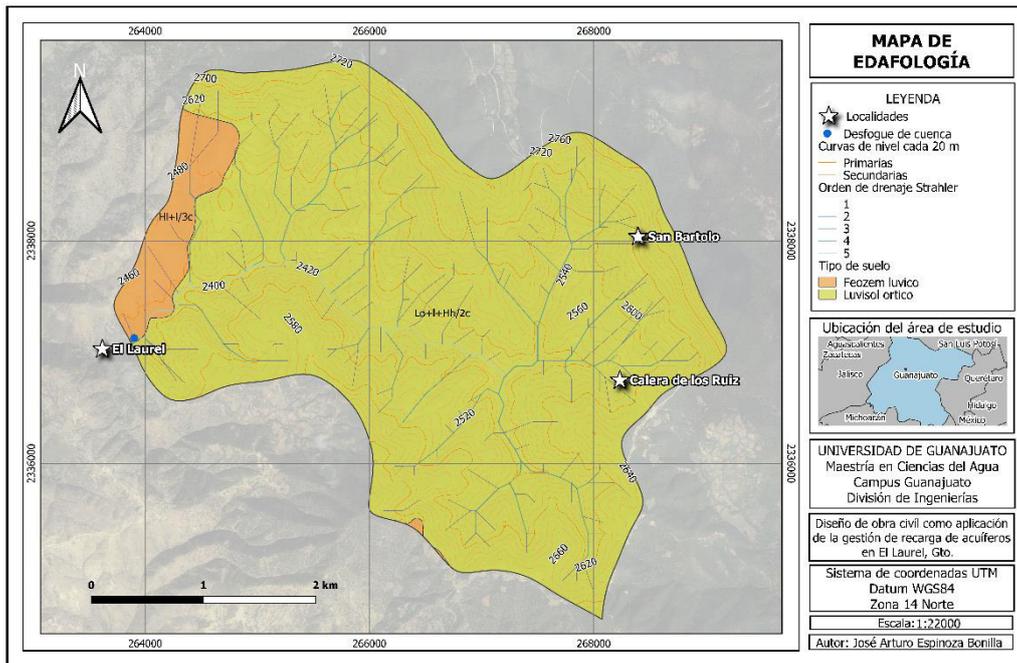


Figura 38. Mapa de edafología o tipo de suelo. Elaboración propia (2020).

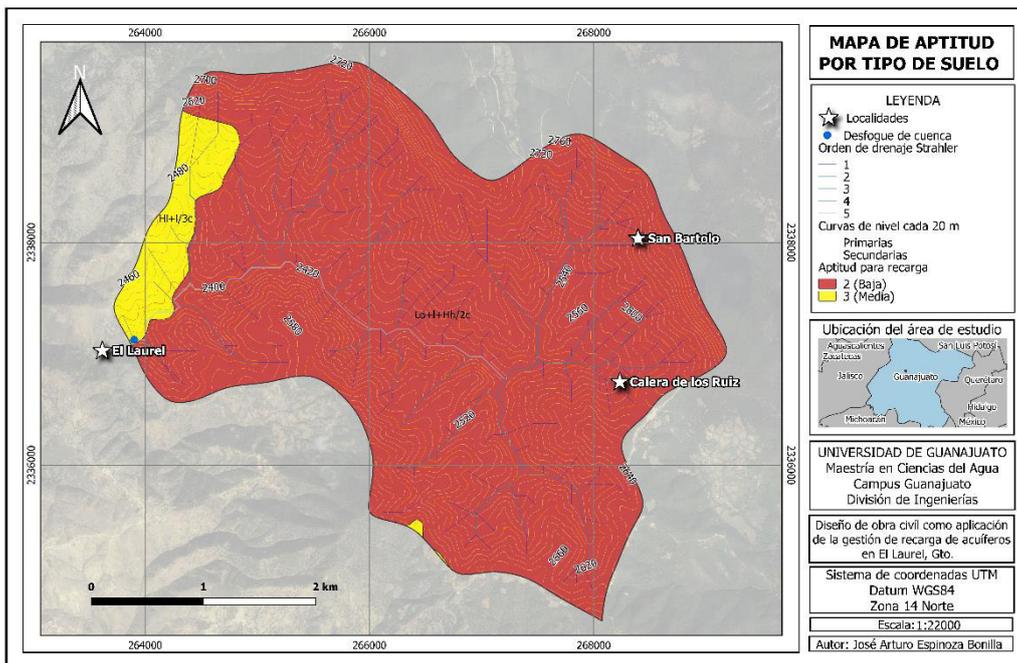


Figura 39. Mapa de aptitud por tipo de suelo. Elaboración propia (2020).

Tipo de roca y aptitud para recarga

La microcuenca de El Laurel se encuentra en su gran mayoría sobre roca metavolcánica sedimentaria (JsKi(?)MV_s) del Cretácico Inferior (± 120 Ma), perteneciente a la denominada Secuencia Esperanza. En el sur y noroeste afloran lavas submarinas de composición basáltica (JsKi(?)B) del Jurásico Superior (± 108 Ma) interestratificadas con tobas del mismo periodo, las cuales forman parte de la llamada Unidad Basáltica La Luz. Por último, y suprayaciendo estratigráficamente a las rocas de la Secuencia Esperanza y la Unidad La Luz, se encuentran importantes flujos de toba riolítica y riolita (ToTR-R) del Terciario Temprano (± 32.5 Ma) aflorando a lo largo del límite septentrional de la microcuenca.

El mapa de aptitud para recarga por tipo de roca (figura 41) muestra que la roca metavolcánica sedimentaria (JsKi(?)MV_s) presenta una Alta aptitud para la recarga, gracias a la porosidad secundaria generada por los sistemas de fallas y fracturas que la afectan, sobre todo en el oeste y sureste de la microcuenca. Por su parte los flujos de toba riolítica y riolita (ToTR-R) presentan una Baja aptitud, y finalmente, las lavas basálticas (JsKi(?)B) presentan una aptitud Muy Baja para la recarga hídrica.

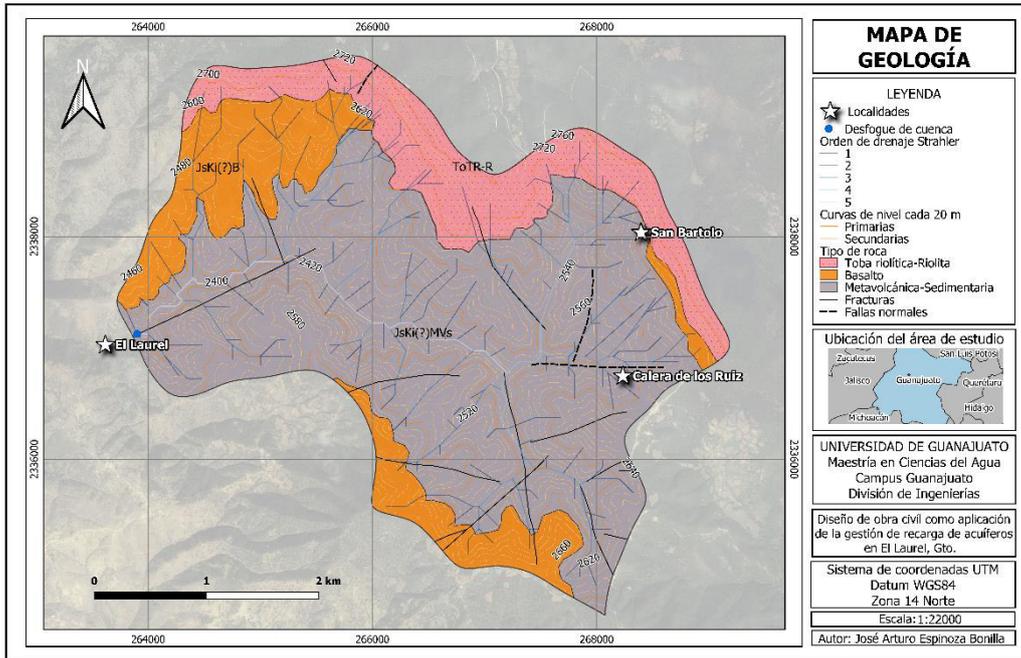


Figura 40. Mapa de geología. Elaboración propia (2020).

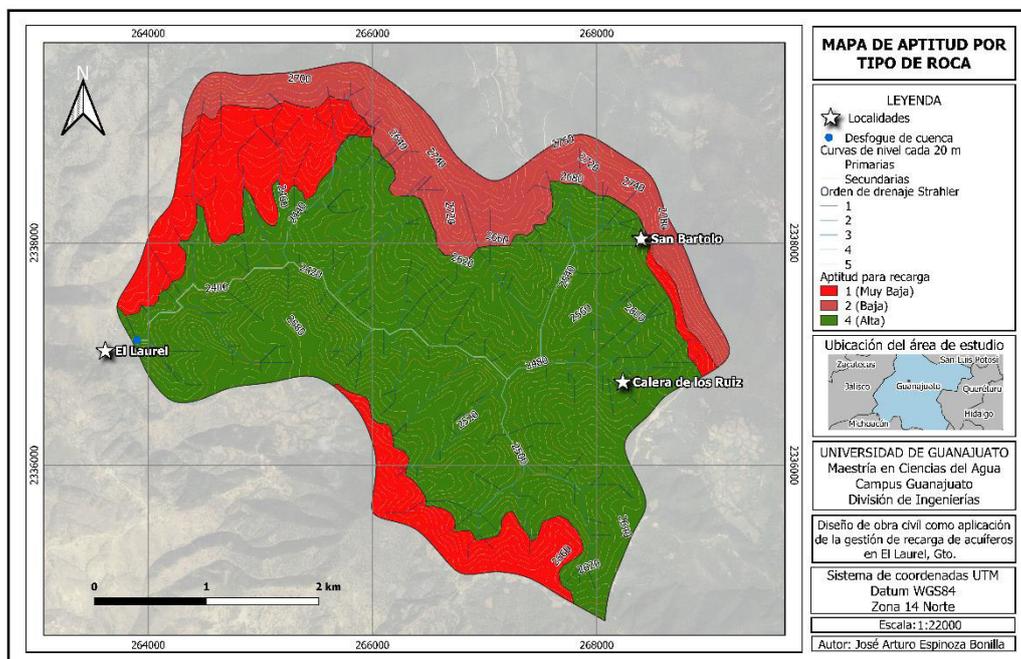


Figura 41. Mapa de aptitud por tipo de roca. Elaboración propia (2020).

Uso de suelo y cobertura vegetal y aptitud para recarga

Se identifica que más del 70% de la microcuenca presenta una cobertura vegetal perenne de bosques de encino (figura 42). Se trata de comunidades vegetales características de climas templados subhúmedos con inviernos secos, cuyas formaciones son en su mayoría densas o cerradas, habiendo también encinares con árboles separados por amplios espacios cubiertos por arbustos y herbáceas (Universidad Nacional Autónoma de México, 2020). En el noroeste se identifica una extensa área cubierta por bosque de encino perturbado con presencia de vegetación secundaria arbustiva y herbácea. En el límite occidental se observan zonas de pastizal natural, mientras que en el sector oriental es posible identificar tanto zonas de pastizal inducido asociado a actividad ganadera, como zonas de agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes. Resulta relevante el pastizal inducido presente en las inmediaciones de la comunidad El Laurel, pues habría de considerarse la amenaza que supondría a la calidad del agua de recarga la instrumentación de alguna obra de recarga aguas abajo.

El mapa de aptitud para recarga por uso de suelo y cobertura vegetal (figura 43) muestra que el bosque de encino presenta una aptitud de recarga Muy Alta, el bosque de encino perturbado una aptitud Alta, las zonas de pastizales tiene una aptitud Media y las áreas de pastizal inducido y agricultura de temporal una aptitud Baja.

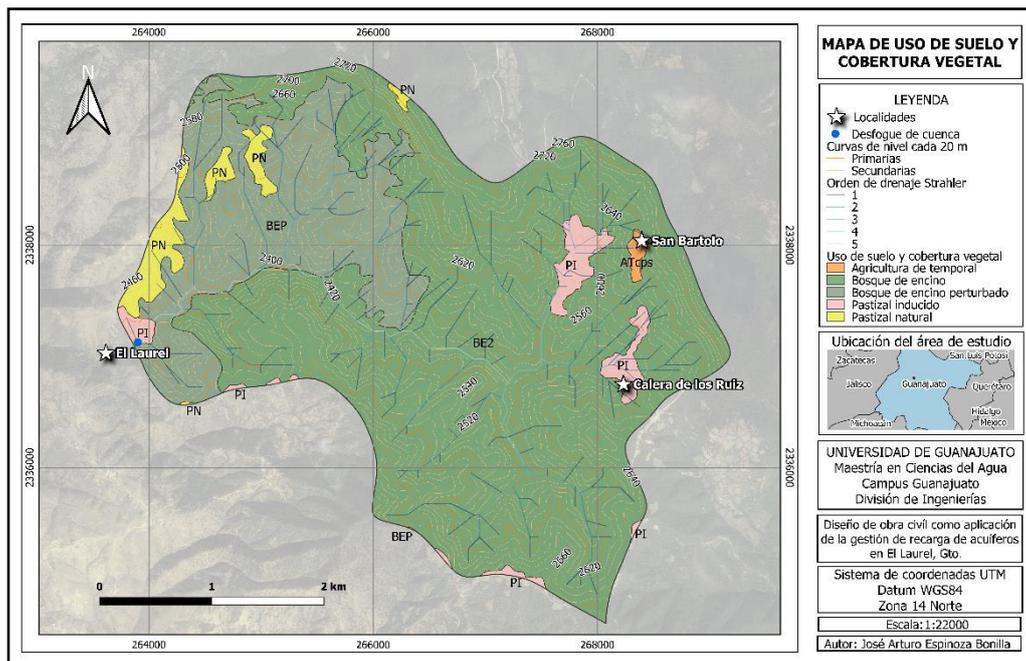


Figura 42. Mapa de uso de suelo y cobertura vegetal. Elaboración propia (2020).

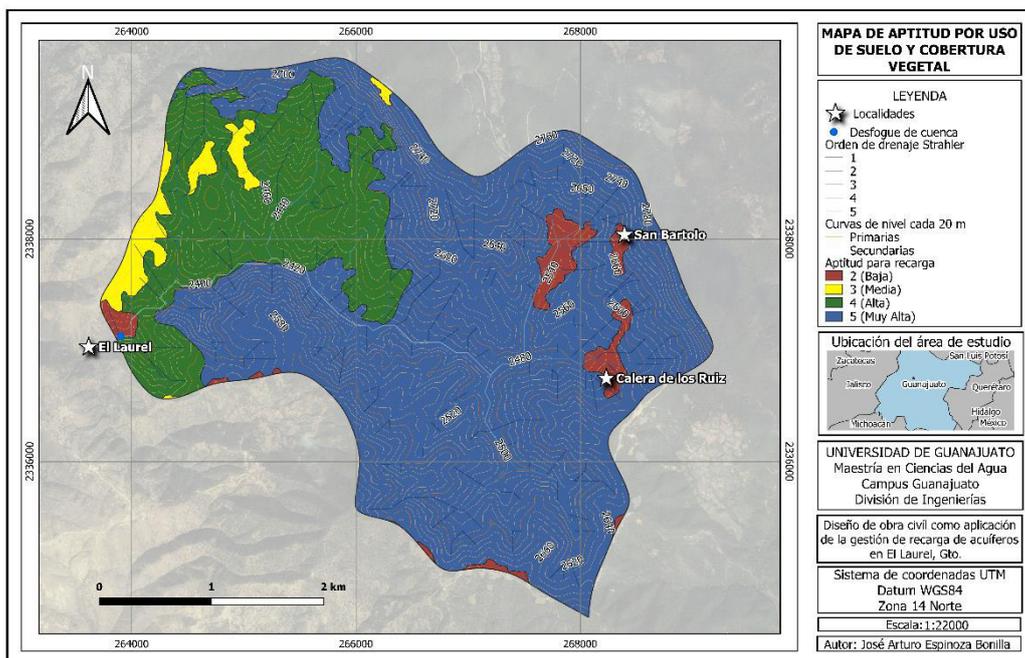


Figura 43. Mapa de aptitud por uso de suelo y cobertura vegetal. Elaboración propia (2020).

Mapa de densidad de fracturas y lineamientos

La microcuenca presenta una densidad de fracturas y lineamientos promedio de 0.78 km/km^2 . La mayor densidad se presenta en la zona sureste (figura 44), en la que se observan sistemas complejos de fracturas asociados posiblemente a la intrusión de basaltos del complejo La Luz, en donde la densidad se incrementa hasta los 4.20 km/km^2 . En la zona oeste del área se identifica una fractura de más de 1,500 m de longitud con dirección NE-SW la cual parte desde la comunidad El Laurel, la cual resulta de sumo interés ya que se encuentra dispuesta de manera casi paralela al cauce principal de la microcuenca, pudiendo estar asociada al contacto geológico entre las rocas metavolcánica sedimentarias y las lavas basálticas.

De acuerdo con el mapa de aptitud para recarga por densidad de fracturas y lineamientos (figura 45) la microcuenca presenta en la porción sureste zonas con Muy Alta y Alta aptitud para la recarga. El sistema de fracturas y lineamientos en la zona oeste también presenta una aptitud Muy Alta, Alta y Media, por último, en la sección centro-norte de la microcuenca se observa una fractura a la que se encuentra asociada un río tributario de orden 2, que presenta una aptitud Media.

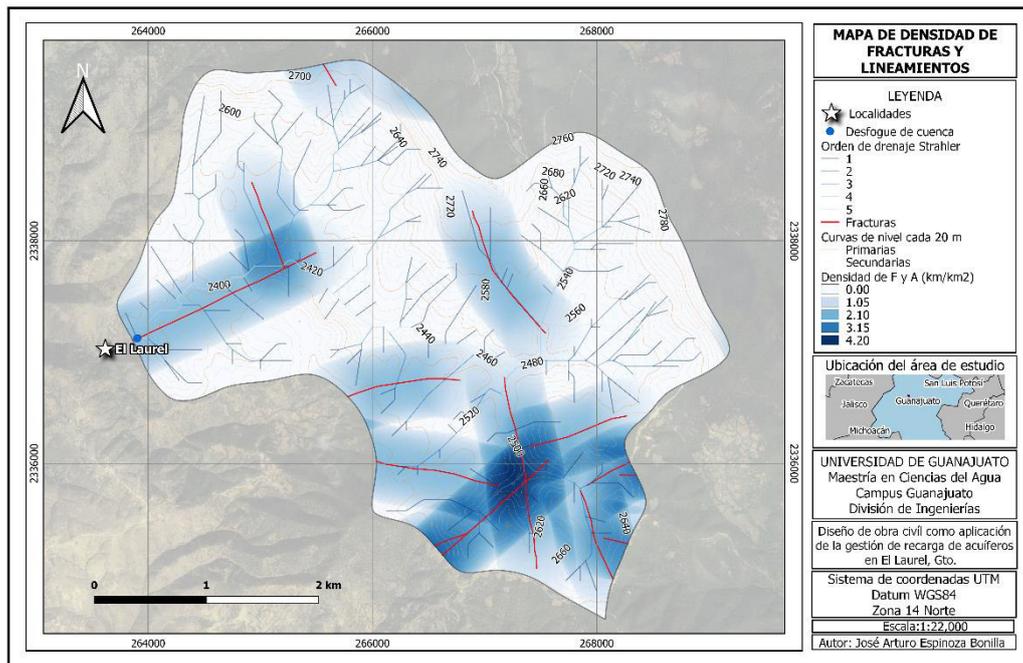


Figura 44. Mapa de densidad de fracturas y lineamientos. Elaboración propia (2020).

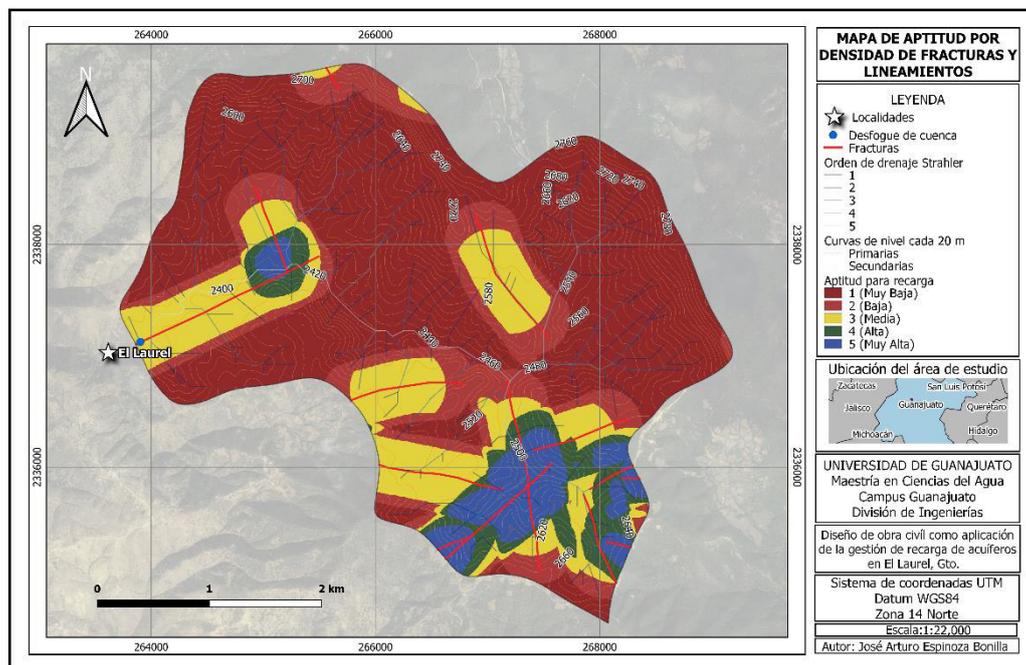


Figura 45. Mapa de aptitud por densidad de fracturas y lineamientos. Elaboración propia (2020).

Mapa de número de infiltración

La microcuenca presenta una densidad de drenaje de 4.15 km/km², una frecuencia de escorrentías de 18.59 segmentos por km² y un número de infiltración de 77.13 (figura 46). De acuerdo con la reclasificación del número de infiltración en un rango de 1 a 5 propuesto por (Bravo, y otros, 2015), la microcuenca presenta una aptitud Baja para la recarga hídrica (figura 47). Sin embargo, la red de drenaje y su densidad están condicionadas por la escala del mapa y la resolución del MDE con la que se hayan generado, de modo que se trata de un parámetro relativamente subjetivo y de poco peso en el análisis de jerarquías.

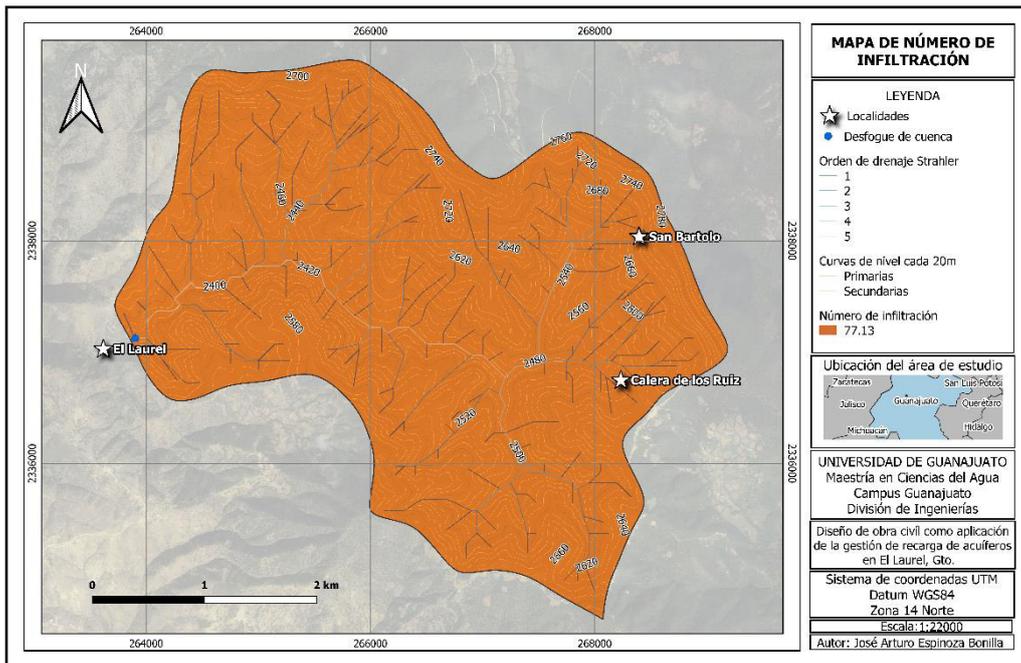


Figura 46. Mapa de número de infiltración. Elaboración propia (2020).

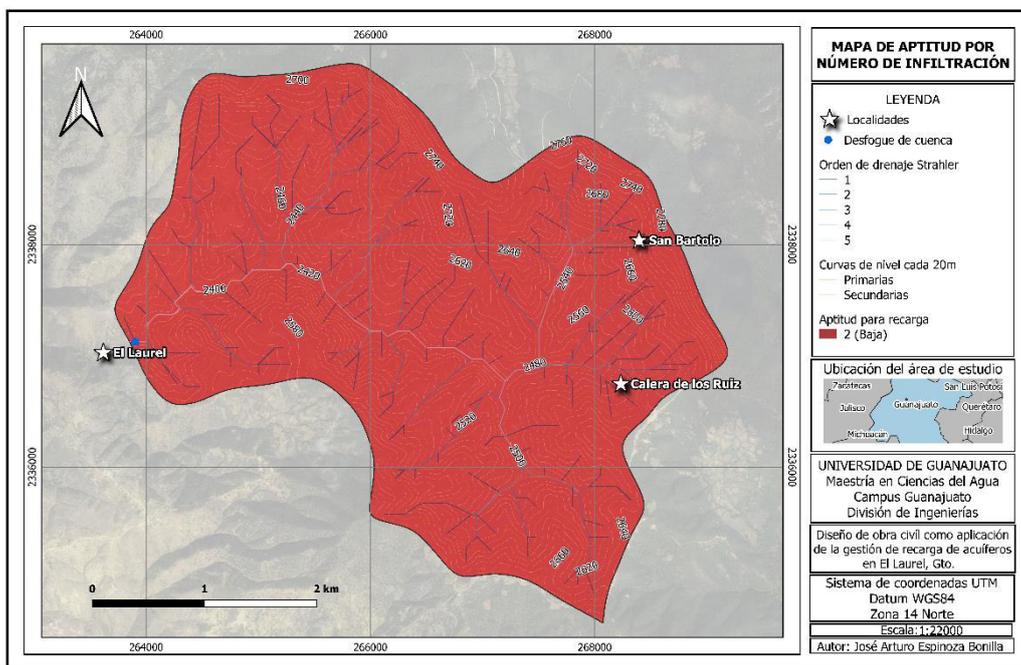


Figura 47. Mapa de aptitud por número de infiltración. Elaboración propia (2020).

Mapa de zonas potenciales de recarga hídrica

Se evaluaron los mapas de aptitud de recarga de: pendiente del terreno, tipo de suelo, tipo de roca, uso de suelo y cobertura vegetal, densidad de fracturas y lineamientos, y número de infiltración. Los pesos relativos que se asignaron a cada factor dentro del análisis de jerarquías y superposición de mapas se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Pesos relativos asignados a cada factor. Elaboración propia (2020).

PESOS RELATIVOS ASIGNADOS A CADA FACTOR	
Factor	Peso relativo de cada factor
Pendiente	0.30
Edafología	0.14
Geología	0.19
Uso de suelo y cobertura vegetal	0.23
Densidad de fracturas y lineamientos	0.10
Número de infiltración	0.04
Total	1

Salvo en el caso de la densidad de fracturas y lineamientos se observó que las áreas de Alta y Muy Alta aptitud no se restringen a zonas muy localizadas del área de captación. La geología y el uso de suelo y cobertura vegetal alcanzaron porcentajes muy elevados en la superficie de Alta y Muy Alta aptitud (tabla 13), mientras que, en el caso de la edafología y el número de infiltración, estos no presentaron una aptitud Alta o Muy Alta en ningún sitio dentro de la microcuenca.

Tabla 13. Suma de las áreas con aptitud Alta y Muy Alta por Factor. Elaboración propia (2020).

ÁREAS CON APTITUD ALTA Y MUY ALTA POR FACTOR		
Factor	Aptitud Alta y Muy Alta (km ²)	% de la microcuenca
Pendiente	1.37	8.81
Edafología	0.00	0.00
Geología	10.36	66.41
Uso de suelo y cobertura vegetal	14.64	93.85
Densidad de fracturas y lineamientos	1.88	12.05
Número de infiltración	0.00	0.00

En términos de superficie ocupada (tabla 14), el mapa de potencial de recarga hídrica (figura 48) muestra la predominancia de la categoría de Aptitud Media (76.54%), que se distribuye en toda el área de estudio. Le siguió la categoría de Aptitud Baja (15.58%) que ocurre fundamentalmente en el límite norte de la microcuenca, sobre todo en el noroeste, donde la roca y el suelo resultan limitantes serios a la permeabilidad. Las áreas con aptitud Alta tuvieron una distribución mucho más restringida (7.76%) presentándose principalmente en la porción sur de la microcuenca, así como en el lecho de los ríos. Así mismo se encuentran zonas dispersas con Alto potencial, posiblemente condicionadas por una baja pendiente del terreno.

Tabla 14. Superficie ocupada por nivel de aptitud. Elaboración propia (2020).

SUPERFICIE OCUPADA POR NIVEL DE APTITUD		
Nivel de Aptitud	Área (km ²)	% de la microcuenca
Muy Baja	0.00	0.00
Baja	2.43	15.58
Media	11.94	76.54
Alta	1.21	7.76
Muy Alta	0.00	0.00

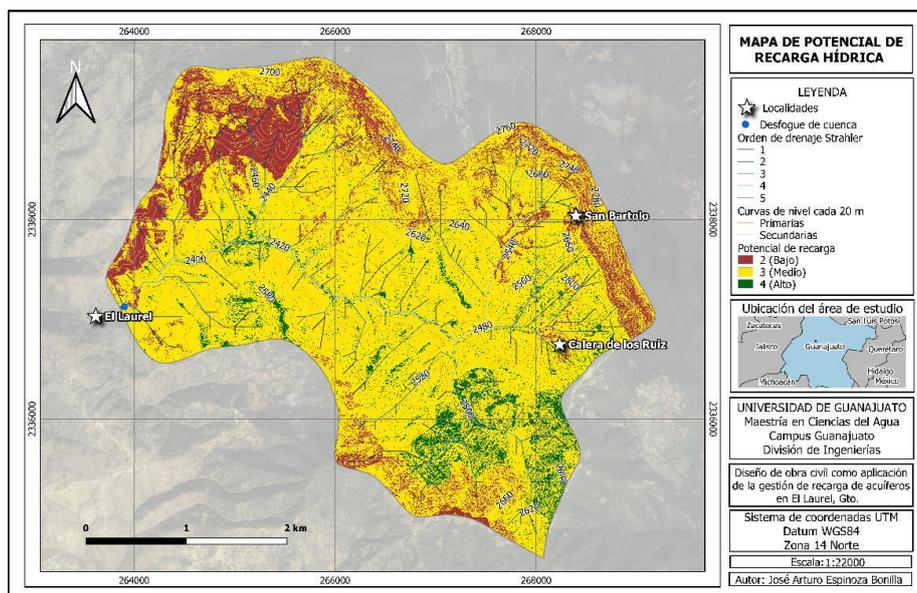


Figura 48. Mapa de potencial de recarga hídrica. Elaboración propia (2020).

7.2 Recarga potencial al acuífero

Series climáticas de precipitación y temperatura

Las estaciones climatológicas estudiadas se muestran en la figura 49, de ellas fueron obtenidos y procesados los datos de precipitación media (tabla 15), temperatura media (tabla 16), temperatura máxima media (tabla 17), y temperatura mínima media (tabla 18) de la microcuenca, tanto en escala mensual como anual; información necesaria para la estimación de la evapotranspiración y la recarga potencial al acuífero. Se muestran también los mapas de temperatura media anual (figura 50) y precipitación media anual de la microcuenca (figura 51), donde se identifica una menor temperatura y mayor precipitación en el norte del área de estudio

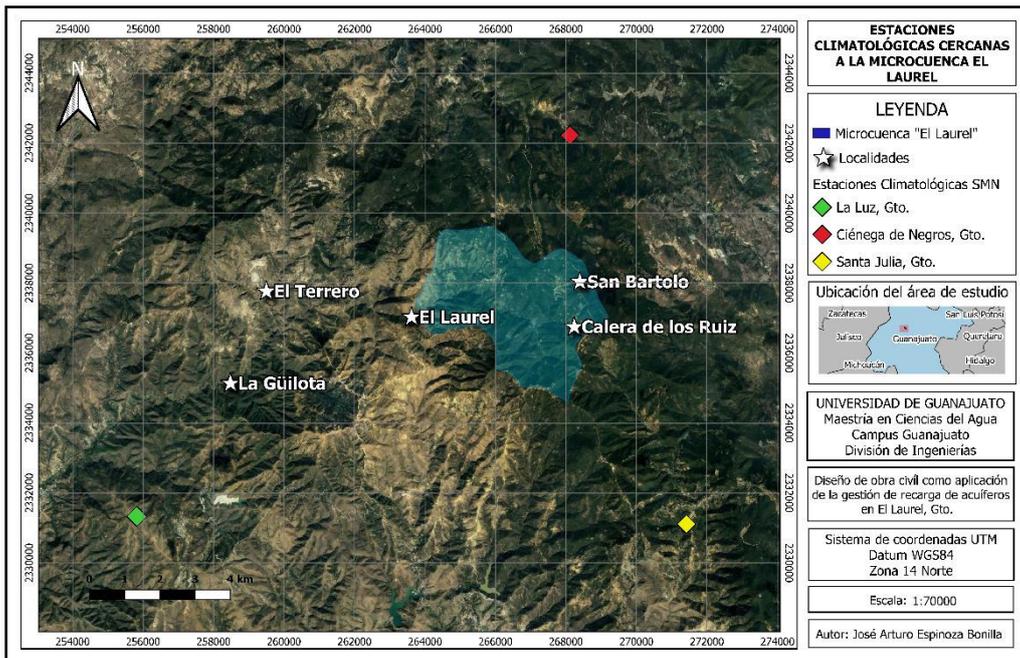


Figura 49. Estaciones climatológicas cercanas a la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

Tabla 15. Valores de precipitación media mensual y anual en la microcuenca El Laurel.
Elaboración propia (2021).

PRECIPITACIÓN MEDIA												
ESTACIONES												
Estación: La Luz												
Clave SMN: 00011130												
Años de registro: 41 años (1977-2018)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (mm)	11.8	9.3	14.7	7.0	28.7	98.8	128.5	98.2	79.5	32.5	11.9	18.0
Estación: Ciénega de Negros												
Clave SMN: 00011141												
Años de registro: 39 años (1979-2018)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (mm)	21.7	18.5	15.5	18.0	54.7	160.4	211.8	158.2	152.9	76.4	22.5	14.1
Estación: Santa Julia												
Clave SMN: 00011070												
Años de registro: 65 años (1954-2019)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (mm)	13.9	8.2	10.2	10.4	26.5	111.2	153.3	145.5	123.3	44.8	11.7	6.4
MICROCUCENCA												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio de interpolación, media mensual (mm)	18	15	14	15	44	140	186	148	136	63	18	12
Precipitación anual sumando promedio de interpolaciones mensuales	809	mm/año										

Tabla 16. Valores de temperatura media mensual y anual en la microcuenca El Laurel.
Elaboración propia (2021).

TEMPERATURA MEDIA												
ESTACIONES												
Estación: La Luz												
Clave SMN: 00011130												
Años de registro: 41 años (1977-2018)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (°C)	12.2	13.1	15.3	17.2	18.1	17.3	16.1	16.1	16.1	15.4	13.5	12.3
Estación: Ciénega de Negros												
Clave SMN: 00011141												
Años de registro: 39 años (1979-2018)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (°C)	11.6	12.3	14.1	16.4	17.3	16.6	16.2	16.4	16.0	15.0	13.6	12.2
Estación: Santa Julia												
Clave SMN: 00011070												
Años de registro: 65 años (1954-2019)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (°C)	14.7	15.9	18.1	20.5	22.3	22.1	20.6	20.4	20.0	18.6	16.7	15.3
MICROCUENCA												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio de interpolación, media mensual (°C)	12.5	13.4	15.4	17.6	18.8	18.2	17.4	17.5	17.1	16.1	14.5	13.1
Temperatura media anual promediando interpolaciones mensuales	16.0	°C										

Tabla 17. Valores de temperatura máxima media mensual y anual en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA												
ESTACIONES												
Estación: La Luz												
Clave SMN: 00011130												
Años de registro: 41 años (1977-2018)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (°C)	19.5	21.0	23.4	25.4	26.5	25.1	23.5	23.3	23.0	23.2	20.8	19.4
Estación: Ciénega de Negros												
Clave SMN: 00011141												
Años de registro: 39 años (1979-2018)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (°C)	20.3	21.1	23.3	25.1	25.9	24.7	23.8	24.0	23.7	22.9	22.1	20.7
Estación: Santa Julia												
Clave SMN: 00011070												
Años de registro: 65 años (1954-2019)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (°C)	24.1	25.7	28.0	30.4	31.3	29.3	27.1	27.0	26.4	26.3	25.7	24.5
MICROCUENCA												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio de interpolación, media mensual (°C)	21.3	22.4	24.6	26.6	27.5	26.0	24.7	24.8	24.7	23.9	23.0	21.6
Temperatura máxima media anual promediando interpolaciones mensuales	24.3	°C										

Tabla 18. Valores de temperatura mínima media mensual y anual en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA												
ESTACIONES												
Estación: La Luz												
Clave SMN: 00011130												
Años de registro: 41 años (1977-2018)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (°C)	4.8	5.2	7.2	9.0	9.7	9.5	8.7	9.0	9.3	7.7	6.2	5.3
Estación: Ciénega de Negros												
Clave SMN: 00011141												
Años de registro: 39 años (1979-2018)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (°C)	2.8	3.4	4.9	7.6	8.7	8.5	8.5	8.9	8.3	7.0	5.0	3.8
Estación: Santa Julia												
Clave SMN: 00011070												
Años de registro: 65 años (1954-2019)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio mensual (°C)	5.2	6.1	8.1	10.7	13.3	14.8	14.0	13.7	13.6	11.0	7.7	6.0
MICROCUEENCA												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio de interpolación (°C)	3.7	4.4	6.1	8.6	10.1	10.4	10.1	10.3	9.9	8.2	5.9	4.6
Temperatura mínima media anual promediando interpolaciones mensuales	7.7	°C										

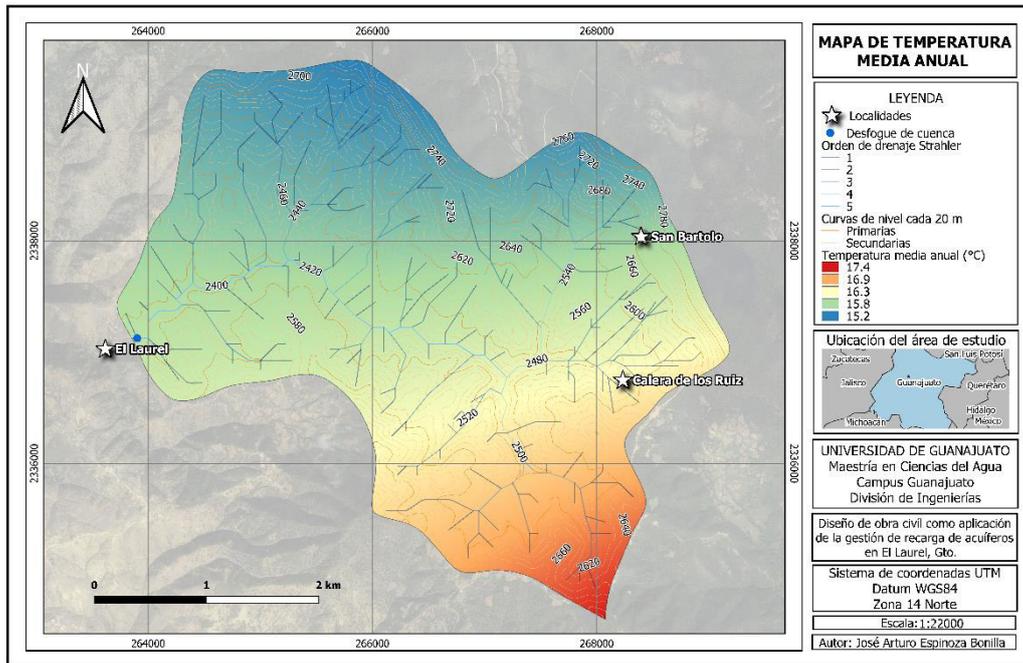


Figura 50. Temperatura media anual en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

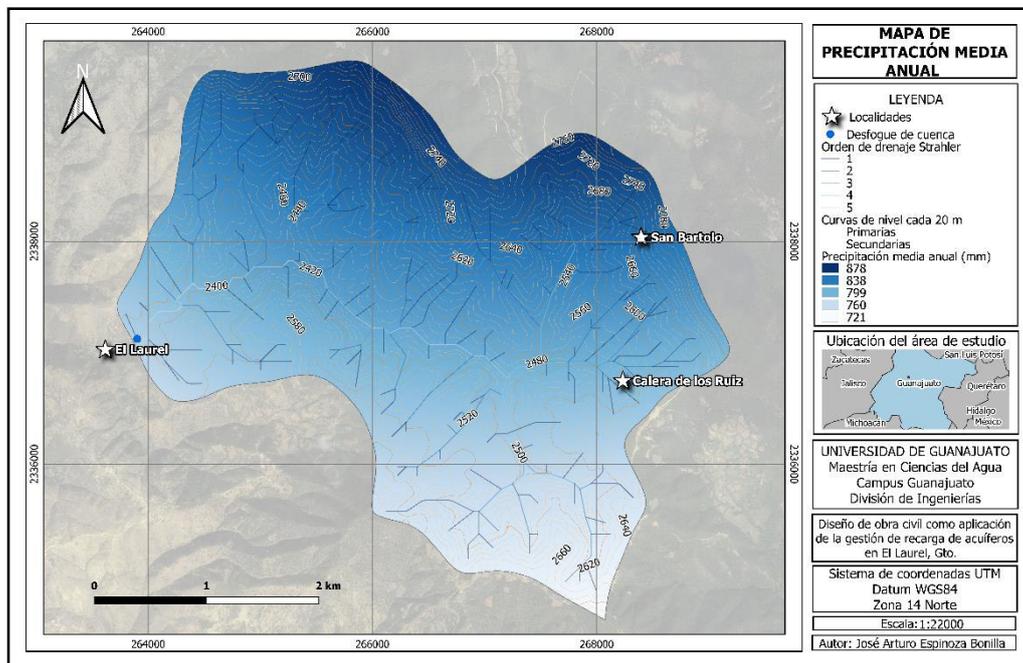


Figura 51. Precipitación media anual en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

Evapotranspiración Potencial (ETP)

En la tabla 19 se muestra la evapotranspiración potencial de la microcuenca “El Laurel” en mm/año, estimada mediante el método y la ecuación propuesta por Hargreaves & Samani (1985).

Tabla 19. Estimación de la Evapotranspiración Potencial (ETP) en la microcuenca El Laurel mediante el método de Hargreaves & Samani (1985). Elaboración propia (2021).

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)												
Ubicación:	Microcuenca “El Laurel”											
Latitud:	N 21.186111											
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Días del mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
P med (mm)	18	15	14	15	44	140	186	148	136	63	18	12
T med (°C)	12.5	13.4	15.4	17.6	18.8	18.2	17.4	17.5	17.1	16.1	14.5	13.1
T máx. med (°C)	21.3	22.4	24.6	26.6	27.5	26.0	24.7	24.8	24.7	23.9	23.0	21.6
T mín. med (°C)	3.7	4.4	6.1	8.6	10.1	10.4	10.1	10.3	9.9	8.2	5.9	4.6
Ro (mm/día)	10.7	12.3	14.1	15.5	16.1	16.2	16.1	15.7	14.5	12.9	11.1	10.2
KT	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Rs (mm/día)	7.6	8.9	10.3	11.1	11.4	10.9	10.5	10.1	9.5	8.7	7.8	7.2
ETP (mm/día)	3.1	3.7	4.6	5.3	5.6	5.3	5.0	4.8	4.5	4.0	3.4	3.0
ETP (mm/mes)	96.7	104.6	142.7	159.8	174.1	158.9	154.2	149.6	134.3	122.5	101.8	92.4
ETP (mm/año)	1591.5											

P med = Precipitación media; T med = Temperatura media; T máx. med = Temperatura máxima media; T mín med = Temperatura mínima media; Ro = Radiación solar extraterrestre; KT = Coeficiente; Rs = Radiación solar incidente; ETP = Evapotranspiración potencial.

Se observa que los meses de mayor precipitación son junio, julio, agosto y septiembre, superando los 130 mm mensuales, mientras que la temporada de secas se sitúa entre octubre y mayo con precipitaciones inferiores a los 70 mm mensuales. Los meses con mayor radiación solar extraterrestre y mayor radiación solar incidente se ubican entre abril y agosto, disminuyendo de manera considerable entre septiembre y marzo. La evapotranspiración potencial de la microcuenca es de 1591.5 mm anuales, presentándose las mayores tasas de evapotranspiración potencial entre los meses de abril y julio, superando los 150 mm mensuales. Finalmente, los únicos meses en los que la precipitación media supera a la evapotranspiración potencial son julio y septiembre.

Parámetros físicos del suelo de la microcuenca

Para la estimación de los parámetros físicos del suelo se realizó su muestreo en dos ubicaciones como se muestra en la figura 52 y tabla 20. La muestra 1 de suelo presenta una masa de 2,329 g, por lo que en el laboratorio se estimó su granulometría, clasificación del suelo respecto al Sistema Unificado de Clasificación de Suelo, masa específica relativa de los sólidos, humedad y contenido de materia orgánica. En el caso de la muestra 2 al recolectarse una masa de 3,312 g fue posible estimar en laboratorio su granulometría, clasificación del suelo respecto al Sistema Unificado de Clasificación de Suelo, masa específica relativa de los sólidos, humedad, masa volumétrica natural, relación de vacíos, porosidad y permeabilidad.

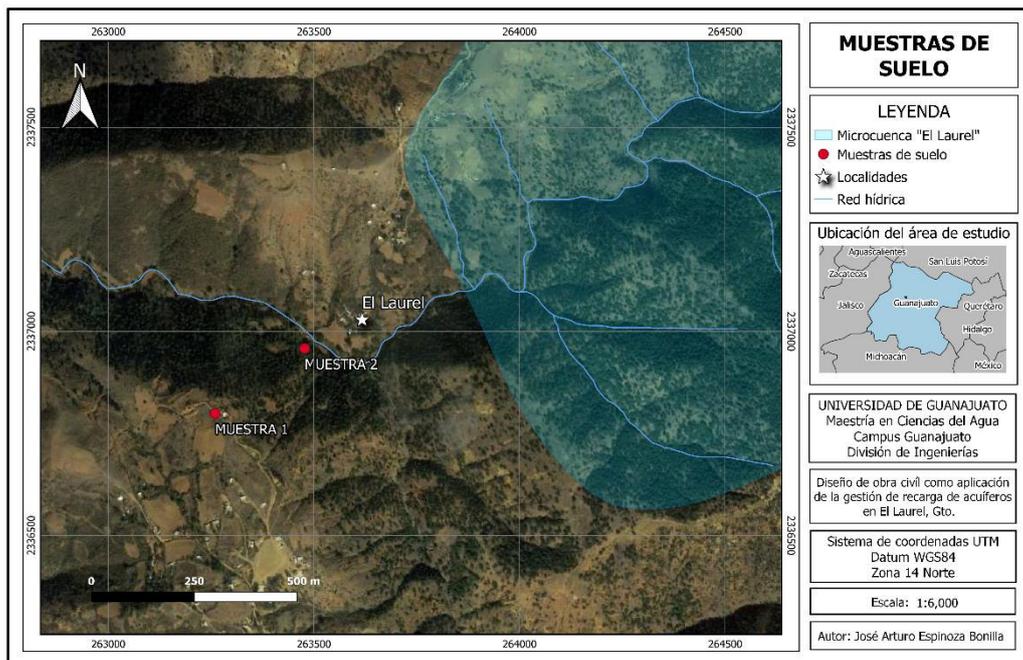


Figura 52. Ubicación de los sitios de muestreo de suelo. Elaboración propia (2021).

En el caso de ambas muestras de suelo, debido a la dificultad del terreno, fue necesario recolectarlas fuera de la microcuenca de estudio, en una zona con suelo tipo feozem lúvico de acuerdo con la capa edafológica desarrollada y publicada por el SIGMAOT (2020). Si bien este tipo de suelo no es el predominante dentro del área de estudio, si es posible encontrarlo

en la zona occidental de la microcuenca, siendo el propio suelo en el que se encuentra asentada la comunidad El Laurel, brindando con ello una buena aproximación de las características edafológicas del área de estudio. Sin embargo, habrá que tener en cuenta que el suelo tipo luvisol órtico predominante en la microcuenca, al tener un mayor componente arcilloso, presentará probablemente una menor permeabilidad.

Tabla 20. Parámetros físicos del suelo del área de estudio. Elaboración propia (2021).

PARÁMETROS FÍSICOS DEL SUELO		
Parámetros	Muestra 1	Muestra 2
Coordenadas	14Q 263260, 2336799	14Q 263477, 2336958
Granulometría	- Grava: 22% - Arena: 29.8% - Finos: 48.1%	- Grava: 50.23% - Arena: 27.23% - Finos: 22.51%
Clasificación SUCS	Limo de baja plasticidad (MI)	Grava arcillosa de baja compresibilidad (Gc)
Masa volumétrica natural (g/cm ³)	-	1.73
Masa específica relativa de los sólidos	1.82	1.80
Relación de vacíos	-	0.39
Porosidad total (%)	-	28.23
Permeabilidad (mm/día)	-	2488
Humedad (%)	13	14.3
Contenido de materia vegetal (%)	0.08	0

De acuerdo con los resultados, se observa en el parámetro de granulometría un mayor porcentaje de finos en la muestra 1, un porcentaje mayor de gravas en la muestra 2 y un porcentaje muy similar de arenas en ambas. De igual forma se observa una coincidencia casi total en la masa específica relativa de los sólidos y el porcentaje de humedad. Respecto a los parámetros estimados únicamente para la muestra 2 se observa una porosidad mayor al 28% y una permeabilidad bastante alta, siendo un suelo compuesto de una mezcla de grava-arena y arcillas con buen drenaje, debido posiblemente a la propia ubicación del muestreo, el cual se encuentra en la parte baja de una ladera con bastante pendiente.

Balance hídrico de suelos

En la tabla 21 se muestra el balance hídrico de suelos estimado para la microcuenca de estudio aplicando la metodología propuesta por Schosinsky (2006).

Tabla 21. Balance hídrico de suelos de la microcuenca "El Laurel". Elaboración propia (2021).

BALANCE HÍDRICO DE SUELOS													
Zona de estudio	Microcuenca "El Laurel", Guanajuato												
Fecha	3 de agosto 2021												
Área (km ²)	15.6												
Textura del suelo	franco/arenosa/arcillosa												
Parámetros de la microcuenca													
Fc (mm/día)	2488					Por peso suelo seco (%)		Por volumen (%)		mm			
Kp (24° o 45%)	0.06	CC				8.3		14.3		214.5			
Kv [Bosque]	0.2	PM				6.0		10.4		155.7			
Kfc	1	CC-PM				2.3		3.9		58.8			
Ci	1												
Da (g/cm ³)	1.73												
PR (mm)	1500												
HSi (mm)	214.5												
Mes con que inicia Hsi; 1,2,3.,12?	8												
Cfo: Bosques muy densos = 0.2, otros = 0.12	0.12												
Estimación de la recarga potencial de la microcuenca													
Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	18	15	14	15	44	140	186	148	136	63	18	12	809
Ret (mm)	5	5	5	5	5	17	22	18	16	8	5	5	116
Pi (mm)	13	10	9	10	39	123	164	130	120	55	13	7	693
ESC (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETP (mm)	97	105	143	160	174	159	154	150	134	123	102	92	1592
Hsi (mm)	158	158	157	156	156	156	199	215	214	146	156	157	
ETPR (mm)	97	105	143	160	174	159	154	150	134	123	102	92	
C1	0.3	0.2	0.2	0.2	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.2	0.1	
C2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.7	0.8	0.0	0.0	0.0	
HD (mm)	15	13	10	10	39	123	207	189	178	46	13	9	
ETR (mm)	12	11	10	10	39	79	147	125	118	46	11	7	615
HSf (mm)	158	157	156	156	156	199	214	214	214	156	157	158	
DCC (mm)	56	57	59	59	59	15	0	0	0	59	57	57	
Rp (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	5.3	2.1	0.0	0.0	0.0	9.3
NR (mm)	141	151	191	209	194	94	7	25	17	136	148	142	1454
Rp anual (m ³)	145070												

Fc = Infiltración básica del suelo; Ci = Coeficiente de infiltración; CC =Capacidad de campo; PM = Punto de marchitez; PR = Profundidad de raíces; (CC-PM) = Rango de agua disponible; Da = Densidad aparente del suelo; C1 = Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR; C2 = Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre

ETR; K_p = Factor por pendiente; K_v = Factor por vegetación; K_{fc} = Factor estimado con base a la prueba de infiltración; C_{fo} = Coeficiente de retención pluvial en follajes; P = Precipitación media mensual; P_i = Precipitación que infiltra; ESC = Escorrentía superficial; ETP = Evapotranspiración potencial; ETPR = Evapotranspiración potencial real; ETR = Evapotranspiración real; HS_i = Humedad de suelo inicial; HD = Humedad disponible; HS_f = Humedad de suelo final; DCC = Déficit de capacidad de campo; R_p = Recarga potencial; NR = Necesidad de riego; Ret = Retención de lluvia.

Los resultados muestran que la recarga al acuífero se presenta durante los meses de julio, agosto y septiembre, con una suma total de lámina de agua de 9.3 mm anuales, representando un volumen de 145,070 m³. Dentro del análisis de sensibilidad se identifica que el Coeficiente de retención pluvial en follajes (C_{fo}) es un factor sustancial para la recarga potencial al acuífero, pudiéndose incrementar el volumen de recarga hasta los 346,434 m³ si se aumenta la cobertura vegetal de la microcuenca.

Finalmente, habrá que tenerse en cuenta, como ya se ha mencionado, que el suelo luvisol órtico predominante en la microcuenca, si bien presenta teóricamente un buen drenaje también, tendrá una infiltración básica menor al feozem analizado en laboratorio, por lo que habrá que considerar que, a pesar de la recarga potencial al acuífero, existirá la posibilidad de contar con un volumen importante de agua en forma de escorrentía superficial. Por lo tanto, se recomienda la estimación del caudal de diseño para el diseño de las obras de recarga hídrica que así lo demanden.

7.3 Calidad del agua de recarga

En la figura 53 y tabla 22 se presentan las ubicaciones en las que realizó la toma de dos muestras de agua dentro del río principal de la microcuenca El Laurel (agua de recarga) y la muestra de agua del manantial (agua de descarga) localizado al norte de la comunidad homónima, analizado por Ramos (2018). En las tablas 23 y 24 se presentan los metales y óxidos identificados mediante el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX) para las dos muestras de agua de recarga, tanto para las muestras centrifugadas como para las muestras en reposo por 24 hr. También se presentan los elementos identificados por Ramos (2018) en el manantial y los límites de calidad del agua establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 para el uso y consumo humano.

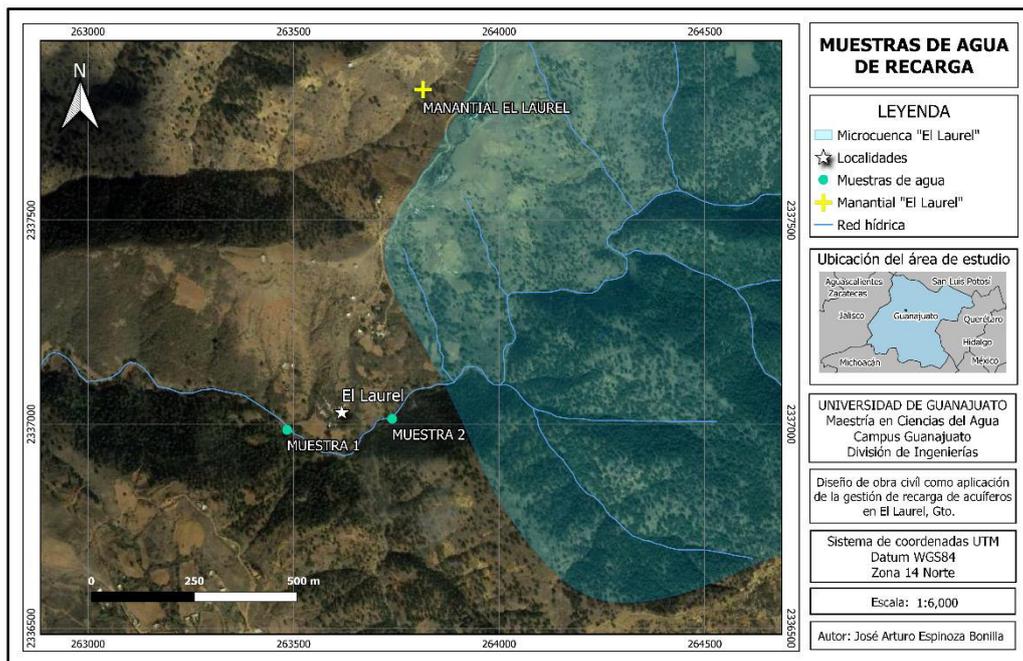


Figura 53. Ubicación del manantial de la comunidad El Laurel y los sitios de muestreo del agua de recarga. Elaboración propia (2021).

Tabla 22. Ubicación de los sitios de muestreo de agua analizados mediante FRX.
Elaboración propia (2021).

UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO DE AGUA			
	Coordenadas	Altitud	Tipo de roca
Manantial	14Q 263815, 2337820	2437 msnm	Metavolcánica - sedimentaria
Agua de recarga Muestra 1	14Q 263484, 2336986	2325 msnm	Metavolcánica - sedimentaria
Agua de recarga Muestra 2	14Q 263740, 2337013	2325 msnm	Metavolcánica - sedimentaria

Nota: Las letras "N/D" significa que dicha característica no fue detectada.

Tabla 23. Metales y óxidos identificados en el agua del rio Laurel mediante FRX con muestras centrifugadas por cinco minutos a 3500 rpm, comparados con los elementos identificados en el manantial de la comunidad y los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994. Elaboración propia (2021).

MUESTRAS CENTRIFUGADAS - METALES Y ÓXIDOS					
Elemento	Límite de detección (PPM)	Agua de recarga Muestra 1 (PPM)	Agua de recarga muestra 2 (PPM)	Manantial El Laurel (PPM) (Ramos, 2018)	Límite NOM- 127-SSA1- 1994
Cl	-	N/D	N/D	600	0.2 - 1.50
S	-	N/D	N/D	39.7	-
Mg	295	5065	3586	N/D	-
K	135	N/D	148	N/D	-
Ca	158	698	840	91.1	-
Zr	-	N/D	41.5	207	-
Mo	-	N/D	N/D	31.7	-
Ru	9.24	N/D	888	N/D	-
Rh	1640	984687	985521	N/D	-
Al	60.1	4452	4199	N/D	0.2
Si	14.4	3763	4290	43.4	-
Te	-	N/D	N/D	30.4	-
SO ₂ ³	-	N/D	N/D	134	-
CaCO ₃	-	N/D	N/D	232	-
HCO ₃	-	N/D	N/D	283.4	-
MgO	168	N/D	99900	N/D	-
K ₂ O	41	204	977	N/D	-
CaO	62	1114	4650	N/D	-
Al ₂ O ₃	33	217000	224000	N/D	-

SiO ₂	11	409000	419000	91	-
P ₂ O ₅	5	31700	27800	N/D	-
SO ₃	5	285000	209000	N/D	-
TiO ₂	11	N/D	291	N/D	-
Fe ₂ O ₃	-	10204	14872	N/D	-

Notas: 1) Los elementos y óxidos que no se muestran en la tabla o se presentan con las letras "N/D" no fueron detectados mediante el análisis de FRX. 2) Los elementos y óxidos con el símbolo "-" no fueron determinados. 3) Las concentraciones de óxidos fueron determinadas en % de masa y convertidas a ppm.

Tabla 24. Metales y óxidos identificados en el agua del río Laurel mediante FRX después de dejar las muestras en reposo por 24 hr, comparados con los elementos identificados en el manantial de la comunidad y los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

Elaboración propia (2021).

MUESTRAS CON 24 HR DE REPOSO - METALES Y ÓXIDOS					
Elemento	Límite de detección (PPM)	Agua de recarga Muestra 1 (PPM)	Agua de recarga muestra 2 (PPM)	Manantial El Laurel (PPM) (Ramos, 2018)	Límite NOM-127-SSA1-1994
Cl	-	N/D	N/D	11.2	0.2 - 1.50
S	10.8	N/D	27.49	39.7	-
Mg	295	4773	6050	N/D	-
K	135	186	211	N/D	-
Ca	158	837	920	91.1	-
Ti	29.7	30.3	N/D	N/D	-
Zr	-	37.8	49.8	207	-
Mo	-	N/D	N/D	31.7	-
Ru	9.24	429	1009	N/D	-
Rh	1640	980571	974383	N/D	-
Al	60.1	7454	9955	N/D	0.2
Si	14.4	5288	6878	43.4	-
Te	-	N/D	N/D	30.4	-
SO ₂ ³	-	N/D	N/D	134	-
CaCO ₃	-	N/D	N/D	232	-
HCO ₃	-	N/D	N/D	283.4	-
MgO	184	34700	28000	N/D	-
K ₂ O	19	13320	11300	N/D	-
CaO	13	49120	43400	N/D	-
Al ₂ O ₃	39	260000	286000	N/D	-
SiO ₂	15	414000	545000	91	-
P ₂ O ₅	5	7960	5360	N/D	-
SO ₃	5	59500	57300	N/D	-
TiO ₂	6	2695	2440	N/D	-

MnO	23	2501	2780	N/D	
Fe ₂ O ₃	17	156460	18800	N/D	-

Notas: 1) Los elementos y óxidos que no se muestran en la tabla o se presentan con las letras "N/D" no fueron detectados mediante el análisis de FRX. 2) Los elementos y óxidos con el símbolo "-" no fueron determinados. 3) Las concentraciones de óxidos fueron determinadas en % de masa y convertidas a ppm.

En general, se identifica una buena calidad química del agua para las dos muestras analizadas al tener poca presencia de elementos químicos. De los cuarenta y nueve elementos analizados, únicamente se detectó la presencia de S, Mg, Ca, Zr, Ru, Rh, Al, Si, K y Ti, presentando los dos últimos una concentración apenas superior al límite de detección por parte del análisis de FRX. Respecto a los óxidos, se detectó la presencia de MgO, K₂O, CaO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, TiO₂, MnO y Fe₂O₃.

Estos resultados se explican por la propia composición de la roca pizarra predominante en la microcuenca "El Laurel" y sobre la cual fluye su río principal (figura 54). Mineralógicamente, los componentes principales de la pizarra son el cuarzo, moscovita, feldespato y chamosita, lo cual justificaría la presencia de Si, K, Al, Mg y Ca. Respecto a la composición química de la roca los valores son de 54.68% SiO₂, 23.52% Al₂O₃, 9.95% Fe₂O₃, 4.71% K₂O, 3.75% MgO, 1.25% TiO₂, 1.25% Na₂O, 0.54% CaO, 0.08% MnO y 0.026% P₂O₅ (Cambronero, Ruiz-Román, y Ruiz-Prieto, 2005), observándose una coincidencia prácticamente total con los óxidos detectados en las muestras de agua. Respecto a la presencia de Ru y Rh se podría presumir que, al ser ambos metales asociados al platino, su fuente contaminante sea la utilización de fertilizantes en la parte alta de la microcuenca, o también, la actividad minera desarrollada en cuencas adyacentes. Así mismo habría que considerarse que al tratarse de una técnica de FRX, los valores para estos elementos y otros no incluidos como el Pt, Au, Ag, entre otros, podrían sobreestimarse. Ante esto sería recomendable validarlos por pruebas ICP o de Absorción Atómica, considerando por lo tanto las concentraciones obtenidas, únicamente como valores indicativos.

Continuando con la comparación de los resultados obtenidos en los análisis del agua de recarga con las concentraciones químicas registradas para el manantial de la comunidad El Laurel, se observa de manera generalizada una disminución de los componentes químicos en el agua del manantial, mejorando notablemente con ello su calidad química, demostrando así, el importante efecto positivo que los procesos de infiltración y percolación brindan al agua de recarga, reteniendo durante el proceso, una importante cantidad de elementos químicos y mejorando con ello su calidad en general. Finalmente, de acuerdo con los dos parámetros en común evaluados en los análisis de FRX y la NOM-127-SSA1-1994 para el uso y consumo humano de agua, se observa que en el agua del manantial el elemento Cl excede el límite permisible establecido en la norma, mientras que en el río es el Al el elemento que excede dicho límite, es por ello por lo que tanto el agua de descarga como de recarga no son aptas para su uso y consumo sin un proceso de potabilización previo.

En el caso del agua que escurre en la microcuenca, sería conveniente acompañar las obras de recarga hídrica con alguna técnica de tratamiento fisicoquímico; si el objetivo fuera la implementación de pozos, se recomendaría la instalación de desarenadores y sistemas de cloración. Si por el contrario se busca implementar técnicas de recarga someras como terrazas o zanjas, se recomendaría implementar las obras en zonas con un espesor de suelo aceptable, evitando las zonas con roca expuesta, permitiendo así actuar como sistema de tratamiento natural al propio proceso de infiltración y percolación del agua.



Figura 54. Afloramiento de pizarras sobre el cauce del río principal de la microcuenca “El Laurel”. Autoría propia (2021).

7.4 Propuesta de obras de recarga

Distintas obras de recarga y consideraciones para su implementación

A continuación, se presentan nueve de las técnicas de recarga hídrica descritas en el capítulo 3.8.1, con algunas consideraciones importantes para tener en cuenta al momento de su implementación, así como las ventajas y desventajas de su ejecución. Cabe detallar que como condición general para que exista recarga hídrica subsuperficial y subterránea, todas las obras deberán de emplazarse sobre roca con mediana a alta permeabilidad.

En el siguiente apartado se discuten las características biofísicas presentes en el área de estudio y las sugeridas por cada obra, estableciendo así la viabilidad de su implementación dentro de la microcuenca El Laurel.

Tabla 25. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de estanques de tierra. Elaboración propia (2021).

CUENCAS Y ESTANQUES DE INFILTRACIÓN (ESTANQUES DE TIERRA/JAGÜEYES)		
		
Condiciones sugeridas para su implementación	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Suelos con textura franca o arcillosa (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009). - Se sugiere su construcción en hondadas topográficas o en laderas con pendiente uniforme (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009). Terrenos con pendiente suave entre 0.5 y 3% (0.3 a 1.72°) serían ideales, evitar pendientes planas o mayores al 5% (3°) (FAO, 2017). - Evitar zonas con grandes árboles o una población densa de árboles menores (FAO, 2017). - El agua de recarga deberá de ser de buena calidad y de ser posible, abastecida a lo largo de todo el año (FAO, 2017). 	<ul style="list-style-type: none"> - Captación de bajo costo (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009). - No se requieren conocimientos técnicos avanzados para su manejo (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009). - No hace falta una masa de agua para su abastecimiento (FAO, 2017). 	<ul style="list-style-type: none"> - El nivel del agua puede variar de una estación a otra (FAO, 2017). - Se puede requerir trabajo de excavación (FAO, 2017). - No es drenable y el abastecimiento de agua no es regulable (FAO, 2017). - La progresiva acumulación de sedimentos en el fondo del estanque disminuirá su eficiencia.

Nota: Imagen recuperada de (Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez, 2017).

Tabla 26. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de pozos de recarga someros. Elaboración propia (2021).

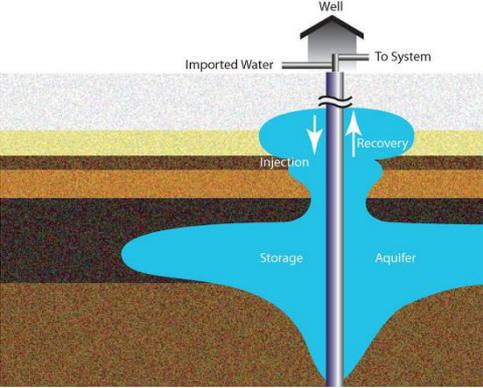
POZOS DE RECARGA SOMEROS (DRY WELLS)



Condiciones sugeridas para su implementación	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se justifica su implementación en lugares donde las capas superficiales son de baja permeabilidad y por debajo existen materiales permeables (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017). - Su construcción se puede llevar a cabo dentro de un cauce o depresión natural, estanque de infiltración o zanja de infiltración, (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017). - Durante su construcción se deberá de retirar cualquier tipo de material suelto que pueda limitar la tasa de infiltración (City of Portland, Oregon, 2016). - El uso de estructuras existentes puede ser ventajoso al reducir costos de instrumentación (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017). 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducen el caudal de escorrentía, su volumen y temperatura, y contribuyen a la recarga de agua subterránea (Environmental Services City of Portland, 2006). - Pueden durar hasta 30 años si se les brinda un mantenimiento adecuado (Boston Groundwater Trust, 2021). - Su instalación no requiere una alteración significativa del suelo (Irrigation Outlet, 2016). 	<ul style="list-style-type: none"> - Existe la posibilidad de introducir sólidos en suspensión, compuestos orgánicos y bacterias contaminantes directamente al acuífero (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017). - Puede producirse la obstrucción de las paredes del pozo por sólidos en suspensión (National Research Council, 1994). - Incremento en el costo de instrumentación respecto a los estanques de infiltración.

Nota: Imagen recuperada de (Murphy's Cesspool & Septic, 2021).

Tabla 27. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de pozos ASR y ASTR. Elaboración propia (2021).

POZOS ASR Y ASTR		
 <p>El diagrama ilustra el funcionamiento de un pozo ASR. Se muestra un pozo que recibe agua importada ('Imported Water') y la dirige 'To System'. El agua es inyectada ('Injection') en un acuífero ('Aquifer') para su almacenamiento ('Storage'). Posteriormente, el agua es recuperada ('Recovery') desde el acuífero. Las capas geológicas se muestran en tonos de verde, amarillo y marrón.</p>		
Condiciones sugeridas para su implementación	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se justifica su implementación en lugares donde las capas superficiales son de baja permeabilidad y el terreno es escaso (USGS, 2021). - El lugar de construcción del pozo no deberá de tener una abundante cobertura vegetal, de ser así, esta deberá de ser removida (City of Scottsdale, 2021). - El uso de estructuras existentes puede ser ventajoso al reducir costos de instrumentación (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017). - Para la implementación de esta técnica se requiere de una amplia investigación y de pruebas piloto para evaluar la permeabilidad del acuífero, los cambios químicos en el mismo, la calidad del agua recuperada, la eficiencia del sistema y su impacto ambiental (Gutiérrez e IMTA, 2016). 	<ul style="list-style-type: none"> - Permite almacenar agua subterránea durante los periodos húmedos para recuperarla durante los periodos de sequía (USGS, 2021). - Requiere poco espacio para su instalación (Martin y Dillion, 2002). - Los ritmos de inyección y recuperación pueden ser controlados (Martin y Dillion, 2002). - Una de las opciones más económicas para acceder a acuíferos confinados (Martin y Dillion, 2002). 	<ul style="list-style-type: none"> - Con la técnica ASR el agua recuperada puede estar influenciada por la química del agua que se inyectó (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017). - El costo de instrumentación aumenta notablemente, ya que además del bombeo, el agua debe de tratarse antes de la inyección y después de la recuperación (Texas Living Waters Project, 2021). - Poco rendimiento en rocas fracturadas (Martin y Dillion, 2002).

Notas: 1) Figura recuperada de (Town of Castle Rock Colorado, 2021), en la que se muestra el funcionamiento de un pozo ASR. 2) Ya que, en la imagen, las partes del pozo se encuentran en idioma inglés, la traducción al español se muestra a continuación entre paréntesis: well (pozo); imported water (agua importada); injection (inyección); storage (almacenamiento); aquifer (acuífero); recovery (recuperación) y to system (hacia al sistema).

Tabla 28. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación del muro de gaviones. Elaboración propia (2021).

MURO DE GAVIONES (PRESA FILTRANTE)		
Condiciones sugeridas para su implementación	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se utilizan predominantemente en regiones áridas, en arroyos y cauces arenosos de ríos que solo llevan agua en época de lluvias (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017). - Se debe construir sobre el cauce de un río, de modo que la presa actúe como estanque de percolación (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017). - Para la construcción de presas filtrantes se debe realizar previamente un profundo análisis estructural con el objetivo de determinar la resistencia que deberá tener el muro de gaviones para soportar los efectos de deslizamiento y volcamiento causado por el empuje hidrostático del agua y los sedimentos (López y Oropeza, 2009). 	<ul style="list-style-type: none"> - Presentan una amplia adaptabilidad a diversas condiciones geográficas (López y Oropeza, 2009). - Funcionan como presas filtrantes que permiten el flujo normal del agua y la retención de azolves (López y Oropeza, 2009). - Son presas flexibles, pudiendo sufrir deformaciones sin perder eficiencia (López y Oropeza, 2009). - Costos bajos en comparación con una presa de mampostería. - Alta eficiencia y durabilidad mayor a 5 años (López y Oropeza, 2009). 	<ul style="list-style-type: none"> - Con el tiempo, las cestas de alambre que contienen a los gaviones pueden sufrir desgaste por el movimiento del muro a causa del flujo de agua (Massachusetts Department of Environmental Protection, 2003). - Dificultad de instalación, se requiere equipamiento (MassDEP, 2003). - Su diseño requiere complejos cálculos estructurales. - Requiere mantenimiento constante, así como una inspección y evaluación después de cada evento de tormenta (Stevenson, 2017).



Nota: Imagen recuperada de CONAFOR [@CONAFOR] (2020).

Tabla 29. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de presas de arena. Elaboración propia (2021).

PRESAS DE ARENA		
		
Condiciones sugeridas para su implementación	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - El río debe ser lo suficientemente estacional (efímero) para que la presa se llene con sedimentos, por lo que es necesario que haya caudales máximos de inundación en lugar de caudales asociados con un río semipermanente (Maddrell, 2018). - El río deberá contener suficiente sedimento arenoso (Maddrell, 2018). - Se recomienda implementar en sitios con precipitación anual entre 600 y 1,200 mm y una alta variación de precipitación entre distintos meses (1 o 2 meses de lluvia), así como en ríos efímeros veloces con alta pendiente del terreno y altas variaciones de la altura del caudal (Maddrell, 2018). - La presa se debe construir sobre el macizo rocoso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Son estructuras sólidas y duraderas que requieren poco mantenimiento (Maddrell, 2018). - Las presas de arena permiten el riego a pequeña escala de los huertos en terrenos adyacentes a las mismas (Maddrell, 2018). - Protegen el agua de la evaporación, ya que esta se almacena en la arena (A Layman's Guide to Clean Water, 2021). - Reduce la contaminación del agua por humanos y animales, así como la proliferación de mosquitos e insectos (A Layman's Guide to Clean Water, 2021). 	<ul style="list-style-type: none"> - Esta tecnología requiere mano de obra intensiva y capital físico, por lo que la mayoría de las comunidades locales no pueden implementarla sin ayuda externa (Gur y Spuhler, 2021). - Un emplazamiento, diseño o construcción deficientes pueden provocar la falla de la presa (Maddrell y Neal, 2012). - Solo es aplicable en tierras secas donde hay ríos estacionales con suficiente sedimento arenoso (Maddrell y Neal, 2012).

Nota: Imagen recuperada de (Free Association Design, 2012).

Tabla 30. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de presas subsuperficiales. Elaboración propia (2021).

PRESAS SUBSUPERFICIALES		
		
Condiciones sugeridas para su implementación	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Que exista presencia de aguas subterráneas poco profundas con alta fluidez (OECC, 2004). - En el sitio donde se propone instalar la presa debe haber presencia de una capa con una alta porosidad efectiva para almacenar el agua (OECC, 2004). - Los lados y la cama del reservorio deberán de consistir en un macizo rocoso con baja permeabilidad, ya que de lo contrario el agua no podrá ser almacenada eficazmente (OECC, 2004). - Es deseable instalar la presa donde la roca el basamento con baja permeabilidad forme un "cuello de botella" con un extenso acuífero río arriba (OECC, 2004). 	<ul style="list-style-type: none"> - Son estructuras sólidas y duraderas que no requieren mantenimiento (Overseas Environmental Cooperation Center, 2004). - Bajos costos de construcción y operación (Maddrell y Neal, 2013). - Alta calidad del agua cuando ésta se extrae a través de una galería filtrante (Maddrell y Neal, 2013). - No propicia la reproducción de mosquitos y otros insectos (Maddrell y Neal, 2013). - Reducidas pérdidas por evaporación (Maddrell y Neal, 2012). - Pueden ser más delgadas y requerir menos material que las presas de arena (Maddrell y Neal, 2012). - Si existiese rotura no habría daños aguas abajo ya que la rotura se produce bajo tierra (OECC, 2004). 	<ul style="list-style-type: none"> - Aunque menos que con las presas de arena, se requieren algunos conocimientos técnicos y datos hidrológicos para su correcto diseño, ya que un emplazamiento, diseño o construcción deficientes pueden provocar la falla de la presa (Maddrell y Neal, 2012). - Solo es aplicable en tierras secas donde hay ríos estacionales con suficiente sedimento arenoso (Maddrell y Neal, 2012). - Se requiere diseño y ubicación individual (Maddrell y Neal, 2012).

Nota: Imagen recuperada de [Judith ArroNews] (2020), en la que se muestra el proceso de construcción de una presa subsuperficial. Nótese que la estructura se encuentra en su totalidad por debajo de la superficie.

Tabla 31. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de tinajas ciegas. Elaboración propia (2021).

TINAS CIEGAS (ZANJAS TRINCHERAS)		
		
Condiciones sugeridas para su implementación	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Regiones áridas o semiáridas donde la precipitación no es muy alta (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009), ya que en zonas húmedas existe el riesgo de la sobresaturación del suelo (PASOLAC, 2005). - Suelos permeables (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009), preferentemente francos o francos arcillosos ya que en suelos arenosos puede ser difícil estabilizar los taludes de las zanjas (PASOLAC, 2005). - Laderas desprovistas de vegetación (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009). - Pendientes fuertes (PASOLAC, 2005), entre 27 y 40% (15 y 22°). 	<ul style="list-style-type: none"> - Retienen azolves (Cardoza et al., 2006). - Interceptan los escurrimientos superficiales incrementando así la infiltración y recarga del agua de lluvia (Cardoza et al., 2006). - Retienen y conservan la humedad en áreas localizadas (Cardoza et al., 2006). - Favorecen el desarrollo de especies forestales y de vegetación natural (Cardoza et al., 2006). - Previenen las avenidas torrenciales o movimientos en masa del suelo (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009). - Controlan la erosión en laderas con cobertura vegetal deteriorada que requieren repoblación (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009). 	<ul style="list-style-type: none"> - La construcción de una tina ciega implica la exposición y pérdida del carbono orgánico presente en el suelo removido (Cotler et al., 2017). - Con el tiempo la erosión continúa ampliando las zanjas, promoviendo la formación de cárcavas, de parches en el suelo desnudo y extendiendo las áreas con suelos degradados (Cotler et al., 2017).

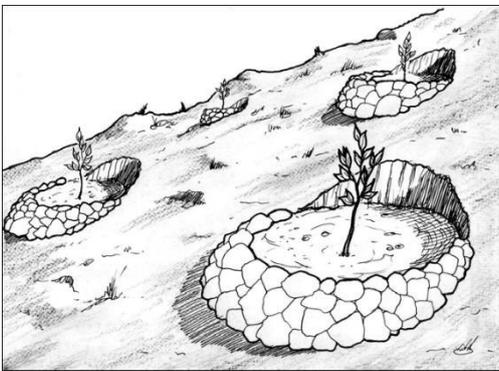
Nota: Imagen recuperada de (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009).

Tabla 32. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de zanjas-bordos para retención de humedad. Elaboración propia (2021).

ZANJAS-BORDOS PARA RETENCIÓN DE HUMEDAD (ZANJAS A NIVEL)		
		
Condiciones sugeridas para su implementación	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se justifica su construcción en zonas secas, pues en zonas húmedas existe el riesgo de la acumulación de agua y la sobresaturación del suelo (PASOLAC, 2005). - En suelos arcillosos se deben hacer las zanjas más profundas, mientras que en suelos arenosos habrá que estabilizar los taludes de la zanja con barreras vivas o muertas (PASOLAC, 2005). - La parcela debe de tener buen drenaje (PASOLAC, 2005). - Se recomienda su implementación en terrenos con pendientes de 10 a 40% (5.7 a 22°) (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014). 	<ul style="list-style-type: none"> - Interceptan los escurrimientos superficiales favoreciendo la infiltración del agua al subsuelo (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009). - Atenúan las condiciones que propician erosión hídrica (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009). - Conducen los escurrimientos a velocidades no erosivas a cauces de arroyos naturales o a cárcavas estabilizadas (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009). - La captura de agua y el aumento de humedad en el suelo favorecen la implantación exitosa de árboles frutales o forestales (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009). 	<ul style="list-style-type: none"> - Las zanjas de infiltración pueden constituir obstáculos al normal tránsito del ganado (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014). - Si no se realiza la limpieza periódica del canal, puede provocar el desborde del agua almacenada y la formación de cárcavas laderas abajo (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014). - Se requiere bastante mano de obra para su construcción.

Nota: Imagen recuperada de CONAFOR (2021).

Tabla 33. Condiciones sugeridas, así como ventajas y desventajas de la implementación de terrazas individuales. Elaboración propia (2021).

TERRAZAS INDIVIDUALES (CAJETEO)		
		
Condiciones sugeridas para su implementación	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - En todas las zonas climáticas, sin embargo, el efecto de conservación de agua es más importante en zonas secas. En zonas húmedas se recomienda implementar un pequeño desagüe en cada terraza (PASOLAC, 2005). - Evitar suelos arenosos, de no ser posible, se recomienda fortalecer las terrazas con barreras muertas o vivas (PASOLAC, 2005). - Suelos con profundidades mayores a 0.3 m (Cardoza et al., 2006). - Se sugieren terrenos con pendientes entre 10 y 50% (5.7 y 26.6°) (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009), siendo posibles en pendientes de hasta 60% (31°) (PASOLAC, 2005). 	<ul style="list-style-type: none"> - Permiten el control de la erosión de laderas (Cardoza et al., 2006). - Retienen el suelo de las escorrentías (Cardoza et al., 2006). - Captan el agua de lluvia, reteniendo y conservando la humedad en áreas localizadas, permitiendo así el desarrollo de especies forestales e incrementando la supervivencia de árboles en reforestación (Cardoza et al., 2006). - Aceleran el desarrollo de especies vegetales (Cardoza et al., 2006). - Mejoran el aprovechamiento de los fertilizantes reduciendo la pérdida por escorrentía (PASOLAC, 2005). 	<ul style="list-style-type: none"> - La construcción de terrazas individuales requiere experiencia y un nivel moderado de conocimientos (PASOLAC, 2005). - Se debe de dar mantenimiento a las terrazas al menos una vez al año, removiendo sedimentos acumulados y reconstruyendo los bordos (Natural Resources Conservation Service, 2007). - Se debe de verificar y evaluar el estado de las terrazas después de un evento de precipitación importante (NRCS, 2007).

Nota: Imagen recuperada de Amilcar (2015).

Viabilidad de implementación de las obras en la microcuenca

De acuerdo con las características biofísicas, topográficas y climáticas presentes en la microcuenca El Laurel y las sugeridas para la implementación de las obras se determina que tanto el régimen climático como la pendiente del terreno no suponen un obstáculo para la instrumentación de las obras, pues la microcuenca presenta un clima de tipo templado subhúmedo con una precipitación media anual de 809 mm, temperatura media de 16° y una notable diferencia de precipitaciones entre estaciones, siendo seco en invierno y húmedo en verano. Estas condiciones aseguran un aporte importante de agua de lluvia sin llegar a padecer una sobresaturación del suelo por humedad excesiva, lo que haría necesaria la implementación de obras adicionales para su drenaje. Respecto a la pendiente, el área de estudio presenta un amplio espectro, habiendo zonas con pendientes planas o casi planas (0-3.4°) hasta fuertemente escarpadas (>33°), pudiéndose adaptar así cualquiera de los métodos de recarga evaluados.

Hablando de la textura del suelo, en el área predominan los suelos arcillosos/arenosos. Esta característica textural representa una limitante para las presas de arena y las presas subsuperficiales, ya que estas requieren suelos con altos porcentajes de componente arenoso, haciéndolas por lo tanto poco viables para implementar. En el caso de las zanjas a nivel, tinas ciegas y terrazas individuales deberá de considerarse aumentar la profundidad de las excavaciones.

De acuerdo con la cobertura vegetal, predomina en la microcuenca el bosque de encino y bosque de encino perturbado, y en menor extensión zonas de pastizales naturales, pastizales inducidos y agricultura de temporal. Si bien este tipo de vegetación no representa una restricción para la implementación de las obras, habrá de tenerse en cuenta que el pastizal inducido está asociado a actividades ganaderas, o la actividad agrícola al uso de pesticidas y fertilizantes, por lo que habrá de considerarse la amenaza que esto representa a la calidad del agua de recarga, sobre todo

si la técnica MAR se implementa aguas abajo, en cuyo caso habrá de requerirse algún método adicional de tratamiento al agua antes de su recarga. Así mismo habrá de procurarse que las obras como zanjas y terrazas no pongan en riesgo o interfieran con el libre tránsito del ganado.

Finalmente se tiene que considerar la complejidad del diseño, y los costos de construcción y mantenimiento. Dentro de las obras propuestas, los pozos profundos para almacenamiento en acuífero y recuperación ASR y ASTR, requieren de una amplia investigación y pruebas piloto para evaluar la permeabilidad de los acuíferos, los cambios químicos en el acuífero, la calidad del agua de recarga, la eficiencia del sistema y el impacto ambiental. Si se suman los costos de investigación previa y construcción del pozo, se pueden alcanzar cifras comprendidas entre los US\$20,000-25,000 por pozo (Escolero, Gutiérrez, y Mendoza, 2017), convirtiéndolo en una tecnología exclusiva para proyectos con alta capacidad de rendimiento y extracción de agua subterránea, siendo, por lo tanto, poco viable para el área de estudio.

De manera similar ocurre con los muros de gaviones, las presas de arena y las presas subsuperficiales. Si bien para estas últimas la complejidad técnica es menor, aun así, se deben de considerar distintos aspectos hidrológicos y desarrollar complejos análisis estructurales. En el caso del muro de gaviones y presas de arena los análisis están encaminados a un correcto diseño de la cortina para que este soporte el empuje hidrostático del agua y los sedimentos. Parámetros como caudal máximo de diseño, fuerzas que actúan sobre la sección crítica unitaria, centro de gravedad de la obra o condición de seguridad al volteamiento, son solo algunos de los cálculos que se deben de realizar. Si bien la implementación del muro de gaviones es viable en la microcuenca El Laurel, los análisis estructurales, así como el material y equipo necesario para su construcción aumentarían considerablemente su tiempo y costo de ejecución.

Tabla 34. Evaluación de las tecnologías MAR y su viabilidad para implementarse en la microcuenca “El Laurel”. Elaboración propia (2021).

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS MAR EN EL ÁREA DE ESTUDIO									
Tecnología	Régimen climático	Características del terreno	Calidad del agua recuperada	Costo	Dificultad de diseño	Operación y mantenimiento	Rendimiento	Confiabilidad	Calificación (viabilidad)
*Estanques de tierra	*****	*****	****	****	*****	****	****	***	4.25
Pozos de recarga someros	*****	*****	***	**	****	****	****	****	3.88
Pozos ASR y ASTR	*****	*****	****	*	**	**	****	****	3.38
Muro de gaviones	*****	****	****	**	***	***	****	***	3.50
Presa de arena	*****	*	****	**	***	****	****	****	3.38
Presas subsuperficiales	*****	**	****	***	***	*****	****	****	3.75
*Tinas ciegas	*****	****	****	*****	*****	*****	***	***	4.25
*Zanjas a nivel	*****	****	****	****	*****	*****	***	***	4.13
*Terrazas individuales	*****	****	****	*****	*****	*****	***	***	4.25

* Obras más viables

Nota: El número de estrellas indican la afinidad entre las características del terreno presentes en el área de estudio y las características del terreno sugeridas para la eficiente implementación de las distintas tecnologías MAR. Siendo cinco estrellas indicativo de mayor afinidad y/o mayores condiciones favorables para su ejecución, mientras que una estrella indicaría lo contrario. Por ejemplo, la dificultad de diseño de los estanques de tierra tiene cinco estrellas, lo que indica una condición muy favorable, es decir poca dificultad de diseño, por otro lado, el costo de implementación de los pozos ASR y ASTR tiene una estrella, indicando una condición muy desfavorable al ser una tecnología muy costosa.

Analizando la viabilidad de las obras mediante un sistema de evaluación en una escala de 1 a 5 (tabla 34), se observa que cuatro tecnologías obtienen una calificación de cuatro o superior, siendo los estanques de tierra, tinas ciegas y terrazas individuales las obras que, por un lado, presentan mayor afinidad a las características presentes en la microcuenca y por el otro, ofrecen condiciones favorables para su implementación. En el caso de las zanjas a nivel, si bien es necesario movilizar mayores cantidades de suelo, su costo-beneficio las hace viables.

Zonas con alto potencial de recarga hídrica, políticas ambientales y elección de las obras MAR que se proponen implementar

Los resultados de la evaluación multicriterio realizada en la etapa 1 demostraron la existencia de 1.21 km² de superficie con una alta capacidad de recarga hídrica natural, convirtiéndose de manera preliminar en las zonas óptimas para la implementación de las obras de recarga (figura 55). La distribución de dichas áreas se vio condicionada principalmente por dos factores: 1) la pendiente del terreno, siendo en estas zonas de medio a poco escarpadas y 2) la cobertura vegetal y uso de suelo, predominando una espesa cobertura de bosque de encino.

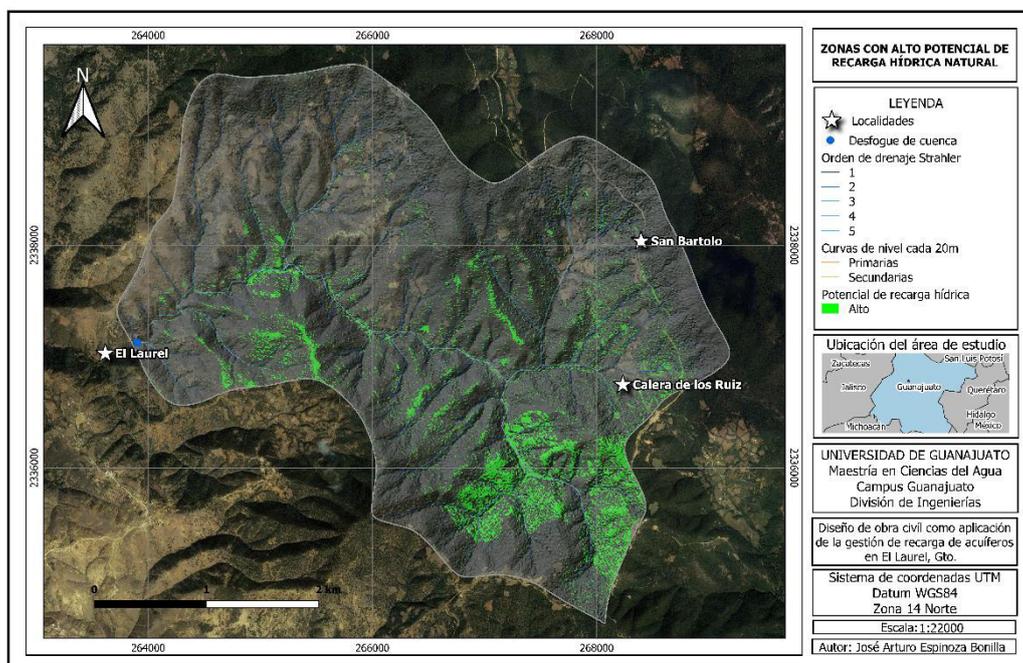


Figura 55. Mapa de zonas con alto potencial de recarga hídrica natural. Elaboración propia (2020).

Como parte del proceso de elección de obras a implementar se juzga fundamental el análisis de las políticas ambientales implementadas en la zona como parte del Modelo de Ordenamiento Sustentable del Territorio en el año 2019 (Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato, 2021), las cuales se muestran en la figura 56 y se detallan en la tabla 35, observándose una fuerte coincidencia espacial entre la zona

con una política ambiental de restauración y las ubicaciones con bajo potencial de recarga hídrica.

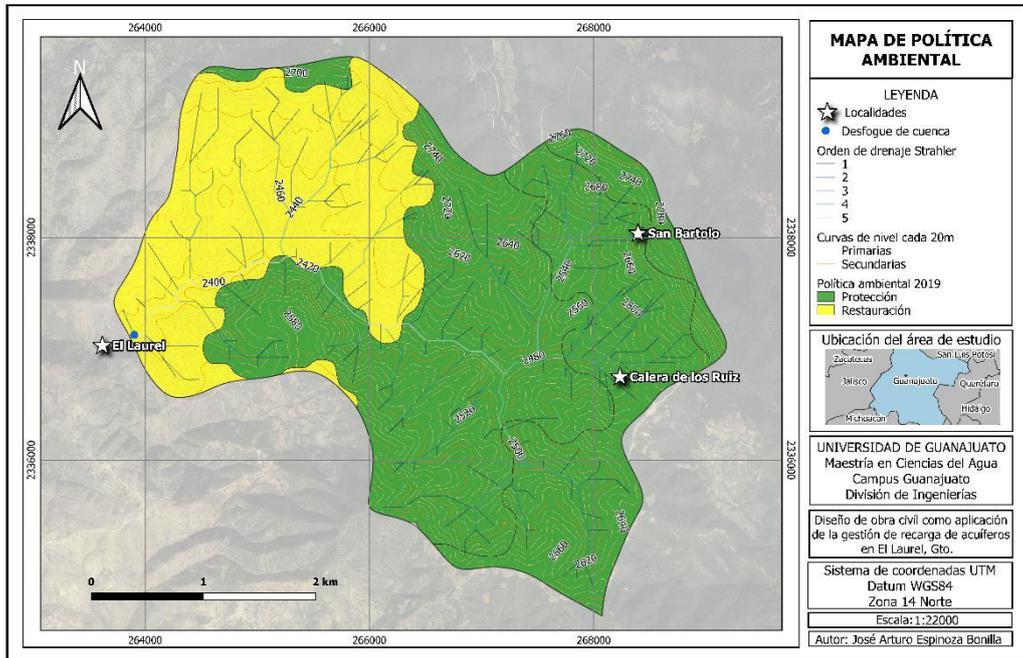


Figura 56. Políticas ambientales implementadas en el área comprendida por la microcuenca “El Laurel” como parte del Modelo de Ordenamiento Sustentable del Territorio en el año 2019. Elaboración propia (2021).

La zona oeste de la microcuenca con una extensión de 5.1 km² (color amarillo en la figura 50) forma parte de una unidad de gestión territorial con una política ambiental de restauración. Entre sus lineamientos se encuentra la recuperación de la cobertura vegetal original y las funciones ecológicas de los ecosistemas deforestados y degradados. Lo anterior demuestra que la zona ha sufrido un importante deterioro forestal y una grave erosión hídrica favorecida por la fuerte pendiente del terreno que predomina en el área (figura 57). Por supuesto, estas características biofísicas contribuyen negativamente a la capacidad de retención de humedad del suelo y a la recarga al acuífero, además de representar una amenaza de inundación al permitir escorrentías más violentas.



Figura 57. Izquierda: laderas con pérdida de cobertura vegetal en las inmediaciones de la comunidad El Laurel. Derecha: paisaje recurrente en la microcuenca “El Laurel”, con exposición de roca y raíces a causa de la pérdida de suelo por la intensa erosión hídrica. Autoría propia (2021).

Por otro lado, la zona central y oriental (color verde en la figura 56) representan 10.6 km² de extensión en los que se han implementado políticas ambientales de protección. Entre sus lineamientos está el de preservar la biodiversidad y las funciones ecológicas de los bosques de encino, y la recuperación de zonas degradadas. El estado ecológico más favorable de dichos sectores se puede observar en la figura 49, ubicándose la mayor parte de zonas de alta recarga hídrica en dichas áreas, demostrando un suelo y cobertura vegetal menos degradados.

Tabla 35. Modelo de Ordenamiento Sustentable del Territorio para la zona comprendida por la microcuenca “El Laurel” en el año 2019. Elaboración propia (2021).

MODELO DE ORDENAMIENTO SUSTENTABLE DEL TERRITORIO 2019 (MICROCUENCA EL LAUREL)			
	Zona oeste	Zona central y extremo oriental	Zona este
UGAT	208	169	218
Política ambiental	Restauración	Protección	Protección
Política territorial	Mejoramiento	Mejoramiento	Mejoramiento
Grupo	Restauración de ecosistemas	Protección de ecosistemas	Protección de ecosistemas y recuperación de zonas degradadas

Lineamientos	<ul style="list-style-type: none"> - Recuperar la cobertura vegetal original y las funciones ecológicas de los ecosistemas, restaurando 439.72 ha a corto plazo, 439.72 ha a mediano plazo y 586.3 ha a largo plazo de zonas preferentemente forestales deforestadas y ecosistemas degradados. - Desarrollar de forma sustentable los aprovechamientos mineros metálicos, sin generar impactos negativos considerables sobre los ecosistemas y garantizando su restauración al fin del periodo de extracción. 	<ul style="list-style-type: none"> - Preservar los ecosistemas prioritarios (16183 ha) mediante el adecuado manejo ambiental de estos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Preservar la biodiversidad y las funciones ecológicas de los ecosistemas (bosque de encino (586.5 ha)), mediante su adecuado manejo ambiental, poniendo especial atención a la recuperación de zonas degradadas, restaurando 5.62 ha a corto plazo, 5.62 ha a mediano plazo y 7.5 ha a largo plazo de zonas preferentemente forestales deforestadas y ecosistemas degradados, y promoviendo el impulso económico de actividades alternativas que procure la adecuada reconversión productiva según la vocación del suelo para un aprovechamiento sustentable de los recursos que evite la disminución del capital natural.
Actividades compatibles	<ul style="list-style-type: none"> - Agricultura de temporal - Ganadería extensiva - Forestal maderable - Forestal no maderable - Turismo alternativo - Infraestructura puntual - Infraestructura lineal - Proyectos de energía eólica - Minería no metálica de alta disponibilidad - Minería metálica 	<ul style="list-style-type: none"> - Forestal no maderable - Turismo alternativo - Asentamientos humanos rurales - Infraestructura puntual - Infraestructura lineal 	<ul style="list-style-type: none"> - Forestal maderable - Forestal no maderable - Turismo alternativo - Infraestructura puntual - Infraestructura lineal - Proyectos de energía eólica - Minería metálica
Actividades incompatibles	<ul style="list-style-type: none"> - Acuicultura - Agricultura de riego - Agricultura de humedad - Agroindustria - Ganadería intensiva - Turismo convencional - Asentamientos humanos rurales - Asentamientos humanos urbanos - Infraestructura de área - Proyectos de energía solar - Industria ligera - Industria mediana - Industria pesada - Minería no metálica de baja disponibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Acuicultura - Agricultura de temporal - Agricultura de riego - Agricultura de humedad - Agroindustria - Ganadería extensiva - Ganadería intensiva - Forestal maderable - Turismo convencional - Asentamientos humanos urbanos - Infraestructura de área - Proyectos de energía eólica - Proyectos de energía solar - Industria ligera - Industria mediana - Industria pesada - Minería no metálica de baja disponibilidad - Minería no metálica de alta disponibilidad - Minería metálica 	<ul style="list-style-type: none"> - Acuicultura - Agricultura de temporal - Agricultura de riego - Agricultura de humedad - Agroindustria - Ganadería extensiva - Ganadería intensiva - Turismo Convencional - Asentamientos humanos rurales - Asentamientos humanos urbanos - Infraestructura de área - Proyectos de energía solar - Industria ligera - Industria mediana - Industria pesada - Minería no metálica de baja disponibilidad - Minería no metálica de alta disponibilidad
Riesgo	Inundación	Sin riesgo	Inundación
Erosión	Alta	Alta	Alta

Si únicamente se considerara el mapa de potencial de recarga hídrica natural, los 5.1 km² más degradados de la microcuenca serían automáticamente descartados para la implementación de cualquier obra de

recarga, sin embargo, aunque la capacidad de recarga es baja dada sus condiciones actuales, la implementación de técnicas MAR que protejan el suelo e incrementen su humedad permitirán: 1) la disminución de la velocidad de escorrentía; 2) disminución de la pérdida de suelos por erosión hídrica; 3) aumento en la humedad del suelo; 4) reforestación del área y 5) incremento eventual en la capacidad de recarga al acuífero.

En el caso de la zona central y oriental, la abundante cobertura vegetal condiciona una media-alta capacidad de recarga hídrica natural, sin embargo, las fuertes pendientes propician la erosión del suelo, dejando al descubierto muchas de las raíces de los árboles. Para evitar un incremento en el deterioro de la zona se recomienda también la implementación de obras que reduzcan la velocidad de escorrentía y aumenten la humedad del suelo, disminuyendo el volumen de agua que drenan los ríos tributarios, los cuales presentan una fuerte escorrentía ante eventos de tormenta, erosionando el suelo y agravando así el problema.

Por lo tanto, evaluando de manera sistemática las características biofísicas de la microcuenca, sus políticas ambientales, las zonas de recarga, así como los beneficios y limitantes de las distintas obras de recarga, se descarta la implementación de pozos ASR y ASTR, pozos de infiltración someros, muro de gaviones, presas de arena y presas subsuperficiales, ya que su tiempo, costo y complejidad de ejecución se incrementan notablemente, además de no contribuir directamente en la disminución de la velocidad de escorrentía, factor que se ha identificado ya como determinante en el deterioro del suelo, la cobertura vegetal y por lo tanto en la capacidad de recarga al acuífero. Por el contrario, se propone la implementación de las siguientes obras al contribuir favorablemente a la disminución de la escorrentía, la remediación del suelo y la recarga hídrica:

1. Estanques de tierra
2. Tinas ciegas
3. Zanjias a nivel
4. Terrazas individuales

En las tablas 36, 37 y 38 se evalúan los tres sectores estratégicos de la microcuenca considerando la cobertura vegetal, pendiente, tipo de suelo, precipitación y potencial de recarga al acuífero, así como su vulnerabilidad o deterioro ambiental, y las medidas necesarias para su mitigación y remediación, determinando así las zonas de implementación más oportunas para las cuatro obras seleccionadas.

Tabla 36. Condiciones particulares de la zona oeste de la microcuenca y obras sugeridas. Elaboración propia (2021).

ZONA OESTE	
	
Área	5.1 km ²
Precipitación media	825 mm/año
Pendiente	<ul style="list-style-type: none"> - Entre 0 y 433% (0 y 77°). - Media de 40% (21.8°).
Cobertura vegetal	<ul style="list-style-type: none"> - 3.4 km² de bosque de encino perturbado con vegetación secundaria arbustiva y herbácea. - 1.2 km² de bosque de encino con vegetación primaria y secundaria arbórea. - 0.44 km² de pastizal natural (incluye pastizal y huizachal). - 0.08 km² de pastizal inducido.
Suelo	<ul style="list-style-type: none"> - 4.2 km² de Luvisol órtico. - 0.86 km² de Feozem lúvico con horizonte árgico.
Potencial de recarga hídrica de la zona con las condiciones biofísicas actuales	Baja
Objetivos ecológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir la velocidad de escorrentía. - Reducir la degradación del suelo. - Incrementar la humedad del suelo. - Recuperar la cobertura vegetal original deforestada. - Recargar el acuífero.
Obras de conservación y remediación sugeridas	<ul style="list-style-type: none"> - Zanjas a nivel - Terrazas individuales - Tinas ciegas - Estanques de tierra

Tabla 37. Condiciones particulares de la zona central y extremo oriental y obras sugeridas. Elaboración propia (2021).

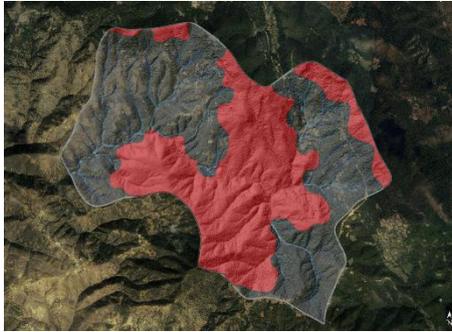
ZONA CENTRAL Y EXTREMO ORIENTAL	
	
Área	6.9 km ²
Precipitación media	806 mm/año
Pendiente	<ul style="list-style-type: none"> - Entre 0 y 540% (0 y 79.5°). - Media de 46.6% (25.0°).
Cobertura vegetal	<ul style="list-style-type: none"> - 6.8 km² de bosque de encino con vegetación primaria y secundaria arbórea. - 0.068 km² de bosque de encino perturbado con vegetación secundaria arbustiva y herbácea. - 0.02 km² de pastizal inducido.
Suelo	<ul style="list-style-type: none"> - 6.89 km² de Luvisol órtico. - 0.01 km² de Feozem lúvico con horizonte árgico.
Potencial de recarga hídrica de la zona con las condiciones biofísicas actuales	Media-Alta
Objetivos ecológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir la velocidad de escorrentía. - Reducir la degradación del suelo. - Incrementar la humedad del suelo. - Mantener la cobertura vegetal original. - Recargar el acuífero.
Obras de conservación y remediación sugeridas	- Tinas ciegas y/o terrazas individuales en sitios puntuales

Tabla 38. Condiciones particulares de la zona este y obras sugeridas. Elaboración propia (2021).

ZONA ESTE	
	
Área	3.7 km ²
Precipitación media	793 mm/año
Pendiente	<ul style="list-style-type: none"> - Entre 0 y 241% (0 y 67.5°). - Media de 46.6% (25.0°).
Cobertura vegetal	<ul style="list-style-type: none"> - 3.26 km² de bosque de encino con vegetación primaria y secundaria arbórea. - 0.38 km² de pastizal inducido. - 0.05 km² de agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes.
Suelo	<ul style="list-style-type: none"> - 3.7 km² de Luvisol órtico. - 0.002 km² de Feozem lúvico con horizonte árgico.
Potencial de recarga hídrica de la zona con las condiciones biofísicas actuales	Media-Alta
Objetivos ecológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir la velocidad de escorrentía. - Reducir la degradación del suelo. - Incrementar la humedad del suelo. - Mantener la cobertura vegetal original. - Recargar el acuífero.
Obras de conservación y remediación sugeridas	- Tinas ciegas y/o terrazas individuales en sitios puntuales

Ubicaciones óptimas para la implementación de las obras

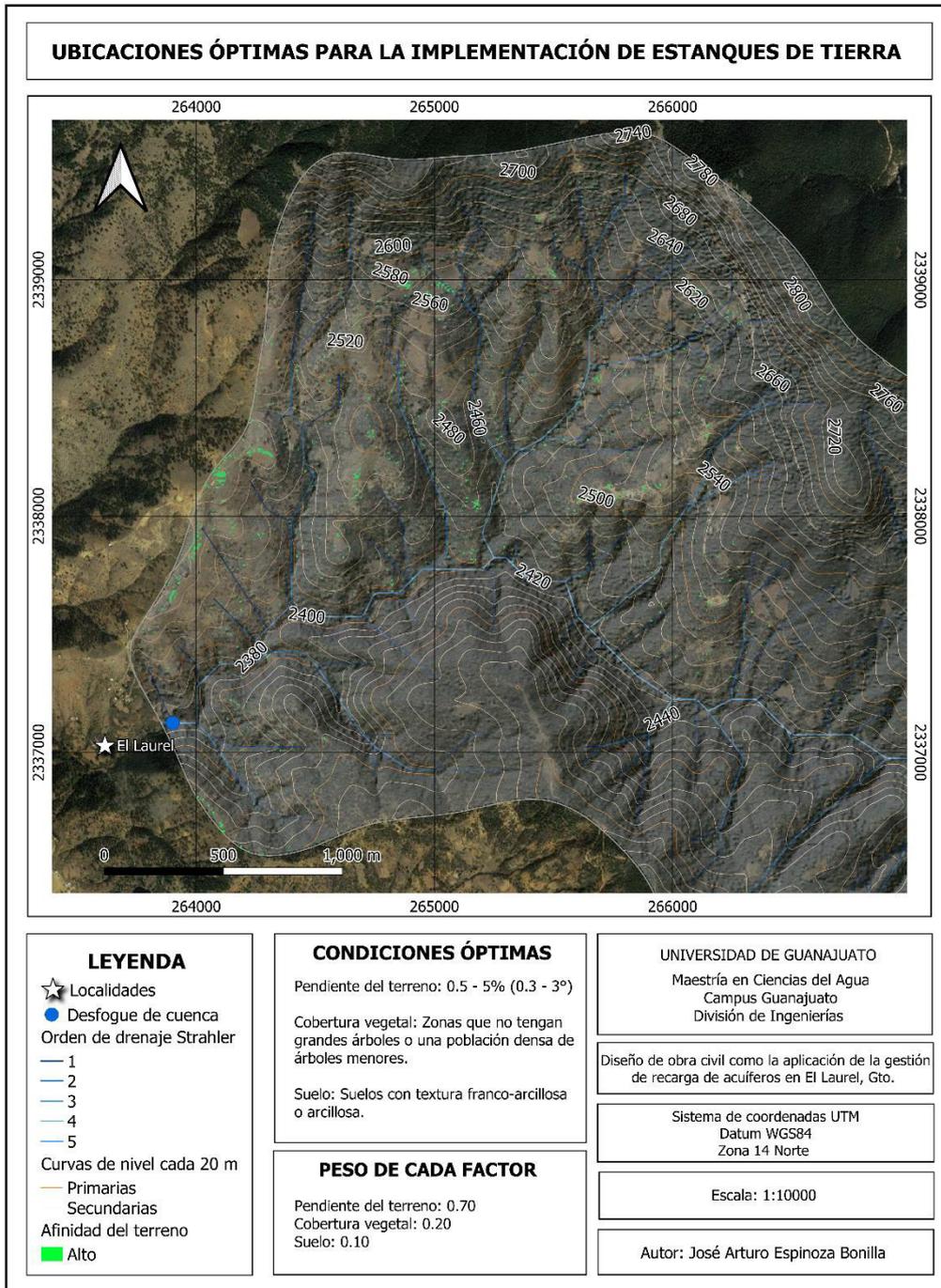


Figura 58. Sitios puntuales para la implementación óptima de estanques de tierra.
Elaboración propia (2021).

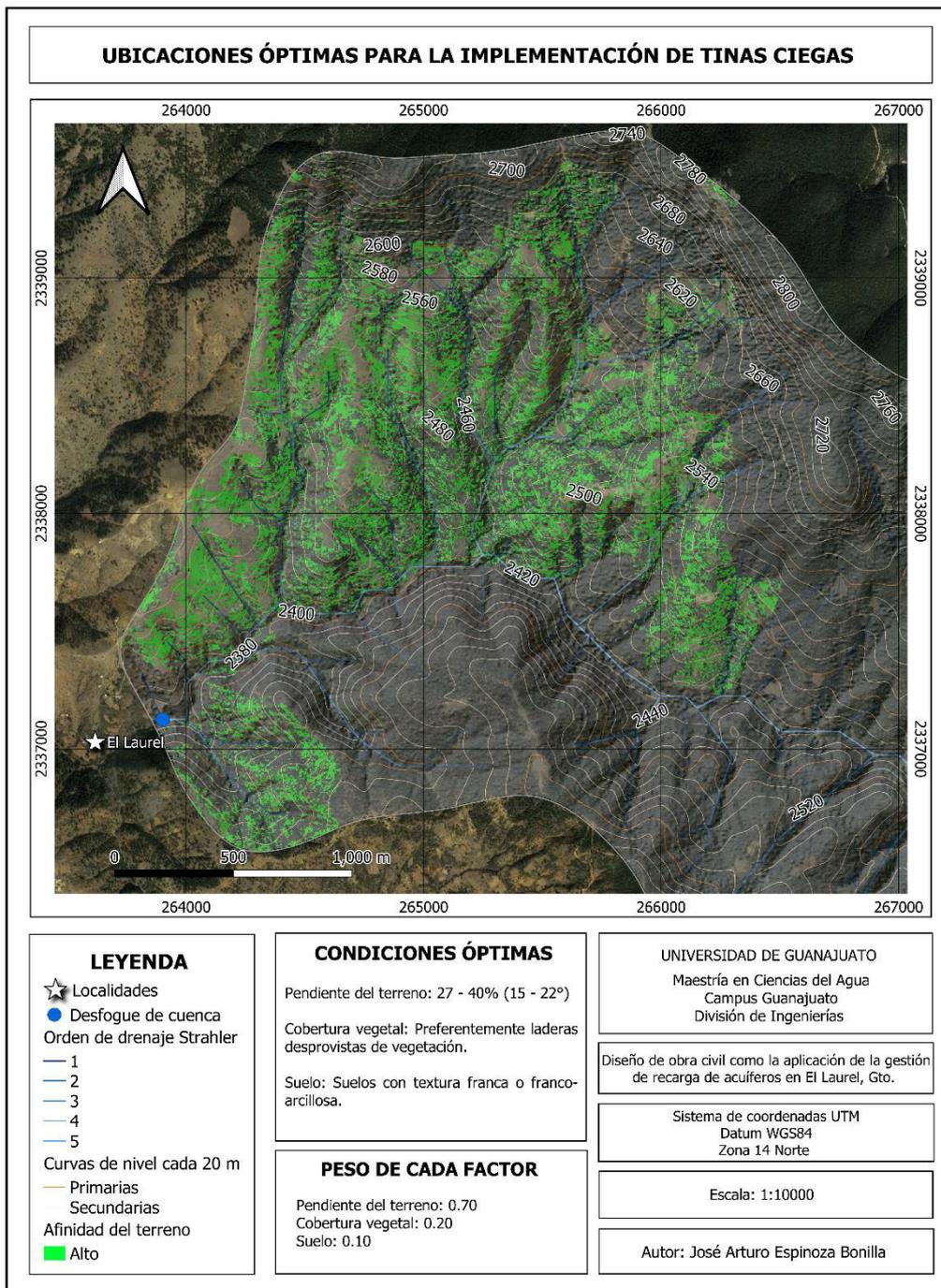


Figura 59. Sitios puntuales para la implementación óptima de tinas ciegas. Elaboración propia (2021).

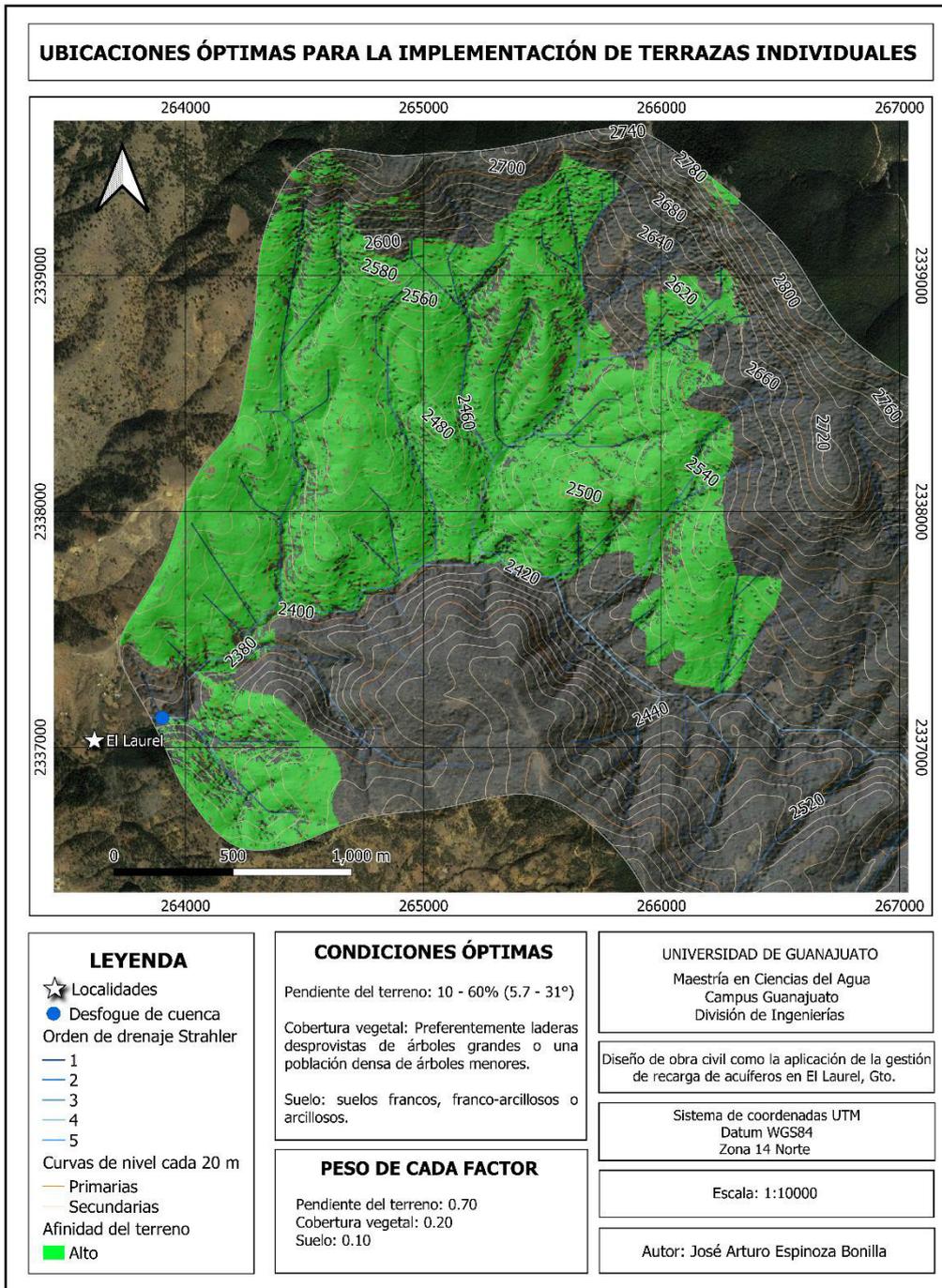


Figura 60. Sitios puntuales para la implementación óptima de terrazas individuales.
Elaboración propia (2021).

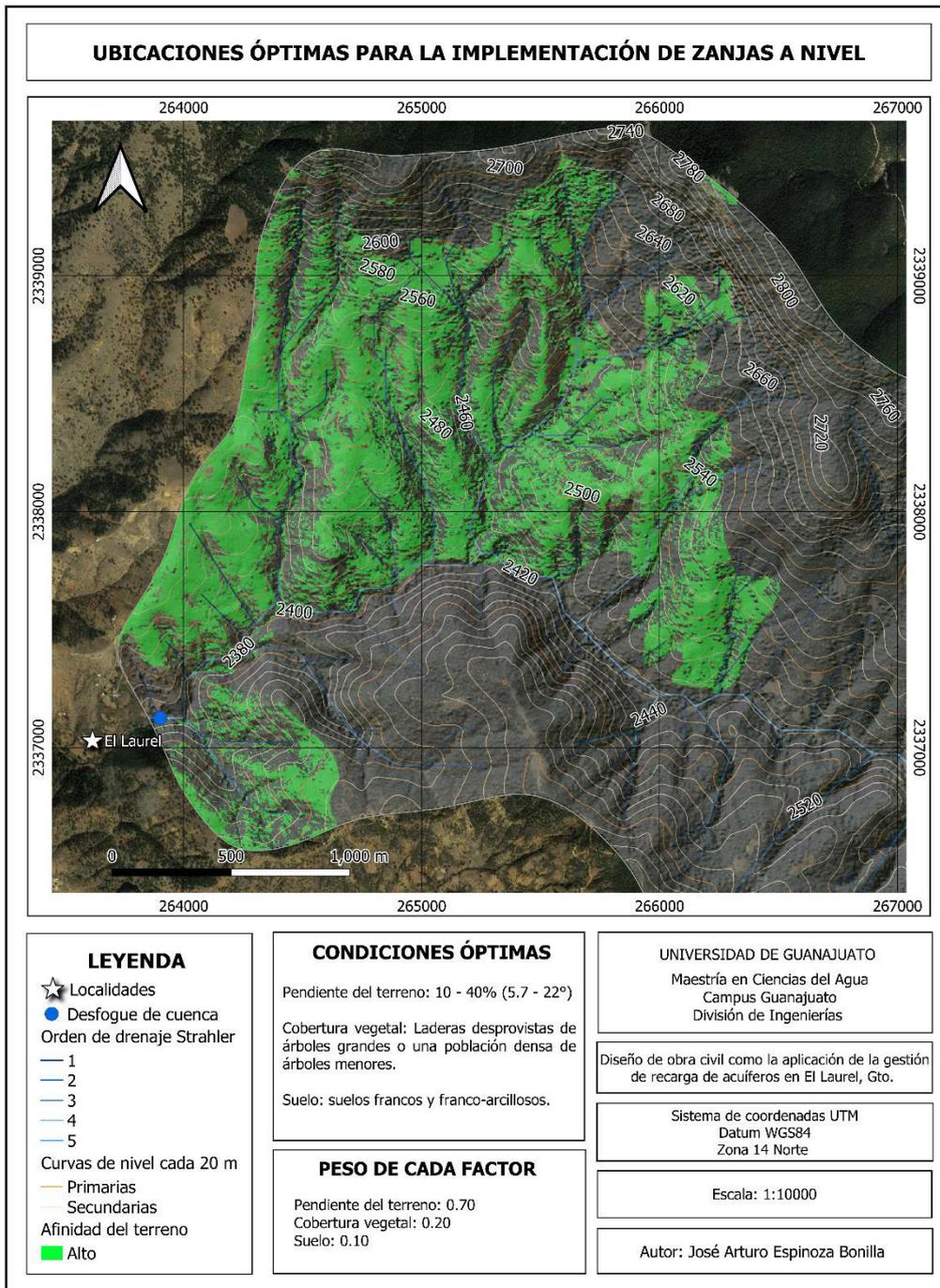


Figura 61. Sitios puntuales para la implementación óptima de zanjas a nivel. Elaboración propia (2021).

Diseño de obras

Estanques de tierra

A partir de la figura 58 se identifican siete sitios para la implementación de estanques de tierra (figura 62 y tabla 39).

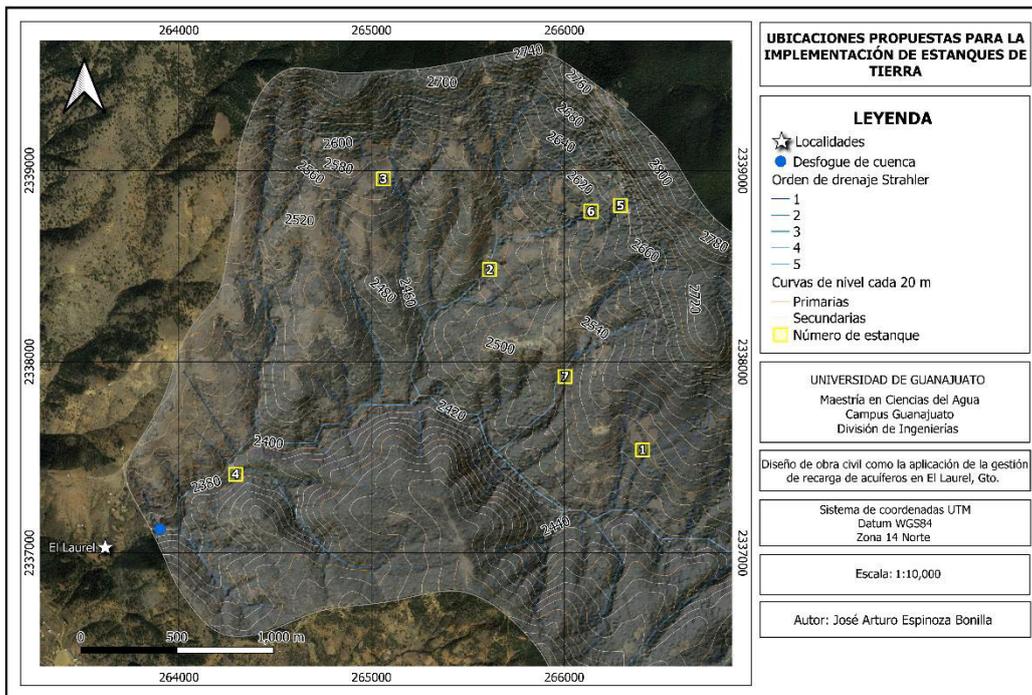


Figura 62. Ubicaciones propuestas para la implementación de estanques de tierra en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

Tabla 39. Ubicaciones propuestas para la implementación de estanques de tierra en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

UBICACIONES DE ESTANQUES DE TIERRA		
Estanque	Coordenada X	Coordenada Y
1	266407	2337539
2	265612	2338482
3	265062	2338957
4	264294	2337412
5	266292	2338818
6	266139	2338787
7	266004	2337923

De acuerdo con Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017) para el diseño de estanques de tierra se debe conocer:

- La cantidad de lluvia anual disponible y su distribución en el tiempo (frecuencia, duración e intensidad).
- La demanda diaria de agua, ya que en muchos sitios se implementan estanques de tierra para diversos usos del medio rural, sobre todo actividades pecuarias.

En el caso de la microcuenca de estudio, los objetivos de su implementación es la de incrementar la humedad del suelo y la recarga hídrica al acuífero, por lo que para su diseño únicamente se requerirá el dimensionamiento de los jagüeyes (sin un volumen mínimo de almacenamiento), diseño del vertedor de excedencias, la implementación de canales de llamada, la conformación y compactación de los terraplenes y la implementación de pequeñas obras aguas arriba para retener los sedimentos y disminuir los azolves en los estanques.

Ejemplo de aplicación

Estanque 1 (Coordenadas: UTM 14N 266407, 2337539)

El sitio de implementación se ubica sobre una superficie desprovista de vegetación, la cual forma un círculo de aproximadamente 25 m de diámetro con una pendiente de terreno muy baja, de entre 0 y 0.5 %. El suelo es de tipo de luvisol órtico, el cual tiene una textura arcillosa. La precipitación media anual de la zona es de 825 mm.

1) Dimensionamiento del estanque: ya que se pretende almacenar agua para aumentar la humedad del suelo y la recarga al acuífero, no es necesario estimar un volumen mínimo de almacenamiento del estanque, lo que brinda cierta libertad en el diseño y dimensionamiento de este. Para facilitar este paso se propone establecer la forma del estanque mediante la aproximación a figuras regulares conocidas (cuadrado, rectángulo, círculo, etc.), en este caso se propone que el estanque tenga una forma rectangular

con unas dimensiones de 8 m x 4 m en el plano a, 7 m x 3 m en el plano b y 6 m x 2 m en el plano c y 1 m de profundidad, tomando como referencia el diseño de la figura 63.

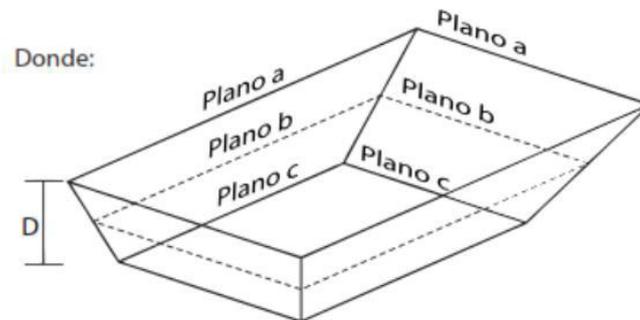


Figura 63. Ejemplo de jagüey rectangular. Recuperado de Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017).

El volumen que tendrá el estanque se calcula mediante la ecuación 11. En terrenos planos o muy planos como es el caso de todas las ubicaciones propuestas para la implementación de estanques dentro de la microcuenca, la relación del volumen de tierra removido y el volumen de almacenamiento del estanque (en caso de no implementarse un vertedor de demasías) será de 1:1.

$$V = \frac{A + 4B + C}{6} * D$$

Ec. 11. Estimación del volumen de excavación para jagüeyes pequeños. Recuperado de Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017).

Donde:

V: Volumen de excavación (m³).

A: Área del plano a (m²).

B: Área del plano b (m²).

C: Área del plano c (m²).

Sustituyendo las dimensiones propuestas en la ecuación 11 se obtiene un volumen de excavación de $V = 21.3 \text{ m}^3$.

2) Estimación del gasto máximo Q para el diseño del vertedor de excedencias: se calcula mediante el método racional modificado, en el que se requieren los valores de lluvia máxima en 24 horas para periodos de retorno de al menos 10 años de acuerdo con Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017), para un periodo crítico, la lluvia reportada en 24 horas puede presentarse en una hora, por esta razón este valor se debe expresar en mm/hr), área de captación del estanque (ha) y coeficiente de escurrimiento (adim.). El gasto máximo del vertedor se estima mediante la ecuación 12.

$$Q = \frac{C_e * i * A}{360}$$

Ec. 12. Estimación del gasto de diseño para pequeñas obras según el método racional modificado. Recuperado de Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017).

Donde:

Q: Gasto máximo del vertedor Q (m³/s).

C_e: Coeficiente de escurrimiento (Adim.), este dato se puede aproximar mediante las tablas 40 y 41 y las ecuaciones 13a y 13b.

i: Intensidad de la precipitación (mm/hr), se obtiene mediante el registro de estaciones climatológicas.

A: Área de captación (ha).

Tabla 40. Tipos de suelo. Recuperado de la NOM-011-CONAGUA-2015 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2015).

TIPOS 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.

Tabla 41. Valores de K en función del tipo y uso del suelo. Recuperado de la NOM-011-CONAGUA-2015 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2015).

VALORES DE K EN FUNCIÓN DEL TIPO Y USO DEL SUELO			
Uso de suelo	Tipo de suelo		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos			
En hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal: % del suelo cubierto o pastoreo			
Mas del 75% - Poco -	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75% - Regular -	0.20	0.24	0.30
Menos del 50% - Excesivo -	0.24	0.28	0.30
Bosque			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50% al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

En función del valor obtenido de K se empleará alguna de las siguientes dos ecuaciones para obtener el coeficiente de escurrimiento anual (C_e): Si K resulta menor o igual que 0.15 se utilizará la ecuación 13a, y si K resulta mayor que 0.15 se utilizará la ecuación 13b.

$$(a) \quad C_e = \frac{K * (P - 250)}{200}$$

$$(b) \quad C_e = \frac{K * (P - 250)}{200} + \frac{(K - 0.15)}{1.5}$$

Ec. 13. Estimación de C_e . Recuperado de Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017).

Donde:

P: Precipitación media anual (mm).

El sitio de implementación del estanque presenta un suelo arcilloso con una cobertura de bosque de encino de más del 75%, por lo que $K = 0.24$. Ya que el valor de K es mayor 0.15, para estimar C_e se utilizará la ecuación 13b. Si esa zona de la microcuenca presenta una precipitación media anual de 806 mm, sustituyendo los datos K y P en la ecuación 13b se obtiene que $C_e = 0.73$.

El dato de intensidad de precipitación o precipitación máxima en 24 h de la microcuenca se obtiene mediante la interpolación de las normales climatológicas de precipitación máxima diaria de las estaciones climatológicas de La Luz, Ciénega de Negros y Santa Julia. Dicha interpolación muestra una lluvia máxima diaria de $i = 104$ mm/día. Ya que las tres estaciones tienen más de 20 años de registro de lluvia, el dato de lluvia máxima de diseño corresponde a un periodo de retorno mayor a 10 años, garantizando seguridad en el diseño. Finalmente, el área de captación que drena hacia la ubicación propuesta para la construcción del estanque es de $A = 3.15$ ha. Sustituyendo todos los datos en la ecuación 12 se obtiene un gasto máximo para el vertedor de $Q = 0.66$ m³/s.

3) Diseño del vertedor: para estimar la carga sobre el vertedor (m) se aplica la ecuación 14.

$$h_v = \left(\frac{Q}{C_R * L} \right)^{2/3}$$

Ec. 14. Estimación de la carga sobre el vertedor. Recuperado de Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017).

Donde:

Q: Gasto máximo para el vertedor (m³/s).

CR: Coeficiente del vertedor (adim.) = 1.45.

L: Longitud del vertedor (m). De no existir alguna restricción en el sitio, el valor de *L* se propone de acuerdo con las proporciones del propio estanque.

Para el caso de este estanque se propone un vertedero con longitud de 3 m, por lo que al sustituir todos los datos en la ecuación 14 se obtiene que la carga sobre el vertedor es $h_v = 0.28$ m. Si bien para obtener la altura final del vertedor habría que sumar H_v y la altura de libre bordo mínimo (LB), si se considera que la pendiente del terreno es casi plana y el estanque poco profundo (1 m), se propone considerar como altura de la estructura vertedora únicamente el libre bordo mínimo (LB) de 0.2 m sugerido por Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez (2017), al no comprometerse la integridad de la obra si el agua alcanza dicho nivel. Por lo tanto, se sugiere como dimensiones finales de la estructura vertedora: 3 m de ancho y 0.2 m de altura.

4) Canal de llamada: servirán para captar y conducir el agua desde laderas y cauces hasta la obra principal. Las dimensiones, ubicación precisa y materiales de construcción deberán adaptarse a cada estanque. Para el estanque 1 se propone construir al menos un canal de llamada consistente en una excavación de 87 m de largo por 1 m de ancho y 0.15 m de profundidad, el cual conducirá agua desde el río tributario más cercano. Para cumplir a su vez la función de desarenador al favorecer la decantación del material en suspensión se sugiere el recubrimiento del canal con una cama de grava (granulometría de 30 – 40 mm).

5) Estabilidad y compactación del talud: para garantizar la estabilidad de la estructura se sugiere que el talud mínimo sea 2:1 en el lado en contacto con el agua y 3:1 aguas abajo (Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez, 2017). La compactación del talud se determina con base en el grado de compactación, que es la relación del peso volumétrico seco sobre el peso volumétrico seco óptimo expresado en por ciento. Por lo general, los taludes y terraplenes se llevan a un grado de compactación mínimo de 85%, resultando en terraplenes económicos (Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez, 2017).

En el caso del estanque 1, este se encuentra sobre un terreno sin pendiente, lo cual permite prescindir de un terraplén, por otro lado, para los taludes se ha propuesto desde el dimensionamiento del estanque una relación de ancho y alto 3:1, brindando una mayor estabilidad a los mismos, ya que por la topografía del terreno y la ubicación del estanque resulta inviable la compactación de los taludes mediante tractores, limitándose al trabajo manual con palas y herramienta simple.

6) Operación y mantenimiento: en general el mantenimiento de estanques no requiere supervisión especializada. Sin embargo, se insiste en que la principal amenaza de los jagüeyes es la acumulación de azolve disminuyendo la vida útil de la obra. Para disminuir dicho problema se aconseja complementar la obra con pequeñas estructuras aguas arriba diseñadas para retener los sedimentos (Fernández, Martínez, Ramírez, y Martínez, 2017). Ya que los mismos autores mencionan que esta práctica conservacionista está enfocada únicamente en retener sedimentos, y resulta útil sin importar el orden en que estas se distribuyan, se sugiere para el estanque 1 la construcción de una hilera de ocho tinajas ciegas en forma de media luna aguas arriba. Para las dimensiones de las tinajas se proponen las medidas “estándar”: 2 m de largo, 0.4 m de ancho y 0.4 m de profundidad (Cardoza et al., 2006), y una separación de 2 m entre tina y tina. Adicionalmente se sugiere construir un cerco perimetral de alambre de 80 m de circunferencia, para evitar el acceso directo de ganado que pueda contaminar o dañar el jagüey, así como reducir el riesgo de que niños puedan ingresar al estanque.

7) Costo del estanque: en la tabla 42 se presentan los costos aproximados de material y mano de obra para la construcción del estanque. El costo unitario jornal corresponde al salario base de cotización promedio diario para trabajadores del campo establecido en la Resolución del H. Consejo de Representantes de la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos que fija los salarios mínimos generales y profesionales que habrán de regir a partir del 1 de enero de 2021 (DOF, 2020). Los costos del material se

proponen de manera aproximada tomando como referencia los precios en establecimientos locales o tiendas digitales para el año 2021.

Tabla 42. Costos aproximados para la construcción del estanque 1. Elaboración propia (2021).

COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DEL ESTANQUE 1				
Concepto	Unidad de medida	Costo unitario (MXN)	Cantidad requerida	Costo total (MXN)
Desmante, desenraice, deshierbe y limpia del terreno	Jornal	\$ 215	0.5	\$ 108
Excavación del vaso de almacenamiento (puede incluir conformación del terraplén)	Jornal	\$ 215	4	\$ 860
Excavación de terrazas individuales	Jornal	\$ 215	2	\$ 430
Excavación de canal de llamada	Jornal	\$ 215	2	\$ 430
Grava para el canal de llamada	m ³	\$ 220	13	\$ 2860
Cercado perimetral	m	\$ 18	80	\$ 1440
			Total estanque	\$ 6,128.00

Un estanque con dimensiones similares al ejemplo propuesto y construido en un terreno con características biofísicas equivalentes tendría un costo aproximado de \$6,128.00 MXN.

Tinas ciegas

Con base en la figura 59 se proponen cinco parcelas para la implementación de tinas ciegas (figura 64 y tabla 43).

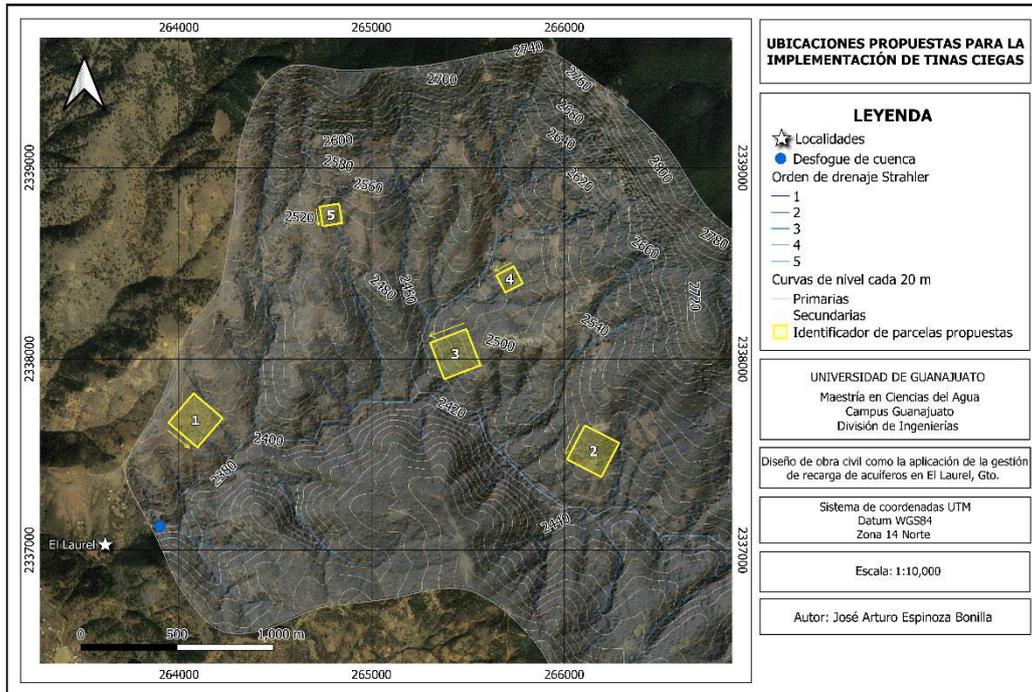


Figura 64. Parcelas propuestas para la implementación de tinas ciegas en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

Tabla 43. Parcelas propuestas para la implementación de tinas ciegas en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

UBICACIONES DE TINAS CIEGAS			
Identificador de parcela	Coordenada X (centroide)	Coordenada Y (centroide)	Área (ha)
1	264086	2337679	4
2	266150	2337518	4
3	265434	2338026	4
4	265716	2338417	1
5	264789	2338754	1

De acuerdo con Rubio, Martínez, y Sánchez (2009) para el diseño de las tinas ciegas se deben considerar los siguientes puntos:

- La pendiente media del sitio en donde se van a construir las tinas ciegas.
- Características del terreno (tipo de suelo, cobertura vegetal, topografía, acceso al sitio, etc.).
- Determinar el espaciamiento vertical y horizontal entre tinas.
- Estimar el escurrimiento máximo que se tiene en el sitio con objeto de que las tinas no sufran rompimientos.
- Estimar escurrimiento medio para el cálculo de llenado de la tina.

Ejemplo de aplicación

Parcela 1 (Coordenadas centroide: UTM 14N 264086, 2337679)

El terreno por trabajar tiene unas dimensiones de 200 x 200 m, la cota de la parte más alta es de 2,460 y la de la parte baja de 2,412 msnm. Se presentan dos corrientes intermitentes en el sitio de la obra. El suelo presente es feozem lúvico, el cual tiene una textura arcillosa fácil de trabajar. Como vegetación predomina el pastizal natural (pastizal y huizachal) y algunos encinos dispersos. La precipitación media anual de la zona es de 825 mm. Para la lluvia máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 5 años se considerarán 75 mm, ya que corresponde aproximadamente al 70% del territorio nacional (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009).

1) Trazado de curva de nivel: Se trazará la curva de nivel o hilera sobre la que se iniciaran los trabajos, ya que esta servirá de referencia para el resto de las líneas. Se sugiere trazar la curva de nivel 2,450.

2) Pendiente del terreno: se determinará con la ecuación 15.

$$P = \frac{\text{Cota parte alta} - \text{Cota parte baja}}{\text{Longitud del terreno}}$$

Ec. 15. Determinación de la pendiente media en campo. Recuperado de Rubio, Martínez, y Sánchez (2009).

De acuerdo con las dimensiones de la parcela se define un área de trabajo de $A = 4$ ha, mientras que sustituyendo las cotas y la longitud del terreno en la ecuación 15 se determina una pendiente media del terreno de 24 %.

3) Intervalo vertical y horizontal entre tinas: el intervalo vertical (espacio entre cada tina sobre la misma curva de nivel) se calculará mediante la ecuación 16, mientras que el intervalo horizontal (distancia entre cada línea de tinas) con la ecuación 17.

$$IV = \left(2 + \frac{P}{3 \text{ o } 4}\right) (0.305)$$

Ec. 16. Determinación del intervalo vertical entre tinas ciegas. Recuperado de Rubio, Martínez, y Sánchez (2009).

Donde:

IV: Intervalo vertical (m).

P: Pendiente del terreno (%).

3 o 4: 3 es el factor que se utiliza para áreas con menos de 1,200 mm de lluvia al año; 4 es el factor que se utiliza para regiones con precipitación mayor a 1200 mm.

0.305: Factor de ajuste de unidades.

$$IH = \left(\frac{IV}{P}\right) * 100$$

Ec. 17. Determinación del intervalo horizontal entre tinas ciegas. Recuperado de Rubio, Martínez, y Sánchez (2009).

Donde:

IH: Intervalo horizontal (m).

IV: Intervalo vertical (m).

P: Pendiente del terreno (%).

Sustituyendo los datos requeridos en ambas ecuaciones se obtiene que el intervalo vertical es de 3.05 m y el horizontal de 12.70 m. Para fines prácticos se podría considerar $IV = 3$ m e $IH = 12$ m.

4) Cálculo del volumen escurrido hacia la tina: primero se procede a determinar el coeficiente de escurrimiento (*C*) utilizando los datos de uso actual del suelo y de su textura, así como los de la pendiente. Para ello será necesario auxiliarse de la tabla 44.

Tabla 44. Factores para determinar el coeficiente de escurrimiento (*C*). Recuperado de Recuperado de Rubio, Martínez, y Sánchez (2009).

FACTORES PARA DETERMINAR C				
Uso	Pendiente %	Textura		
		Gruesa	Media	Fina
Agrícola (cultivos)	0 a 2	0.08	0.11	0.14
	2 a 6	0.13	0.15	0.19
	>6	0.16	0.21	0.26
Pastizales	0 a 2	0.12	0.18	0.24
	2 a 6	0.20	0.28	0.30
	>6	0.30	0.37	0.44
Bosque	0 a 2	0.05	0.08	0.10
	2 a 6	0.08	0.11	0.13
	>6	0.11	0.14	0.16

Considerando que en el área predominan pastizales naturales, el suelo es de textura media y se presenta una pendiente mayor del 6%, se determina que $C = 0.37$.

El volumen de agua que una tina puede retener en función de las características de construcción de esta se calculará mediante la ecuación 18.

$$A = E * C * L * 10$$

Ec. 18. Volumen de agua que una tina puede retener. Recuperado de Rubio, Martínez, y Sánchez (2009).

Donde:

A: Capacidad de almacenamiento (l/m).

E: Intervalo horizontal entre tinas o IH (m).

C: Coeficiente de escurrimiento (adimensional).

L: Lluvia máxima en 24 horas (cm).

10: Factor de ajuste de unidades.

Considerando que $E = 12$ m; $C = 0.37$ y $L = 7.5$ cm, se obtiene que el volumen que puede escurrir como máximo en un periodo de retorno de 5 años sería $A = 333$ l/m.

5) Dimensionamiento de la tina: si se propone un largo de tina de 2 m, entonces el volumen que puede escurrir es de 666 l. De acuerdo con esta información, se propone que las dimensiones de la tina sean de 2 m de largo, 0.6 m de ancho y 0.6 m de profundidad, lo que da una capacidad de almacenamiento por tina de 720 l (figura 65).

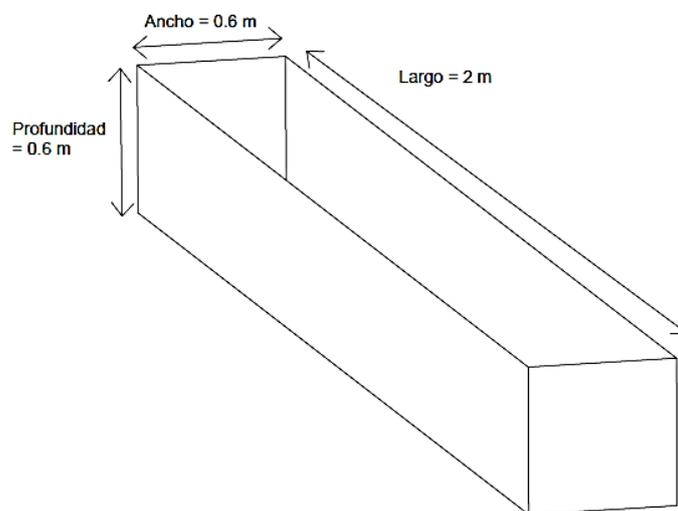


Figura 65. Dimensiones propuestas para las tinas ciegas de la parcela 1. Elaboración propia (2021).

El volumen máximo que podría escurrir del área de drenaje de cada tina para un periodo de retorno de 5 años es de 666 l, y si la capacidad de almacenamiento de agua de la tina es de 720 l, se considera que la

capacidad de la tina es suficiente para almacenar un evento extraordinario que se presente en promedio al menos una vez cada cinco años.

6) Cantidad de tinas: se evaluará una hectárea de 100 x 100 m. En una línea de 100 m se tienen 100/2 m de largo por tina, pero se considera que entre dos tinas consecutivas existe un tramo ciego con una longitud de 3 m, lo que nos arroja una cantidad de 20 tinas por línea.

Como el espaciamiento horizontal es igual a 12 m; entonces $100/12 = 8.33 \approx 8$ líneas por hectárea. Por lo tanto, en una hectárea habrá 8 líneas con 20 tinas cada una, pudiendo así construir hasta 160 tinas por hectárea (figura 66). Si la parcela 1 tiene un área de 4 hectáreas, se podrían construir en total 640 tinas ciegas.

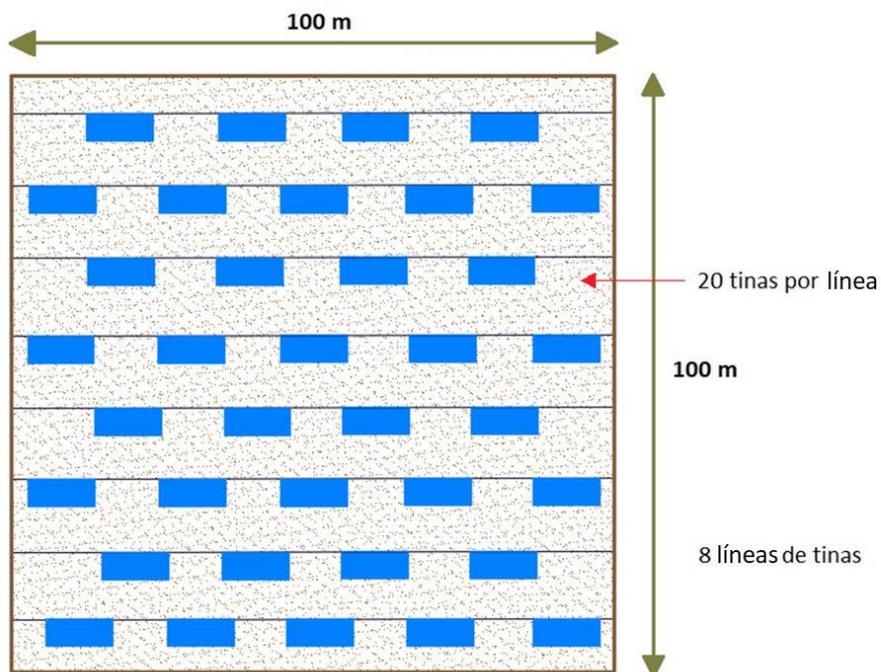


Figura 66. Distribución en “tres bolillo” de tinas ciegas en una hectárea de la parcela 1 considerando las dimensiones propuestas. Elaboración propia (2021). Notas: 1) En el terreno las líneas no se trazarán completamente rectas, sino que habrá que seguir las curvas de nivel. 2) La figura no está a escala.

7) Volumen de excavación: Considerando que una tina tiene 2 m de largo, 0.6 m de ancho y 0.6 m de profundidad, el volumen de excavación sería de $0.72 \text{ m}^3/\text{tina}$. Si una hectárea se cubre con 160 tinas, entonces $160 \text{ tinas} \times$

0.72m³/tina se tendría un volumen de excavación de 115 m³/ha, por lo tanto, el total de volumen de excavación para la parcela 1 sería de 460 m³. Resulta necesario mencionar que el material producto de la excavación se debe de depositar aguas debajo de las tinas, compactándolo convenientemente para evitar que el suelo se mueva aguas abajo (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009).

7) Costos: en la tabla 40 se presentan los costos aproximados para la construcción de las tinas ciegas por hectárea de acuerdo con las dimensiones propuestas (160 tinas). El costo unitario jornal corresponde al salario base de cotización promedio diario para trabajadores del campo establecido en la Resolución del H. Consejo de Representantes de la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos que fija los salarios mínimos generales y profesionales que habrán de regir a partir del 1 de enero de 2021 (DOF, 2020).

Tabla 45. Costos aproximados para la construcción de una hectárea de tinas ciegas en la parcela 1. Elaboración propia (2021).

COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE TINAS CIEGAS POR PARCELA				
Concepto	Unidad de medida	Costo unitario \$ (MXN)	Cantidad requerida	Costo total \$ (MXN)
Trazo de curvas de nivel	Jornal	\$ 215	0.25	\$ 54
Limpia del terreno	Jornal	\$ 215	0.75	\$ 162
Excavación de tinas ciegas	Jornal	\$ 215	25	\$ 5,375
Compactación del material excavado	Jornal	\$ 215	8	\$ 1,720
			Total por hectárea	\$ 7,311.00

El costo de cada tina ciega sería de aproximadamente \$46.00 MXN, por lo tanto, en la parcela 1 se requeriría una inversión total de \$29,440.00 MXN para la construcción de 640 tinas.

Terrazas individuales

Con base en la figura 60 se proponen seis parcelas para la implementación de terrazas individuales (figura 67 y tabla 46).

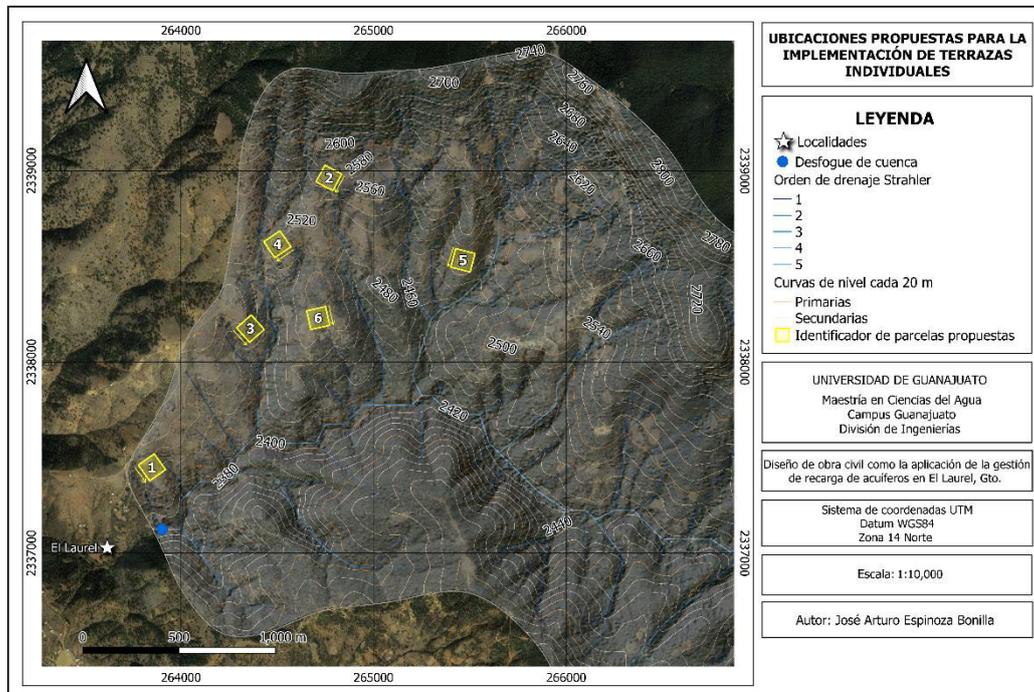


Figura 67. Parcelas propuestas para la implementación de terrazas individuales en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

Tabla 46. Parcelas propuestas para la implementación de terrazas individuales en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

UBICACIONES DE TERRAZAS INDIVIDUALES			
Identificador de parcela	Coordenada X (centroide)	Coordenada Y (centroide)	Área (ha)
1	263850	2337449	1
2	264768	2338963	1
3	264361	2338175	1
4	264500	2338616	1
5	265463	2338532	1
6	264712	2338230	1

Las terrazas individuales son terraplenes de forma circular, construidos a nivel o en contra pendiente, sobre el cual se establece alguna especie forestal (Comisión Nacional Forestal, 2007). Se trata de una obra de diseño simple que se adapta a un amplio margen de pendientes y terrenos. Para la construcción de estas obras se deberá de considerar lo siguiente:

- El trazado de las curvas de nivel sobre las que se construirán las terrazas.
- Las dimensiones de las terrazas, su disposición y distanciamiento entre ellas.
- La correcta excavación de las terrazas y conformación de bordos.
- Plantación de especies vegetales afines al área de trabajo.

Ejemplo de aplicación

Parcela 1 (Coordenadas centroide: UTM 14N 263850, 2337449)

El terreno por trabajar tiene unas dimensiones de 100 x 100 m, la cota de la parte más alta es de 2,443 y la de la parte baja de 2,420 msnm, la pendiente promedio es de 23%. El suelo presente es feozem lúvico, el cual tiene una textura arcillosa fácil de trabajar. Como vegetación predomina el pastizal natural (pastizal y huizachal). La precipitación media anual de la zona es de 825 mm.

1) Trazado de curva de nivel: Se trazará la curva de nivel o hilera sobre la que se iniciaran los trabajos, ya que esta servirá de referencia para el resto de las líneas. Se sugiere comenzar trazando la curva 2,440 y continuar con el resto de manera descendente.

2) Dimensiones de las terrazas y distanciamiento entre ellas: las terrazas individuales deben tener como mínimo un metro de diámetro y al menos 10 cm de profundidad de corte (figura 68), con taludes estabilizados utilizando materiales disponibles en el campo (CONAFOR, 2007).

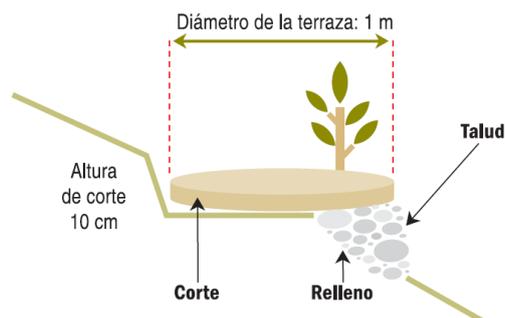


Figura 68. Sección transversal de una terraza individual. Recuperado de Cardoza et al. (2006).

Respecto a su distribución, se recomienda un distanciamiento en “tres bolillo” de 3 m entre cajete y cajete, tanto en el intervalo vertical como horizontal (figura 69).

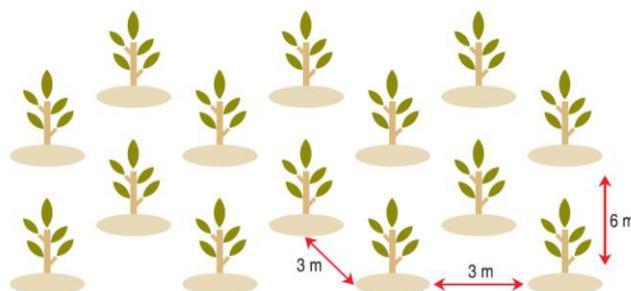


Figura 69. Distribución de terrazas individuales con especies forestales en “tres bolillo”. Recuperado de Cardoza et al. (2006).

Para fines prácticos en la parcela de trabajo 1 se sugiere mantener las dimensiones de las terrazas sugeridas en la literatura, así como la distribución en “tres bolillo” con un espaciamiento de 3 x 3 m siguiendo las curvas de nivel.

3) Construcción de las terrazas: de acuerdo con Cardoza et al. (2006) y CONAFOR (2007), para su construcción, se utilizará una estaca y una cuerda de 0.5 m de largo; trazando un círculo de un metro de diámetro y 10 cm de profundidad (la terraza deberá poder almacenar un espejo de agua de 10 cm). Posteriormente se excavará en la parte superior del círculo, depositando y conformando un bordo circular con el suelo excavado el cual permitirá almacenar agua de lluvia y proporcionará humedad a las especies

forestales plantadas (figura 70). Es recomendable que dicho talud se refuerce con piedras u otro material disponible en el terreno.



Figura 70. Terraza individual con taludes estabilizados. Recuperado de CONAFOR (2007).

4) Plantación de especies vegetales: para este tipo de obra, se recomiendan especies forestales u otras como el maguey, nopal o frutales (Cardoza et al., 2006).

- Para la plantación en las terrazas individuales se abre un hoyo de 40 cm de profundidad y 30 cm de ancho dentro de cada terraza, el cual es aconsejable llenar con tierra de encino o una mezcla de guano, paja y la misma tierra del hoyo (Proyecto JALDA, 2003).
- Posteriormente se colocará la planta dentro del hoyo, formando con las manos un pequeño montón de tierra alrededor del tronco de la planta (Proyecto JALDA, 2003). No se aconseja colocar la planta exactamente en el centro de la terraza, pues en periodo de lluvias el agua almacenada en abundancia puede causar problemas de exceso de agua a las plantas (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009).
- Finalmente, se recomienda colocar paja, hierbas y pequeñas piedras alrededor de cada planta (Proyecto JALDA, 2003). Esta práctica conocida como “mulch” ayudará a mantener la humedad en el suelo, evitando que las plantas se sequen durante los periodos secos y/o calurosos.

Para la parcela 1 se recomienda la plantación de especies de árboles frutales perennes como naranjos o limoneros (*Citrus spp*), durazno (*Prunus persica*) o jocote (*Spondias purpurea*), ya que son árboles que se desarrollan en condiciones de sol, en climas templados subhúmedos y a una elevación alta (Toensmeier, 2021). Otras especies afines a la zona son el árbol de oliva (*Olea europea*), aguacate (*Persea americana*) y chilacayote (*Cucurbita ficifolia*). Finalmente se puede sugerir la plantación de la bellota dulce (*Quercus ilex*) contribuyendo con ello a la recuperación de la cobertura vegetal original de la zona.

5) Cantidad de terrazas: se considera que la parcela 1 tiene unas dimensiones de 100 x 100 m. En una línea de 100 m se tienen 100/3 m de diámetro por terraza, sin embargo, entre dos terrazas consecutivas existe un tramo ciego con una longitud de 3 m, por lo tanto $100/3+1$ m nos arroja una cantidad de 25 terrazas por línea.

Como el espaciamiento horizontal es también de 3 m; entonces se tendría nuevamente $100/3 = 25$ líneas de terrazas por hectárea. Por lo tanto, en una hectárea habrá 25 líneas con 25 terrazas cada una, pudiendo así construir aproximadamente 625 terrazas en la parcela 1.

6) Volumen de excavación: considerando que una terraza tiene un área de 0.79 m² y 0.10 m de profundidad, el volumen de excavación sería de 0.079 m³/terrazza. Si una hectárea se cubre con 625 terrazas, entonces 625 terrazas x 0.079 m³/terrazza se tendría un volumen de excavación de 49.4 m³/ha.

A este volumen habría de sumar el material que se debe de retirar para formar el hoyo para la planta. Si el volumen del hoyo es de 0.028 m³, entonces 0.028×625 terrazas = 17.5 m³. Por lo tanto, el volumen total de excavación para la parcela 1 sería de 67 m³ aproximadamente.

7) Recomendaciones y mantenimiento: se sugiere que las especies forestales se establezcan en la terraza durante la época de lluvias (Cardoza

et al., 2006). Como mantenimiento es necesario rectificar anualmente la contrapendiente (PASOLAC, 2005) y el bordo de la terraza.

8) Costos: en la tabla 47 se presentan los costos aproximados para la construcción de las terrazas individuales por hectárea de acuerdo con las dimensiones propuestas (625 terrazas). El costo unitario jornal corresponde al salario base de cotización promedio diario para trabajadores del campo establecido en la Resolución del H. Consejo de Representantes de la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos que fija los salarios mínimos generales y profesionales que habrán de regir a partir del 1 de enero de 2021 (DOF, 2020). El costo de los insumos (árboles y tierra de encino) se proponen tomando como referencia los precios ofrecidos por viveros locales.

Tabla 47. Costos aproximados para la construcción de una hectárea de terrazas individuales en la parcela 1. Elaboración propia (2021).

COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE TERRAZAS INDIVIDUALES POR PARCELA				
Concepto	Unidad de medida	Costo unitario \$ (MXN)	Cantidad requerida	Costo total \$ (MXN)
Trazo de curvas de nivel	Jornal	\$ 215	0.25	\$ 108
Limpia del terreno	Jornal	\$ 215	0.75	\$ 162
Excavación	Jornal	\$ 215	10	\$ 2,150
Conformación del bordo	Jornal	\$ 215	5	\$ 1,075
Árboles frutales	Árbol	\$ 50	625	\$ 31,250
Tierra de encino	Costal	\$ 70	300	\$ 21,000
			Total por hectárea	\$ 55,745

Zanjas a nivel

A partir de la figura 61 se proponen cuatro parcelas para la implementación de zanjas a nivel (figura 71 y tabla 48).

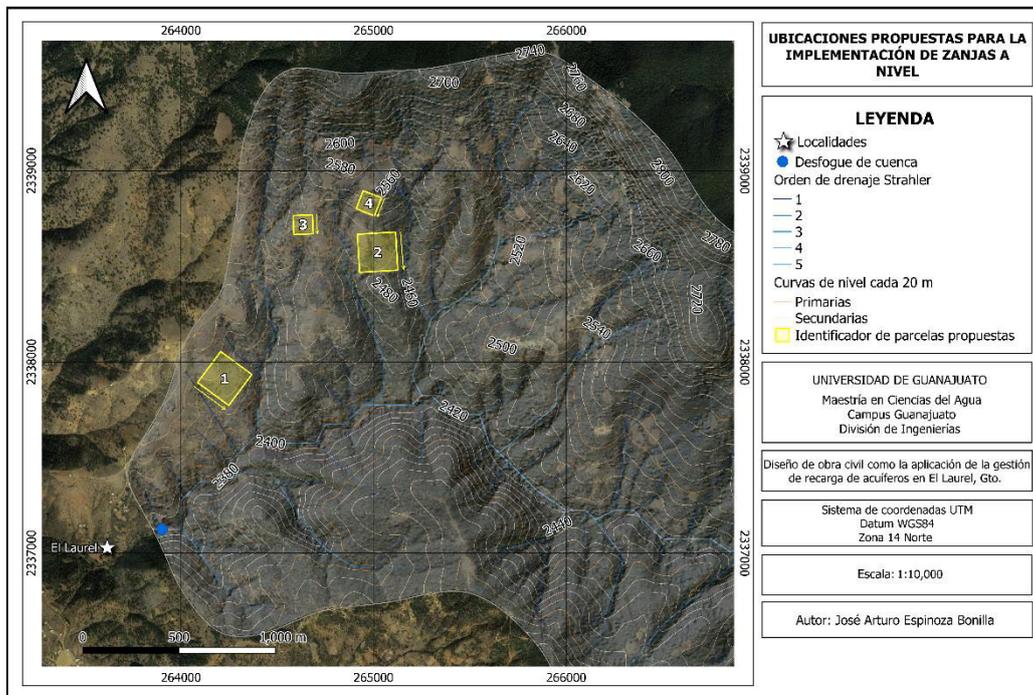


Figura 71. Parcelas propuestas para la implementación de zanjas a nivel en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

Tabla 48. Parcelas propuestas para la implementación de zanjas a nivel en la microcuenca El Laurel. Elaboración propia (2021).

UBICACIONES DE ZANJAS A NIVEL			
Identificador de parcela	Coordenada X (centroide)	Coordenada Y (centroide)	Área (ha)
1	264227	2337914	4
2	265021	2338574	4
3	264634	2338719	1
4	264975	2338830	1

Las zanjas a nivel son un conjunto de zanjas y bordos continuos que se construyen siguiendo curvas a nivel, en donde el volumen de excavación se coloca aguas abajo para formar el bordo, estas zanjas disponen de diques divisores para controlar la velocidad del flujo de agua y evitar la formación de cárcavas (Cardoza et al., 2006). Como proceso de construcción se deberán de considerar los siguientes puntos:

- Trazado de curvas de nivel.
- Dimensionamiento de las zanjas.
- Estimación de la lámina de escurrimiento superficial.
- Cálculo del espaciamiento entre zanjas.
- Excavación de las zanjas y conformación de bordos y diques.

Ejemplo de aplicación

Parcela 1 (Coordenadas centroide: UTM 14N 264227, 2337914)

El terreno por trabajar tiene una dimensión de 200 x 200 m, la cota de la parte más alta es de 2,472 y la de la parte baja de 2,442 msnm, la pendiente promedio es de 15%. El suelo presente es feozem lúvico, el cual tiene una textura arcillosa fácil de trabajar. Como vegetación predomina el pastizal natural (pastizal y huizachal) y algunos encinos dispersos. La precipitación media anual de la zona es de 825 mm. Para la lluvia máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 5 años se considerarán 75 mm, ya que corresponde aproximadamente al 70% del territorio nacional (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009).

1) Trazado de curva de nivel: Se trazará la curva de nivel o hilera sobre la que se iniciaran los trabajos, ya que esta servirá de referencia para el resto de las líneas. Se sugiere comenzar trazando la curva 2,472 y continuar con el resto de manera descendente.

2) Dimensionamiento de las zanjas: aunque las zanjas son obras continuas que generalmente tienen el largo de la parcela, para estimar el escurrimiento se considerará el tamaño promedio propuesto por Cardoza et al. (2006) de 0.4 m de profundidad x 0.4 m de ancho y 1 m de largo, lo

que representa un volumen de escurrimiento a captar de 0.16m^3 por cada metro de zanja construida.

3) Estimación de la lámina de escurrimiento en la ladera: esta dependerá de la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 5 años, la cobertura vegetal, la rugosidad del terreno, textura, contenido de materia orgánica, pendiente y manejo que se le dé al terreno.

Para propósitos de estimación a nivel de proyecto, esta lámina de escurrimiento se aproximará utilizando el método del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América USDA-SCS, mismo que se retoma de CONAFOR (2007) y se incluye en el Anexo C.

En el caso de la parcela 1, se tiene un suelo feozem lúvico con un horizonte arcilloso, por lo que se clasificaría dentro del grupo de suelo C. La cobertura vegetal es de pastos naturales, con una superficie cubierta del más del 75% y con buenas condiciones hidrológicas. Bajo estos parámetros se determina una curva numérica de 74. Sustituyendo este valor en la ecuación C2 se obtiene un potencial máximo de retención de humedad (S) de 89.24 mm. Ahora sustituyendo los valores de precipitación máxima en 24 horas y S en la ecuación C1 se obtiene una lámina de escurrimiento medio de $Q = 22.3$ mm.

4) Espaciamiento horizontal entre zanjas: para el diseño se utiliza una capacidad de almacenamiento de 50% (Cardoza et al., 2006), por lo que se estima captar 22.3 milímetros $\times 0.50 = 11.15$ milímetros. Si las zanjas son de 0.16 m³, el área de captación será: $0.16 / 0.01115$ metros = 14.35 m². De esa manera, cuando la zanja es continua, se debe considerar una separación de 14.35 metros entre zanjas, aunque por practicidad se puede considerar un espaciamiento horizontal de 14 metros.

5) Excavación de la zanjas y conformación del bordo: el bordo se formará con el propio material extraído de la zanja y deberá de ser colocado y compactado aguas abajo de la misma. Para lograr resultados más

favorables, es aconsejable acompañar la obra con una plantación, la cual se puede realizar sobre el bordo o la zona entre zanjas (Pizarro, Flores, Sangüesa, Martínez, y García, 2004). Se recomienda también que el fondo de la zanja este a nivel para que el agua no se estanque en una determinada zona (Cardoza et al., 2006). Los mismos autores mencionan que para controlar la velocidad de escurrimiento y evitar que en la zanja bordo se forme una cárcava, se recomienda dejar un dique de 30 o 40 centímetros de ancho, cada 4 o 5 metros (figura 72). La altura de estos diques puede alcanzar la superficie del terreno o dejarse a 10 cm de la superficie, para permitir el paso del agua de un tramo de la zanja a otro.



Figura 72. Zanja bordo con diques cada 4 metros y a la altura del suelo. Recuperado de Cardoza et al. (2006).

Para las zanjas en la parcela 1 se proponen diques de 40 cm de ancho y 30 cm de profundidad ubicados cada 5 m, permitiendo con esa altura el paso de agua entre tramos.

6) Cantidad de zanjas: se considera que una hectárea tiene unas dimensiones de 100 x 100 m. Se tienen por lo tanto 100/14 m de espaciamiento horizontal entre zanjas, lo que arroja una cantidad de $7.14 \approx 7$ zanjas por hectárea (figura 73). Por lo tanto, si se construyen siete zanjas de 100 metros cada una, distribuidas cada 14 metros, se tendría un promedio de 700 metros de obra por hectárea.

Ya que la parcela 1 tiene unas dimensiones de 200 x 200, se estima que se podrían construir en ella aproximadamente 14 zanjas, con un total de 2,800 metros de obra.

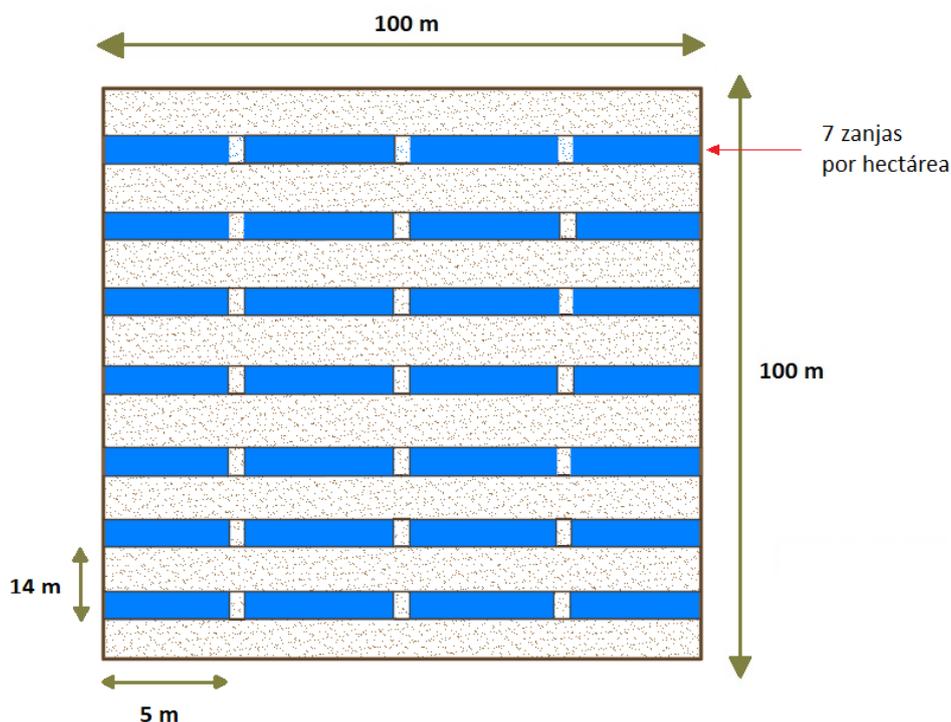


Figura 73. Distribución de las zanjas bordo en una hectárea de la parcela 1 considerando las dimensiones propuestas. Elaboración propia (2021). Nota: la figura no está a escala.

7) Volumen de excavación: considerando que cada zanja tiene unas dimensiones de 100 m de largo x 0.4 m de ancho y 0.40 m de profundidad, el volumen de excavación sería de $16 \text{ m}^3/\text{zanja}$. Sin embargo, habrá que restar el volumen de tierra que conformará los diques, el cual no será removido. Dadas las dimensiones propuestas, cada zanja podrá albergar 19 diques de $0.4 \times 0.4 \times 0.3 \text{ m}$, lo que vendría a ser $19 \text{ diques} \times 0.048 \text{ m}^3 = 0.912 \text{ m}^3$ de diques por zanja, restando $16 \text{ m}^3 - 0.912 \text{ m}^3 \approx 15 \text{ m}^3$ de tierra removidos por zanja. Si en una hectárea se pueden implementar siete zanjas, el volumen de excavación sería de $15 \text{ m}^3 \times 7 = 105 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Por lo tanto, el volumen total de excavación para la parcela 1 sería de 420 m^3 aproximadamente.

8) Recomendaciones y mantenimiento: como es el caso de todas las obras de la familia de las trincheras/zanjas, se deben evitar los excesos de azolve en las zanjas bordo para promover su mejor funcionamiento (Cardoza, y otros, 2006), por lo que, en terrenos con erosión fuerte, se

deberá de combinar esta obra con otras de retención de sedimentos (p. ej. tinajas ciegas o barreras vivas) con el fin de aumentar la vida útil de la obra. Otro parámetro importante será la distancia entre los diques de las zanjas bordo, la cual deberá de ser más corta en la medida que la pendiente sea más pronunciada (CONAFOR, 2007) y (Cardoza et al., 2006). Finalmente, la zanja debe de ser mantenida periódicamente, es decir limpiada y reparada (Pizarro et al., 2004). Se sugiere realizar dicho mantenimiento después de un evento de tormenta fuerte.

Costos: en la tabla 49 se presentan los costos aproximados para la construcción de siete zanjas a nivel por hectárea de acuerdo con las dimensiones propuestas. El costo unitario jornal corresponde al salario base de cotización promedio diario para trabajadores del campo establecido en la Resolución del H. Consejo de Representantes de la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos que fija los salarios mínimos generales y profesionales que habrán de regir a partir del 1 de enero de 2021 (DOF, 2020).

Tabla 49. Costos aproximados para la construcción de una hectárea de zanjas a nivel en la parcela 1. Elaboración propia (2021).

COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE ZANJAS A NIVEL POR PARCELA				
Concepto	Unidad de medida	Costo unitario \$ (MXN)	Cantidad requerida	Costo total \$ (MXN)
Trazo de curvas de nivel	Jornal	\$ 215	0.25	\$ 54
Limpia del terreno	Jornal	\$ 215	0.75	\$ 162
Excavación de zanjas a nivel	Jornal	\$ 215	20	\$ 4,300
Compactación del material excavado	Jornal	\$ 215	6	\$ 1,290
			Total por hectárea	\$ 5,806.00

Considerando que la parcela 1 tiene un área de cuatro hectáreas, la inversión total para la construcción de las zanjas bordo sería de \$23,224.00 MXN aproximadamente.

Obras para la zona central y oriental de la microcuenca

Se ha mencionado que uno de los factores principales que condiciona la pérdida del suelo en la microcuenca es la pendiente del terreno, dicho problema ha propiciado que en la zona central y oriental de la microcuenca también exista una considerable erosión hídrica que ha comenzado a dejar al descubierto muchas de las raíces de los árboles. Ya que en esta zona la cobertura vegetal es principalmente de bosque de encino y no existen grandes extensiones de terreno por remediar (como si es el caso de la zona oeste) se vuelve inviable la evaluación de las obras para implementarse en unidades de impacto mayor (ha o km²). Por el contrario, se propone la implementación de tinas ciegas y terrazas individuales en sitios degradados puntuales, sitios en donde existe una evidente pérdida de suelo o en los que se observan distancias considerables sin cobertura vegetal.

Como las tinas y terrazas podrían ser construidas incluso de manera aislada e individual, se propone unas dimensiones promedio para las tinas ciegas de 0.4 m de ancho x 0.4 m de profundidad x 2 m de longitud. En caso de que el terreno se preste para construir un mayor número, se sugiere mantener una distribución en “tres bolillo”, manteniendo un distanciamiento horizontal y vertical entre tinas de 10 y 2 m, respectivamente. Las tinas ciegas podrían ser complementadas con otras medidas de conservación y reforestación, ya sea con la implementación de barreras vivas perennes (como cactáceas), o con la plantación de encinos, contribuyendo así la recuperación de la cobertura vegetal original.

De la misma manera se sugiere para las terrazas individuales unas dimensiones de 1 m de diámetro x 10 cm de profundidad y un espaciamiento vertical y horizontal de 3 m entre terrazas. Como especies vegetales para plantar se sugieren los frutales perennes o árboles de encino.

Apegándose a dichas dimensiones, el costo de cada tina sería de \$21.00 MXN aproximadamente. En la figura 74 y la tabla 50 se proponen distintos sitios puntuales para la implementación de estas tinas ciegas.

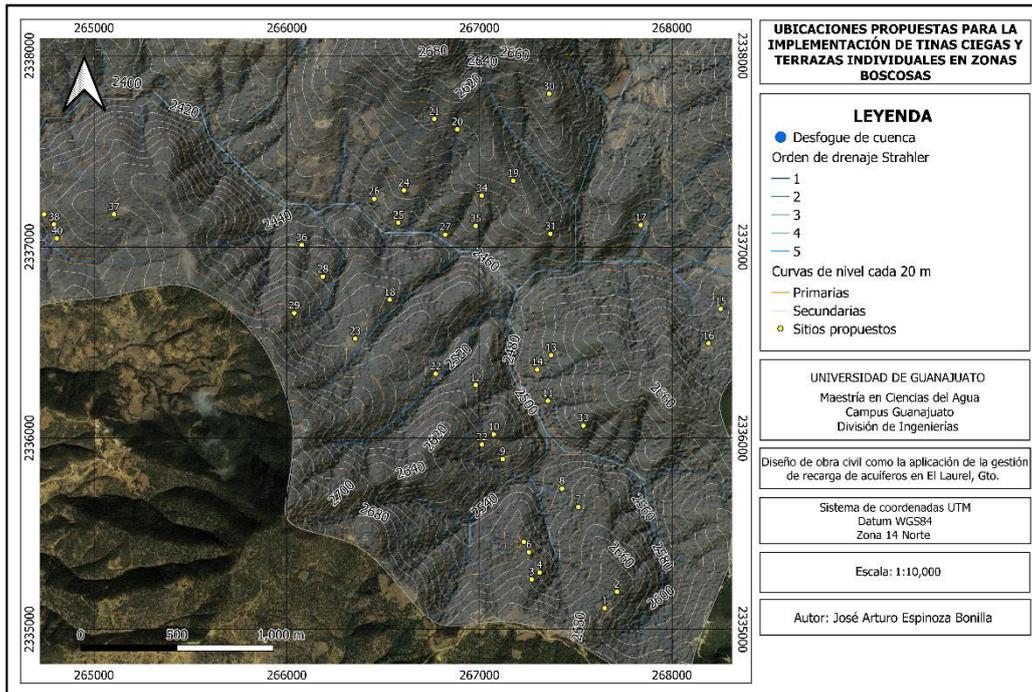


Figura 74. Ubicaciones propuestas para la implementación de tinas ciegas y terrazas individuales en las zonas boscosas del centro y este de la microcuenca. Elaboración propia (2021).

Tabla 50. Ubicaciones propuestas para la implementación de tinas ciegas y terrazas individuales en las zonas boscosas del centro y este de la microcuenca. Elaboración propia (2021).

UBICACIONES DE TINAS CIEGAS Y TERRAZAS INDIVIDUALES EN EL CENTRO Y ESTE DE LA MICROCUENCA		
Ubicación	Coordenada X	Coordenada Y
1	267651	2335112
2	267714	2335196
3	267271	2335262
4	267313	2335297
5	267231	2335457
6	267257	2335404
7	267514	2335640
8	267429	2335736
9	267120	2335891
10	267075	2336021
11	267356	2336195
12	266981	2336278

13	267372	2336435
14	267300	2336359
15	268253	2336676
16	268190	2336496
17	267838	2337115
18	266535	2336725
19	267176	2337347
20	266886	2337615
21	266766	2337669
22	266773	2336336
23	266356	2336521
24	266609	2337296
25	266580	2337127
26	266454	2337251
27	266823	2337065
28	266188	2336845
29	266039	2336655
30	267362	2337801
31	267369	2337069
32	267013	2335967
33	267540	2336066
34	267013	2337268
35	266981	2337111
36	266078	2337011
37	265104	2337171
38	264793	2337118
39	264740	2337171
40	264807	2337045

Recomendaciones adicionales para la protección de los recursos hídricos en el área de estudio y la potenciación del proyecto

Resulta fundamental que los resultados obtenidos de la aplicación de la presente metodología, así como la metodología misma, sean difundidos a los habitantes de las comunidades El Laurel, Calera de los Ruiz, San Bartolo y Joya de Lobos, así como con facilitadores, organismos e instituciones locales. Esta medida busca establecer una metodología de planeación y acción participativa (social e institucional) orientada a la conservación, manejo y conservación de los recursos naturales dentro de la microcuenca y la implementación de tecnologías innovadoras para su recuperación.

Se sugiere realizar campañas de enseñanza, aprendizaje y sensibilización en las cuatro comunidades sobre el funcionamiento sistemático de las microcuencas y sus recursos naturales. Se debe trabajar en el reconocimiento de las zonas de recarga hídrica natural, mostrando la vulnerabilidad de estas zonas ante la contaminación inducida por el hombre, así como las amenazas que esto representa para la calidad del agua subterránea y para la propia salud de los habitantes de las comunidades. Es necesario enfatizar en la pérdida de suelos por erosión hídrica, y como esta es potenciada por la deforestación de la cobertura vegetal original, disminuyendo progresivamente la capacidad de recarga hídrica natural de la microcuenca y aumentando la amenaza de inundaciones por avenidas violentas. Esto deberá contribuir a despertar el interés de los actores locales por implementar obras de conservación de agua y suelos en sus comunidades.

Para ello también se deberá de transmitir a la comunidad el concepto de gestión de recarga de acuíferos, así como las ventajas y desventajas de la implementación de estas alternativas de gestión hídrica. Se buscará que el actor local sea capaz de identificar las variables biofísicas que intervienen en el proceso de recarga hídrica de los acuíferos, permitiendo que

reconozca así las técnicas MAR óptimas para distintas condiciones y problemáticas.

Realizar reuniones entre instancias locales permitirá identificar también otras problemáticas territoriales y ambientales, exponiendo sus necesidades y acordando así objetivos y propuestas de desarrollo y recuperación participativa para la microcuenca. Finalmente se deberá buscar el compromiso con dependencias gubernamentales, logrando el recurso para llevar a cabo las acciones de recuperación de agua y suelo propuestas, calendarizando las acciones y asegurando el mantenimiento y seguimiento de estas.

CONCLUSIÓN

A partir del análisis espacial multicriterio desarrollado en la microcuenca “El Laurel” considerando los parámetros biofísicos de pendiente del terreno, tipo de roca, tipo de suelo, uso de suelo, cobertura vegetal, número de infiltración, y densidad de fracturas y lineamientos, se identificaron 1.21 km² de zonas con alto potencial de recarga hídrica natural al acuífero, sobre todo en la fracción centro y este de la microcuenca, haciendo viable la implementación exitosa de obras de recarga en estas zonas tomando en cuenta sus condiciones biofísicas actuales. Así mismo, se identifica a la cobertura vegetal y la pendiente del terreno como dos de los factores que condicionan fuertemente la recarga hídrica natural, al observarse que las zonas escarpadas y deforestadas son las más vulnerables a la erosión hídrica, disminuyendo notablemente con ello su capacidad de recarga.

Respecto al balance hídrico de suelos estimado para la microcuenca, se observa que la recarga al acuífero se presenta durante los meses de julio, agosto y septiembre, con una suma total de lámina de agua de 9.3 mm anuales, representando un volumen de 145,070 m³. Se identifica también, mediante el análisis de sensibilidad de los distintos parámetros que intervienen en la recarga al acuífero, que el Coeficiente de retención pluvial en follajes (Cfo) es un factor determinante para la recarga potencial al acuífero, pudiendo aumentar el volumen de recarga hasta los 346,434 m³ anuales si se incrementara la cobertura vegetal de la microcuenca hasta lograr una cobertura boscosa completa.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el Análisis de Fluorescencia de Rayos X a las muestras de agua; se determinó que la calidad química del agua de recarga de las obras que se implementen sería en general buena, detectando únicamente la presencia de S, Mg, Ca, Zr, Ru, Rh, Al, Si, K y Ti (presentando los últimos dos una concentración apenas superior al límite de detección por parte del análisis de FRX), y los óxidos de MgO, K₂O, CaO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, TiO₂, MnO y Fe₂O₃. La presencia de estos elementos y óxidos se atribuyen en su mayoría, a la

propia composición de la roca predominante en la microcuenca y sobre la cual fluye el río principal, la cual corresponde a pizarras compuestas de cuarzo, moscovita, feldespato y chamosita, pertenecientes a la formación "Esperanza". En el caso de la presencia de Ru y Rh se sugiere que, al ser ambos metales asociados al platino, su fuente contaminante sea la utilización de fertilizantes en la parte alta de la microcuenca, la actividad minera desarrollada en cuencas adyacentes o inclusive la posible sobreestimación del análisis FRX a estos elementos, ante lo que se recomienda considerar las concentraciones obtenidas únicamente como valores indicativos, pudiendo ser validados por pruebas ICP o de Absorción Atómica. Finalmente se observa que la calidad química del agua descargada en el manantial localizado al norte de la comunidad es superior a la calidad del agua que escurre superficialmente en la microcuenca, demostrando la propia utilidad del suelo y el proceso de infiltración y percolación para el tratamiento natural del agua de recarga. Por lo tanto, se recomienda la implementación de un sistema de pretratamiento para la instrumentación de obras de recarga profunda, como sería el caso de los pozos de inyección.

Para la determinación de las obras de recarga más viables para implementar en la microcuenca se analizó de manera conjunta el mapa de zonas potenciales de recarga hídrica natural, las políticas ambientales implementadas dentro del área delimitada por la microcuenca, las necesidades medioambientales de la misma y, por último, la descripción de nueve técnicas MAR considerando las características del terreno sugeridas para su implementación, así como las ventajas y desventajas de su ejecución. Ante los resultados de dicha evaluación se propone la implementación de siete estanques de tierra; cinco parcelas con un área total de catorce hectáreas de tinas ciegas; seis parcelas con un área total de seis hectáreas de terrazas individuales y cuatro parcelas con un área total de diez hectáreas de zanjas a nivel, todas ellas en la zona centro y oeste de la microcuenca, siendo un área que se encuentra particularmente degradada por la erosión hídrica. Así mismo se identifican cuarenta sitios

especialmente degradados con pérdida de suelo y vegetación en la zona oriental de la microcuenca en los que se propone la implementación focalizada de tinajas ciegas y terrazas individuales en grupos más reducidos.

En total, se plantea la recuperación de más de treinta hectáreas de la microcuenca “El Laurel” mediante la incorporación de las obras propuestas, no limitado así los esfuerzos a la exclusiva recarga del acuífero en aquellos sitios que presentan una alta capacidad de recarga hídrica natural dadas las condiciones medioambientales actuales de la microcuenca, sino que conjuntamente, con la implementación de las obras propuestas, se busca mejorar las condiciones biofísicas de las zonas degradadas y con bajo potencial de recarga, consiguiendo con ello, la disminución de la velocidad de escorrentía; la disminución de la pérdida de suelos por erosión hídrica; el aumento en la humedad del suelo; la recuperación de la cobertura boscosa de la microcuenca y finalmente un incremento general en la capacidad de recarga al acuífero, evaluando el éxito de su implementación mediante la progresiva recuperación de la cobertura vegetal original, el aumento de la recarga potencial al acuífero según el balance hídrico de la microcuenca y el incremento en el caudal del manantial de la comunidad.

Como parte de las medidas complementarias para potenciar los beneficios del proyecto se sugiere la difusión de los resultados del presente trabajo entre los habitantes de las comunidades El Laurel, Calera de los Ruiz, San Bartolo y Joya de Lobos, así como con facilitadores, organismos e instituciones locales, estableciendo así una metodología de planeación y acción participativa orientada a la conservación y recuperación de los recursos naturales dentro de la microcuenca. Se sugiere realizar campañas de enseñanza, aprendizaje y sensibilización en las cuatro comunidades sobre el funcionamiento sistemático de las microcuencas, sus recursos naturales, las zonas de recarga hídrica natural, la pérdida de suelos por erosión hídrica (y su potenciación por la deforestación de la cobertura vegetal original) y por último, sobre la gestión de recarga de acuíferos, mostrando las oportunidades y obstáculos que estos planes de gestión hídrica representan para las comunidades que los implementan.

Finalmente, el presente trabajo de investigación evidencia la viabilidad y practicidad que las técnicas de gestión de recarga de acuíferos representan como alternativa económica para la captación de agua pluvial, la remediación de los mantos acuíferos sobreexplotados en el estado de Guanajuato, y la mejora en las propias condiciones biofísicas de los sitios en los que se implementan, cobrando con ello gran relevancia en países en vías de desarrollo, donde la ejecución de grandes y costosas obras hidráulicas es poco viable. Así mismo resulta fundamental buscar el apoyo y compromiso con dependencias gubernamentales en la implementación de cualquier proyecto MAR, logrando el recurso para llevar a cabo las acciones de recuperación de agua y suelo que se propongan, calendarizando las acciones y asegurando el mantenimiento y seguimiento de estas.

REFERENCIAS

- [Judith ArroNews]. (21 de Julio de 2020). *Construcción de 2 presas subterráneas*. Obtenido de Facebook: https://m.facebook.com/story.php?story_fbid=155022072828402&id=107935497537060
- A Layman's Guide to Clean Water. (21 de Febrero de 2021). *Kenya Sand Dams Provide Water Access Points In a Semi-Arid Environment*. Obtenido de <http://www.clean-water-for-laymen.com/kenya-sand.html>
- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. (Diciembre de 2010). *What Is A Watershed?* Obtenido de <https://chesco.org/DocumentCenter/View/7331/whatisawatershed11x172-pages?bidId=>
- Agencia Estatal de Meteorología, Gobierno de España. (6 de Julio de 2020). *MeteoGlosario Visual*. Obtenido de Evapotranspiración: https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/446_evapotranspiracion
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración de cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: FAO.
- Almorox, J. (2008). *Comparación de algunos métodos de estimación de la evapotranspiración en Uruguay*. Uruguay: Ingeniería Química Uruguay.
- Amilcar, E. (30 de Agosto de 2015). *Conservación de suelo*. Obtenido de Terrazas individuales [clse:3: http://recuperacionsuelo.blogspot.com/2015/08/terrazas-individuales-clse3.html](http://recuperacionsuelo.blogspot.com/2015/08/terrazas-individuales-clse3.html)
- Argialas, D., Lyon, J., y Mintzer, O. (1988). Quantitative Description and Classification of Drainage Patterns. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING, Vol. 54, No.4, 505-509*.
- Arreguín, F. (2005). *Water Management in Mexico*. United States of America: IWA Yearbook.

- Barredo, J. (1996). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, España: Ra-Ma.
- Bosque, J., y Mass, S. (1995). Modelos de localización-asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables. *Serie Geográfica*. n°5, 97-112.
- Boston Groundwater Trust. (19 de febrero de 2021). *Types of recharge*. Obtenido de Dry Wells: <http://www.bostongroundwater.org/dry-wells.html>
- Bravo, L., Sáenz, D., Alatorre, L., Priego, Á., Torres, M., y Granados, A. (2015). *Identificación de áreas potenciales de recarga hídrica al acuífero Cuauhtémoc (Chihuahua), mediante una evaluación espacial multi-criterio*. Ciudad Juárez, México: Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ-2015.
- Butler, S. (1957). *Engineering Hydrology*. Estados Unidos: Prentice Hall Inc.
- Cambroner, L., Ruiz-Román, J., y Ruiz-Prieto, J. (2005). *Obtención de espumas a partir de residuos de pizarra*. *Bol. Soc. Esp. Ceram. V.*, 44 [6] 368 - 372 (2005). Madrid: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.
- Campos, D. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería.
- Carabias, J., y Landa, R. (2005). *Agua, medio Ambiente y sociedad, hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México .
- Cardoza, R., Cuevas, L., García, J., Guerrero, J., González, J., Hernández, H., . . . Vázquez, C. (2006). *Obras para el control de la erosión laminar*. San Juan de Ocotán, México: Comisión Nacional Forestal.
- Castellanos, L. (2017). *Diplomado de Análisis de Información Geospacial. Álgebra de mapas con datos vectoriales*. Ciudad de México: CONACYT, Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial.
- Chamorro, M., y Rosales, O. (2017). *Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos la Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de*

las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra.
Ibarra, Ecuador: Universidad Técnica del Norte .

City of Portland, Oregon. (2016). *City of Portland Stormwater Management Manual*. Portland, USA: City of Portland.

City of Scottsdale. (19 de Febrero de 2021). *Aquifer Storage and Recovery Wells*.
Obtenido de <https://www.scottsdaleaz.gov/construction/project-list/aquifer-storage-and-recovery-wells>

Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. (2020). *Cuenca Lerma Santiago*.
Obtenido de http://agua.guanajuato.gob.mx/cuenca_lerma_santiago.php

Comisión Nacional del Agua . (2018). *Estadísticas del Agua en México, edición 2018*. Ciudad de México : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales .

Comisión Nacional del Agua. (2016). *Estadísticas del Agua en México, edición 2016*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional Forestal. (2007). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras prácticas* . Zapopan, México: CONAFOR / Gerencia de Restauración Forestal .

CONABIO. (1998). *Climas (Clasificación de Köeppen, modificado por García)*.
Obtenido de <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/PDFs/ANEXOCLIMA.pdf>

CONAFOR . (29 de Abril de 2021). *Fotogalería de Obras de conservación de suelos* .
Obtenido de Sistema de zanja bordo:
https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/fsuelos/images/SISTEMA_DE_ZANJA_BORDO.JPG

CONAFOR [@CONAFOR]. (4 de Septiembre de 2020). *La presa de gaviones sirve para conservar el suelo ante los problemas de erosión*. Obtenido de Twitter:
<https://twitter.com/CONAFOR/status/1301987783083470848>

CONAGUA . (20 de abril de 2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Silao-Romita (1110), Estado de Guanajuato*. Diario Oficial de la Federación .

- CONAGUA - WWF. (Junio de 2012). *Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción*. Obtenido de Reservas Potenciales de Agua para el Medio Ambiente en México : <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/Reservas%20Potenciales%20de%20Agua%20para%20el%20Medio%20Ambiente%20en%20M%C3%A9xico/Reservas%20Potenciales%20de%20Agua%20para%20el%20Medio%20Ambiente%20DRAFT.pdf>
- Córdova, J., Gabaldón , A., Rosales , A., Buroz , E., Uzcátegui, G., y Iskandar, L. (2015). *Agua en Venezuela: Una Riqueza Escasa vol. 1*. Venezuela: Fundacion Empresas Polar.
- Cotler, H., Cram, S., Almeida, L., Hoth, J., y Fernández, A. (2017). *Recomendaciones técnicas para la rehabilitación de suelos con zanjas (tinajas ciegas)*. Ciudad de México, México: Centrogeo, UNAM, Conservation International y CONANP.
- Cruickshank , C. (1992). *Relación entre las aguas superficiales y las subterráneas en una cuenca*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Custodio, E., y Llamas, M. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona, España: Omega.
- Del Rio, P., Nieto-Samaniego, Á., Alaniz, S., Ángeles, E., Escalona, F., y del Pilar, A. (2020). Geología y estructura de las sierras de Guanajuato y Codornices, Mesa Central, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana / 72 (1)*, 1-20 Artículo A071019.
- Diario Oficial de la Federación. (2020). *RESOLUCIÓN del H. Consejo de Representantes de la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos que fija los salarios mínimos generales y profesionales que habrán de regir a partir del 1 de enero de 2021*.
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Acuerdo por el que se establece y da a conocer al público en general la denominación única de los acuíferos reconocidos en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos, por la Comisión Nacional del Agua*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- Duque, G. (2017). *Manual de geología para ingenieros*. Manizales, Colombia : Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- Echegoyén, S. (1978). *Yacimientos minerales de la Sierra de Arperos y Comanja. Estado de Guanajuato, México*. s/c: Consejo de Recursos Naturales, 21 p.
- Environmental Services City of Portland. (2006). *Drywells*. Portland, USA: Environmental Services City of Portland .
- Escolero, O., Gutiérrez, C., y Mendoza, E. (2017). *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Espinoza, J. (2019). *Propuesta de obras civiles para la recarga hídrica natural por lluvia en la Comunidad de El Laurel, Guanajuato, México*. Guanajuato, México: Universidad de Guanajuato.
- FAO. (2001). *Manual de Riego Parcelario*. Santiago de Chile, Chile: Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe.
- FAO. (2002). *Reporte de la Iniciativa de la Ganadería, el Medio Ambiente y el Desarrollo (LEAD) - Integración por Zonas de la Ganadería y de la Agricultura Especializadas (AWI) - Opciones para el Manejo de Efluentes de Granjas Porcícolas de la Zona Centro de México*. Obtenido de Capítulo 2. Entorno físico, social, productivo y ambiental de la región de estudio: <http://www.fao.org/3/x6372s03.htm>
- FAO. (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO. (15 de Noviembre de 2017). *Estanque de infiltración*. Obtenido de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6708s/Index.htm
- FAO. (14 de Julio de 2020). *FAO Training*. Obtenido de 6. Textura del suelo: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

- Fernández, D., Martínez, M., y Ramírez, M. (2009). *Catálogo de obras y prácticas de conservación de agua y suelo* . Montecillos, México: Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo / SAGARPA.
- Fernández, D., Martínez, M., Ramírez, H., y Martínez, B. (2017). *Diseño y Construcción de Jagüeyes* . Ciudad de México: Subsecretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Dirección General de Producción Rural Sustentable en Zonas Prioritarias / Colegio de Postgraduados.
- Food and Agriculture Organization. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Free Association Design. (26 de Marzo de 2012). *Sand Dams*. Obtenido de <https://freeassociationdesign.wordpress.com/2012/03/26/sand-dams/>
- Gale, I. (2005). *Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas semiáridas*. Paris, Francia: UNESCO IHP, Paris, France.
- García , M., y Fernández , Á. (2008). *Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo. 2da Edición*. España: Instituto para el Fomento de la Investigación Económica .
- Goldmann, G. (2018). *Determinación de la distribución de la porosidad en rocas mediante resistividad eléctrica* .Buenos Aires, Argentina: Comisión Nacional de Energía Atómica, Universidad Nacional de Cuyo (Intituto Balseiro) y Universidad de Buenos Aires (Facultad de Ingeniería).
- Gómez, V., y Soriano, R. (2013). Asignación de Grupo de Suelo a partir de clasificaciones edáficas de base morfométrica. *Sexto Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 1-11.
- Grassi, C. (1976). *Resumen de propiedades físicas del suelo, métodos de riego*. Mérida, Venezuela: CIDIAT.
- Guerrero , M. (2006). *El agua*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Gur, E., y Spuhler, D. (21 de Febrero de 2021). *SSWM Toolbox. Technologies and solutions to overcome shortages and pressure on resources*. Obtenido de Sand Dams and Subsurface Dams: <https://sswm.info/sswm-solutions-bop->

markets/improving-water-and-sanitation-services-provided-public-institutions-0/sand-dams-and-subsurface-dams

- Gutiérrez, C., e IMTA. (Mayo de 2016). *Recarga Artificial de Acuíferos (Managed Aquifer Recharge)*. Obtenido de https://www.cazalac.org/publico/fileadmin/templates/documentos/Chile-Mexico/Curso_31052016/Recarga_artificial_de_acuiferos.pdf
- Hargreaves, G., y Samani, Z. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2), 96-99.
- Heath, R. (1983). *Basic Ground-Water Hydrology*. Denver, USA: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 86 p.
- Horton, R. E. (1945). Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370.
- Howard, A. (1967). Drainage Analysis in Geologic Interpretation: A Summation. *American Association of Petroleum Geologists*, 51, 2246-2259.
- Hsin-Fu, Y., Cheng-Haw, L., Kuo-Chin, H., y Po-Hsun, C. (2009). Gis for the assesment of the groundwater recharge potential zone. *Environmental Geology*, 58 , 185-195.
- Ibáñez, A., Moreno, H., y Gisbert, B. (2011). *Morfología de las cuencas hidrográficas* . Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Ibañez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2011). *Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Iglesias, A. (2002). *Hidrogeología*. Madrid, España: Prentice may.
- INEGI. (1998). *Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2018). *Mapa Digital de México*. Obtenido de Condición de acuíferos 2018: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjE5Ljk2MzIzLGxvbjotMTAwLjc4NjM4LHo6MixsOnRjMTExc2VydmIjaW9zfGNhY3VpZmVyb3Njb25kaTlwMTg=>

- INEGI. (06 de Noviembre de 2020). *Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica*. Obtenido de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/clima/CLIMATIII.pdf
- Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato. (Consultado 1 de Marzo de 2021). *Programa Estatal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico Territorial PEDUOET 2040*. Obtenido de Anexo G. Fichas UGAT Parte 1 (1-409): https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/upload/geoportal/Anexo_G_Fichas_UGAT_1_409.pdf
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (1 de Agosto de 2019). *¿Qué es una cuenca?* Obtenido de <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/que-es-una-cuenca-211369?idiom=es>
- Irrigation Outlet. (18 de Enero de 2016). *What Are the Advantages of a Dry Well Drainage System?* Obtenido de <http://www.irrigationoutlet.com/irrigation-outlet-blog/what-are-the-advantages-of-a-dry-well-drainage-system>
- Izzard, C. (1946). *Hydraulics of runoff from developed surfaces from developed surfaces. Proceedings of the 26th Annual meeting of the Highway Research Board*. Washington D.C., United States: National Research Council.
- Johnstone, D., y Cross, W. (1949). *Elements of Applied Hidrology*. New York, United States: Ronald Press .
- Linsley, R., Kohler, M., y Paulus , L. (1958). *Hidrology for engineers*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw Hill.
- López, R., y Oropeza, J. (2009). *Presas de gaviones*. Montecillos, México: Especialidad de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados / SAGARPA.
- Lundh, A. (29 de Agosto de 2020). *the New Zealand Water and Wastes Association*. Obtenido de Managed Aquifer Recharge – A Potential Water Treatment Method in New Zealand?: https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=1279

- Maddrell, S. (2018). *Sand Dams: A Practical & Technical Manual*. Excelent Development.
- Maddrell, S., y Neal, I. (2012). *Sand dams: a Practical Guide*. Londres, Inglaterra: Excellent Development, London.
- Maddrell, S., y Neal, I. (2013). *Building sand dams: a practical guide*. Londres, Inglaterra: Excellent Development, London.
- Martin, R., y Dillion, P. (2002). *Aquifer Storage and Recovery. Future Directions for South Australia*. Adelaide, Australia: Department of Water, Land and Biodiversity Conservation.
- Martínez-Reyes, J. (1987). Resumen de la Geología de la Sierra de Guanajuato. *Instituto de Geología, Simposio sobre la Geología de la Región de la Sierra de Guanajuato*, 50-91.
- Massachusetts Department of Environmental Protection. (2003). *Massachusetts Erosion and Sediment Control Guidelines por Urban and Suburban Areas*. Northhampton, USA: Massachusetts Executive Office of Environmental Affairs. Massachusetts Department of Environmental Protection, Bureau of Resource Protection.
- 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, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Matus, O., Faustino, J., y Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Mengelle, J., Canet, C., Prol, R., González, E., y 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*, 511-525.

- MetEd. (18 de Enero de 2011). *Curso Básico de Hidrología, edición internacional*. Obtenido de Procesos de escorrentía: edición internacional: https://www.meted.ucar.edu/hydro/basic_int/runoff_es/navmenu.php?tab=1&page=3.3.0
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2014). *Programa Presupuestal 0089 Reducción de la Degradación de los Suelos Agrarios, Cartillas para la conservación del suelo, Zanjas de infiltración*. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura Y Riego, Dirección General de Competitividad Agraria.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua y Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego. (2016). *Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales - Análisis de variabilidad climática de oferta y demanda hídrica. Versión resumida*. La Paz, Bolivia: Estado Plurinacional de Bolivia.
- Moreno, A. (2001). *Geomarketing con sistemas de información geográfica*. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Geografía. Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledección, Asociación de Geógrafos Españoles.
- Murphy's Cesspool & Septic. (29 de Abril de 2021). *Murphy's Drywell Lesson*. Obtenido de <https://www.nyseptic.com/How-Do-Drywells-Work-Murphys.html>
- Naciones Unidas. (2019). *Población*. Obtenido de Una población en crecimiento: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>
- National Research Council. (1994). *Grond Water Recharge Using Waters of Impaired Quality*. Washington, D.C., Estados Unidos: National Research Council.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS). (2007). *Individual Terrace. Conservation Practice Job Sheet 751*. NRCS.
- Nieto-Samaniego, Á., García-Dobarganes Bueno, J., y Aguirre, A. (1992). Interpretación estructural de los rasgos geomorfológicos principales de la Sierra de Guanajuato. *Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 1-5.

- Nieto-Samaniego, Á., García-Dobarganes, J., y Aguirre, A. (1992). Interpretación estructural de los rasgos geomorfológicos principales de la Sierra de Guanajuato. *Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 1-5.
- Noriega, J. (2005). *Determinación de las áreas principales de recarga hídrica natural en la microcuenca del Río Sibacá, Chinique, Quiché*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Agronomía.
- Núñez, M. (10 de Julio de 2020). *Escuela de Ingeniería y Medio Ambiente*. Obtenido de Cómo elegir el tiempo de concentración adecuado: <http://eimaformacion.com/como-elegir-el-tiempo-de-concentracion-adecuado/>
- ONU. (1972). *Manual de instrucciones, estudios hidrológicos*. San José, Costa Rica: ONU Publ. N°70.
- Ordoñez, J. (2011). *Cartilla Técnica: El ciclo hidrológico*. Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Ordoñez, J. (2011). *Cartilla Técnica: Balance hídrico superficial*. Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Oregon Department of Fish & Wildlife. (1999). *The Stream scene: watersheds wildlife and people, 2nd Edition*. Portland, Oregon, Estados Unidos: Watershed Education Project.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (13 de Julio de 2020). *Portal de Suelos de la FAO*. Obtenido de Propiedades Físicas del Suelo: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Organización Meteorológica Mundial . (1997). *¿Hay suficiente agua en el mundo?* Ginebra, Suiza: UNESCO.
- Orozco, F. (2014). *Mineralogía y génesis del "Clavo de Rayas" de la zona central de la Veta Madre de Guanajuato*. Jiriquilla, Querétaro: Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Overseas Environmental Cooperation Center. (2004). *Model Project to Combat Desertification In NARE Village, BURKINA FASO. Technical Report of the Subsurface Dam* . Tokio, Japón: Ministry of the Environment. Overseas Environmental Cooperation Center.
- Parvis , M. (1950). Drainage Pattern Significance in Airphoto Identification of Soils and Bedrocks. *Photogrammetric Engineering*, 16, 387-409.
- Peñuela, L., y Carrillo, J. (2013). Definición de zonas de descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, Núm. 81*, 18-32.
- Pérez, W. (2016). *Clasificación de acuíferos mediante la determinación de parámetros hidráulicos en el abanico aluvial de Ibagué Tolima*. Sogamoso, Colombia : Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de Ingeniería Geológica.
- Pizarro, R., Flores, J., Sangüesa, C., Martínez, E., y García, J. (2004). *Diseño de obras para la conservación de aguas y suelos* . Talca, Chile: Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda.
- Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central, PASOLAC. (2005). *Guía Técnica de Conservación de Suelos y Agua*. San Salvador, El Salvador: Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central, PASOLAC.
- Proyecto JALDA. (2003). *Cartillas de capacitación para la ejecución de prácticas de conservación de suelos y aguas / CARTILLA 9. Terrazas individuales*. Sucre, Bolivia: La Sucre: Proyecto JALDA.
- Puy-Alquiza, M., Miranda-Avilés, R., Loza-Aguirre, I., Li, Y., y Zanol. (2017). Facies analysis, stratigraphic architecture and depositional environments of the Guanajuato conglomerate in the Sierra de Guanajuato, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 69, núm. 2*, 385-408.
- Quintero-Legorreta, O. (1992). Geología de la Región de Comanja, Estados de Guanajuato y Jalisco . *Revista del Instituto de Geología*, 10(1), 6-25.

- 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.
- Rubio, E., Martínez, M., y Sánchez, B. (2009). *Tinas Ciegas*. Montecillos, México: Especialidad de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados / SAGARPA.
- Sáenz, A. (2015). *Localización de zonas con potencial de recarga hídrica mediante infiltración natural en el acuífero Bustillos*. Ciudad Cuauhtémoc, México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Sáez, J. (2018). *Slideplayer*. Obtenido de Escorrentia superficial: <https://slideplayer.es/slide/13383580/>
- Samani, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 126, No. 4, 265-267.
- Sánchez, F. (2017). *El Ciclo Hidrológico*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca, Departamento de Geología.
- Sánchez, F. (2007). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca (España), Departamento de Geología.
- Scheidegger, A. E. (1965). The algebra of stream order numbers and a temperature-analog in river nets. *United States Geological Survey Professional Paper*, vol. 525, 187-189.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un Balance Hídrico de Suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34-35: 13-30.
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base a la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23, 43-55.
- Schulz, C., y García, R. (2015). *Balance Hídrico y Recarga de Acuíferos*. s.c: Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Chileno.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). *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.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. Ciudad de México, México: SEMARNAT, Cuadernos de divulgación ambiental.

SEDESOL. (2013). *Catálogo de Localidades*. Obtenido de Sistema de Apoyo para la Planeación del PDZP: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=110150061>

Segura, M., y Ortiz, C. (2017). Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas - mínimas y altitud. *Tecnología y Ciencias del Agua, vol III, núm 3*, 93-110.

SEMARNAT. (27 de Junio de 2018). *¿Qué son las cuencas hidrológicas y las reservas de agua?* Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-son-las-cuencas-hidrologicas-y-las-reservas-de-agua>

SEMARNAT. (21 de Junio de 2018). *Blog*. Obtenido de *¿Conoces el Programa Nacional de Reservas de Agua?*: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/conoces-el-programa-nacional-de-reservas-de-agua>

Shreve, R. L. (1966). Statical low of stream numbers. *Journal of Geology*, 74, 17-37.

SIGMAOT. (Consultado 1 de agosto de 2020). *Capas*. Obtenido de <http://mapas.ecologia.guanajuato.gob.mx/sigmaot/>

SIGMAOT. (Consultado 17 de mayo de 2021). *Capas / Acuíferos*. Obtenido de <http://mapas.ecologia.guanajuato.gob.mx/sigmaot/>

Sokolov, A., y Chapman, T. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de métodos de investigación (versión en español)*. Madrid, España: Instituto de Hidrología de España - UNESCO.

- Stevenson, C. (27 de Julio de 2017). *Healthfully*. Obtenido de Advantages & Disadvantages of Gabions: <https://healthfully.com/advantages-disadvantages-gabions-8496485.html>
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 8(6), 913-920.
- Sukia, J. (2009). *Recarga de acuíferos mediante agua de lluvia*. Barcelona, España : Universidad Politécnica de Cataluña.
- Szalay, J. (24 de Febrero de 2017). *Live Science*. Obtenido de Caspian Sea: Largest Inland Body of Water: <https://www.livescience.com/57999-caspian-sea-facts.html>
- Tarbuck, E., y Lutgens, F. (2013). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física. Décima edición*. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN.
- Témez, J. (1991). Extended and improved Rational Method. *Proc. XXIV Congress. Vol A*, 33-40.
- Texas Living Waters Project. (19 de Febrero de 2021). *The pros and cons of Aquifer Storage and Recovery (ASR)*. Obtenido de <https://texaslivingwaters.org/state-and-regional-water-plan/the-pros-and-cons-of-aquifer-storage-and-recovery-asr/>
- The Water Network. (12 de mayo de 2020). *The Water Network*. Obtenido de Solving Rural Rajasthan's Freshwater Crisis: <https://thewaternetwork.com/article-FfV/solving-rural-rajasthan-s-freshwater-crisis-UQ7cglK4i-6fSxLbvPZ52A>
- The watershed project. (8 de Julio de 2020). *What is a Watershed?* Obtenido de <http://thewatershedproject.org/what-is-a-watershed/>
- Toensmeier, E. (Consultado 18 de Marzo de 2021). *www.perennialsolutions.org*. Obtenido de Especies útiles perennes para México : <http://www.perennialsolutions.org/wp-content/uploads/2011/10/Especies-Utiles-y-Perennes-para-Mexico.pdf>
- Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, vol. 111. núm 4, 9-26.

- Town of Castle Rock Colorado. (29 de Abril de 2021). *Securing the Future* .
Obtenido de Storage: <http://crgov.com/1789/Storage>
- United States Geological Survey. (2020). *The Water Cycle*. Obtenido de
https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- United States Geological Survey. (19 de Febrero de 2021). *Aquifer Storage and Recovery*. Obtenido de https://www.usgs.gov/centers/ca-water/science/aquifer-storage-and-recovery?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- Universidad Nacional Autónoma de México. (7 de Noviembre de 2020). *Bosque de Quercus*. Obtenido de <https://www.iztacala.unam.mx/biologiamuseo/Textos%20pdf%20Portal/BOSQUE%20DE%20QUERCUS.pdf>
- Vélez, M. (2019). *Métodos pra determinar la recarga en acuíferos*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional.
- Vera, C., y Camilloni, I. (2007). *El ciclo del agua*. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología.
- Vich, A. (1996). *Aguas continentales. Formas y Procesos*. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo.
- Vich, A. (1999). *Aguas continentales. Formas y procesos. Manual de Aplicaciones prácticas*. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo.
- Villanueva, M., e Iglesias, A. (1984). *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Villarroya, F. (2009). *Jornadas técnicas sobre aprovechamiento de aguas subterráneas para riego. Tema: Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos*. Madrid, España: Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino).
- Wanielista, M., Kerster, R., y Eaglin, R. (1977). *Hidrology, water quantity and quality control, 2nd Ed*. New York, United States: Wiley.

Zhang, L., y Guilbert, E. (2012). A study of variables characterizing drainage patterns in river networks. *XXII ISPRS Congress, Commission II, ISPRS Archives Volume XXXIX-B2*, 29-34.

ANEXOS

Anexo A

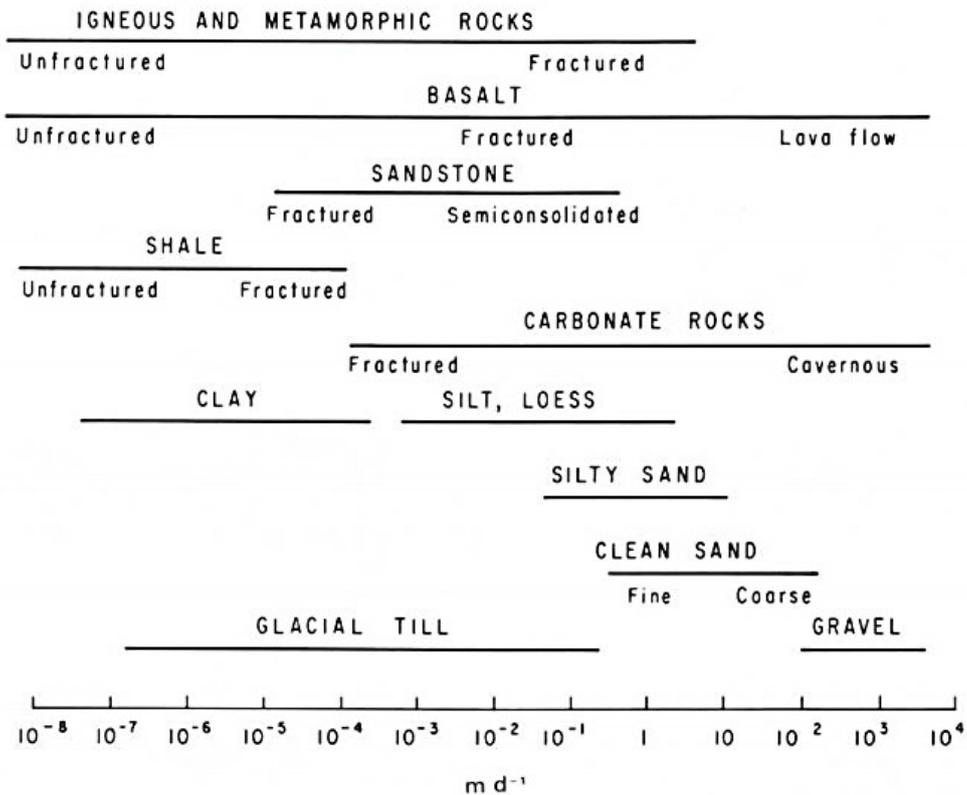
Tabla A1. Valores de porosidad para distintas rocas. Recuperado de Custodio y Llamas (1983).

Tipo	Material Descripción	Porosidad total % m					Porosidad eficaz % m _e			Observaciones
		Media	Normal Máx.	Mín.	Extraordinaria Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	
Rocas masivas	Granito	0,3	4	0,2	9	0,05	<0,2	0,5	0,0	A
	Caliza masiva	8	15	0,5	20		<0,5	1	0,0	B
	Dolomia	5	10	2			<0,5	1	0,0	B
Rocas metamórficas		0,5	5	0,2			<0,5	2	0,0	A
Rocas volcánicas	Piroclastos y tobas	30	50	10	60	5	<5	20	0,0	C, E
	Escorias	25	80	10			20	50	1	C, E
	Pumitas	85	90	50			<5	20	0,0	D
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0,1			<1	2	0,1	A
	Basaltos vacuolares	12	30	5			5	10	1	C
Rocas sedimentarias consolidadas (ver rocas masivas)	Pizarras sedimentarias	5	15	2	30	0,5	<2	5	0,0	E
	Areniscas	15	25	3	30	0,5	10	20	0,0	F
	Creta blanda	20	50	10			1	5	0,2	B
	Caliza detrítica	10	30	1,5			3	20	0,5	
Rocas sedimentarias sueltas	Aluviones	25	40	20	45	15	15	35	5	E
	Dunas	35	40	30			20	30	10	
	Gravas	30	40	25	40	20	25	35	15	
	Loess	45	55	40			<5	10	0,1	E
	Arenas	35	45	20			25	35	10	
	Depósitos glaciares	25	35	15			15	30	5	
	Limos	40	50	35			10	20	2	E
	Arcillas sin compactar	45	60	40	85	30	2	10	0,0	E
	Suelos superiores	50	60	30			10	20	1	E

A = Aumenta m y m_e por meteorización.
 B = Aumenta m y m_e por fenómenos de disolución.
 C = Disminuye m y m_e con la edad.

D = Disminuye m y puede aumentar m_e con la edad.
 E = m_e muy variable según circunstancias y tiempo.
 F = Variable según el grado de cementación y su solubilidad.

Tabla A2. Valores de conductividad hidráulica para distintas rocas, valores en m/día.
Recuperado de Heath (1983).



Nota: La tabla se encuentra en su idioma original, la traducción al español de las distintas rocas y características se muestran a continuación entre paréntesis: Igneous and metamorphic rocks (rocas ígneas y metamórficas); unfractured (no fracturadas); fractured (fracturadas); basalt (basalto); lava flow (flujo de lava); sandstone (arenisca); semiconsolidated (semiconsolidada); shale (esquisto); carbonate rocks (rocas carbonatadas); cavernous (cavernosas); clay (arcilla); silt (limo); loess (loess); silty sand (arena limosa); clean sand (arena limpia); glacial till (till glaciar) y gravel (grava).

Tabla A3. Valores de transmisividad para acuíferos. Recuperado de Iglesias (2002).

VALORES DE TRANSMISIVIDAD PARA ACUÍFEROS		
T ($\text{m}^2/\text{día}$)	Calificación	Posibilidades del acuífero
$T < 10$	Muy baja	Menos de 1 l/s con 10 metros de depresión
$10 < T < 100$	Baja	Entre 1 y 10 l/s con 10 metros de depresión
$100 < T < 500$	Media a alta	Entre 10 y 50 l/s con 10 metros de depresión
$500 < T < 1000$	Alta	Entre 50 y 100 l/s con 10 metros de depresión
$t < 1000$	Muy Alta	Más de 100 l/s con 10 metros de depresión

Tabla A4. Valores de coeficiente de almacenamiento para distintos materiales.
Recuperado de Villanueva e Iglesias (1984).

Tipo de material permeable	Forma del funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
<i>Kárstico:</i>		
Caliza y dolomías jurásicas	Libre	2×10^{-2}
	Semiconfinado	5×10^{-4}
	Confinado	5×10^{-5}
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
<i>Poroso intergranular:</i>		
Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
<i>Kársticos y porosos:</i>		
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

Tabla A5. Infiltración básica según el tipo de suelo. Recuperado de FAO (2001).

INFILTRACIÓN BÁSICA SEGÚN EL TIPO DE SUELO		
Tipo de suelo	Infiltración básica (mm/hr)	Infiltración básica (mm/día)
Arenoso grueso	25 a 60	600 a 1,440
Arenoso fino	18 a 25	432 a 600
Franco arenoso	14 a 18	336 a 432
Franco limoso	10 a 14	240 a 336
Franco arcilloso	7 a 10	168 a 240
Arcilloso limoso	4 a 7	96 a 168
Arcilloso compacto	2 a 5	48 a 120

Tabla A6. Componentes del coeficiente de infiltración. Recuperado de (Schosinsky y Losilla (2000)).

COMPONENTES DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN		
Por pendiente	Pendiente (%)	Kp
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	7 <	0.06

Por cobertura vegetal	Kv
Cobertura con zacate < 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate > 75%	0.21

Tabla A7. Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos. Recuperado de Grassi (1976).

PUNTO DE MARCHITEZ Y CAPACIDAD DE CAMPO			
Textura del suelo	Porcentaje por peso de suelo seco		
	PMP %	CC %	Densidad aparente (g/cm ³)
Arenoso	2 - 6	6 - 12	1.55 - 1.80
Franco-arenoso	4 - 8	10 - 18	1.40 - 1.60
Franco	8 - 12	18 - 26	1.35 - 1.50
Franco-arcilloso	11 - 15	23 - 31	1.30 - 1.40
Arcilloso-arenoso	13 - 17	27 - 31	1.25 - 1.35
Arcilloso	15 - 19	31 - 39	1.20 - 1.30

Tabla A8. Profundidad de raíces de diferentes cultivos. Recuperado de Grassi (1976).

PROFUNDIDAD DE LAS RAÍCES	
Cultivo	Metros
Alfalfa (pastos)	1 - 2
Algodón	1 - 1.7
Banano	0.5 - 0.8
Caña de azúcar	1.20 - 2
Frijol	0.5 - 0.7
Cebolla	0.3 - 0.5
Cítricos	1.20 - 2.0
Zacate	0.3 - 0.5
Bosques	2.0 - 3.0

Tabla A9. Radiación solar extraterrestre para el hemisferio norte (mm/día) según Allen, Pereira, Raes, y Smith (2006). Conversión de MJ*m-2*día-1 a mm/día por Sánchez (2007) y recuperado del mismo autor.

HEMISFERIO NORTE												
Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1
48	4.1	6.4	9.5	13.1	15.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6
46	4.6	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

Tabla A10. Radiación solar extraterrestre para el hemisferio sur (mm/día) según Allen, Pereira, Raes, y Smith (2006). Conversión de MJ*m⁻²*día⁻¹ a mm/día por Sánchez (2007) y recuperado del mismo autor

HEMISFERIO SUR												
Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2
66	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0
64	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9
62	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9
60	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.8	17.9
58	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0
56	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0
54	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1
52	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1
50	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2
48	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2
46	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2
44	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2
42	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2
40	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2
38	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2
36	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1
34	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1
32	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0
30	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9
28	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8
26	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7
24	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6
22	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4
20	17.1	16.3	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2
18	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1
8	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8
6	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5
4	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2
2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

Anexo B

Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Recuperado de Schosinsky (2006).

a) Fracción de lluvia interceptada por el follaje

Se define como coeficiente de follaje (Cfo) al porcentaje de la lluvia mensual que es retenida en el follaje (Schosinsky, 2006). Se considera que la retención de lluvia en follajes es del 12% de la precipitación mensual (Butler, 1957), siendo de 20% en bosques muy densos (Linsley, Kohler, y Paulus, 1958). El coeficiente de follaje es expresado en tanto por uno, por ejemplo, para un 12% de retención $Cfo = 0.12$, para 20% de retención $Cfo = 0.20$. Para calcular la retención de lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret) se aplica la ecuación B1.

$$Si, P \leq (5 \text{ mm/mes}), Ret = P$$

$$Si, (P)*(Cfo) \geq (5 \text{ mm/mes}), Ret = (P)*(Cfo)$$

$$Si, P > 5 \text{ mm/mes}, y (P)*(Cfo) < 5, Ret = 5$$

Ec. B1. Cálculo de la retención mensual de lluvia por follaje. Recuperado de Schosinsky (2006).

Donde:

P: Precipitación mensual del mes (dato meteorológico) (mm/mes).

Ret: Retención de lluvia en el follaje (mm/mes).

Cfo: Coeficiente de retención del follaje, para bosques muy densos $Cfo = 0.20$, otros: 0.12 (adimensional).

b) Infiltración

El coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (Kfc) es uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo. Dicho coeficiente está dado tentativamente por la ecuación B2:

$$Si, 16 \leq fc \leq 1,568 \text{ mm/día}, Kfc = 0.267\ln(fc) - (0.000154*fc) - 0.723$$

$$Si, fc < 16 \text{ mm/día}, Kfc = (0.0148*fc) / 16$$

$$Si, fc > 1568 \text{ mm/día}, Kfc = 1$$

Ec. B2. Cálculo del coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo. Recuperado de Schosinsky (2006).

Donde:

Kfc: Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo) (adimensional).

fc: Infiltración básica del suelo (permeabilidad) (mm/día).

El valor de *fc* corresponde a la permeabilidad del suelo saturado, en los primeros 30 cm de profundidad, ya que este es el espesor que se considera, está en contacto directo con el agua de lluvia. Dicho valor se obtiene en campo a partir de la prueba de anillos, con un permeámetro de Guelph, con la prueba de Porchet, o a partir de tablas de referencia de infiltración básica según el tipo de suelo, como la tabla A5 propuesta por la (FAO, 2001), la cual se ubica en el anexo A.

Además del coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo, influyen en la infiltración la pendiente del terreno y la vegetación. Dichos coeficientes vienen a conformar el coeficiente de infiltración del suelo (*Ci*), basado en la ecuación B3.

$$Si, Kp+Kv+Kfc > 1, Ci = 1$$

$$Si, Kp+Kv+Kfc \leq 1, Ci = Kp+Kv+Kfc$$

Ec. B3. Cálculo de del coeficiente de infiltración del suelo considerando la pendiente, vegetación y textura del suelo. Recuperado de Schosinsky (2006).

Donde:

Ci: Coeficiente de infiltración (adimensional).

Kp: Fracción que infiltra por efecto de la pendiente (adimensional).

Kv: Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal (adimensional).

Kfc: Fracción que infiltra por textura del suelo (adimensional).

Los valores sugeridos para los componentes que conforman el coeficiente de infiltración se muestran en la tabla A.6 propuesta por Schosinsky y Losilla (2000) la cual se encuentra en el Anexo A. En ningún caso el coeficiente de infiltración (*Ci*) debe ser mayor a 1, si así fuese, se le asigna a *Ci* el valor de 1.

c) Cálculo de infiltración pluvial mensual

El cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente al suelo (*Pi*), considera los factores de precipitación mensual, retención pluvial mensual en el follaje (ecuación B1) y coeficiente de infiltración (Ecuación B3). El cálculo de (*Pi*) está dado por la Ecuación B4.

$$P_i = (C_i) * (P - Ret)$$

Ec. B4. Precipitación que infiltra mensualmente al suelo. Recuperado de Schosinsky (2006).

Donde:

Pi: Precipitación que infiltra mensualmente en el suelo (mm/mes).

Ci: Coeficiente de infiltración (adimensional).

P: Precipitación mensual en (mm/mes).

Ret: Retención de lluvia mensual por follaje (mm/mes).

d) Escorrentía superficial

Se trata de la escorrentía superficial generada por la lluvia mensual, corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración. Se calcula mediante la ecuación B5.

$$ESC = P - Ret - P_i$$

Ec. B5. Cálculo de la escorrentía superficial. Recuperado de Schosinsky (2006).

Donde:

ESC: Escorrentía superficial (mm/mes).

P: Precipitación (dato meteorológico)(mm/mes).

Ret: Retención de lluvia mensual por follaje (mm/mes).

Pi: Precipitación que infiltra mensualmente al suelo (mm/mes).

Más adelante para el cálculo del balance de suelo se requiere conocer la infiltración mensual al suelo generada por la lluvia (ecuación B4), la capacidad de campo y el punto de marchitez del suelo, los cuales pueden ser obtenidos directamente en laboratorio de suelos o estimados a partir de la tabla A7. También será necesario conocer la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua en la zona donde se realiza el balance.

e) Evapotranspiración

Se ha definido con anterioridad que la evapotranspiración de una planta implica los procesos de transpiración de la planta a capacidad de campo, más la evaporación del suelo; sin embargo, en una cuenca o en una zona arbitraria de una cuenca es prácticamente imposible determinar la evapotranspiración de la vegetación debido a la gran variedad de ella y el distinto grado de desarrollo de las plantas existentes en la cuenca o en una zona de la misma (Schosinsky, 2006), por dicho motivo resulta conveniente asumir una evapotranspiración que se estime como promedio de la cuenca; dicha evapotranspiración promedio de la cuenca se asumirá como la evapotranspiración potencial (ETP).

En la literatura es posible encontrar múltiples ecuaciones para el cálculo de la evapotranspiración potencial, de las cuales algunas requieren una serie de datos que pocas estaciones meteorológicas registran. Schosinsky (2006) propone el uso de la ecuación de Blaney y Criddle (ONU, 1972) para la estimación de la ETP gracias a los pocos datos necesarios para su estimación, sin embargo en el presente trabajo se propone la utilización de la ecuación propuesta por Hargreaves y Samani (1985) ya que también

requiere datos que fácilmente pueden ser obtenidos en una estación meteorológica, y por el hecho de que en la literatura se ha demostrado que los resultados de su aplicación son muy próximos a los obtenidos con la ecuación de Penman-Monteith, considerado como el método estándar de referencia (Almorox, 2008).

La fórmula de Hargreaves para evaluar la evapotranspiración potencial (ETP) requiere únicamente datos de temperatura y de radiación solar, la expresión general es la siguiente.

$$ET_0 = 0.0135 * (t_{med} + 17.78) * R_s$$

Ec. B6. Evapotranspiración potencial. Recuperado de Hargreaves y Samani (1985).

Donde:

ET₀: Evapotranspiración potencial diaria (mm/día).

t_{med}: Temperatura media (°C).

R_s: Radiación solar incidente (mm/día de agua evaporada).

La radiación solar incidente (*R_s*) se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (*R₀*), es decir la radiación que llegaría al suelo si no existiera la atmósfera. La radiación solar incidente (*R_s*) se calcula a partir de la ecuación B7.

$$R_s = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min}) * 0.5$$

Ec. B7. Radiación solar incidente. Recuperado de Samani (2000).

Donde:

R_s: Radiación solar incidente (mm/día de agua evaporada).

R₀: Radiación solar extraterrestre (convertida a mm/día de agua evaporada).

KT: Coeficiente.

t_{max}: Temperatura diaria máxima (°C).

t_{min} : Temperatura diaria mínima (°C).

Para obtener la radiación solar extraterrestre existen múltiples tablas en la literatura, todas en función de la latitud y el mes de la zona estudiada; en las tablas A9 y A10 ubicadas en el anexo A se presentan los valores de radiación solar extraterrestre para cada mes según la latitud propuestos por Allen, Pereira, Raes, y Smith (2006), convertidos a mm/día de agua evaporada por Sánchez (2007). El en caso del coeficiente KT, se trata de un coeficiente empírico que se podría calcular a partir de datos de presión atmosférica, pero Samani (2000) recomienda $KT = 0.162$ para regiones de interior y $KT = 0.19$ para regiones costeras, por su parte Sánchez (2007) utiliza un valor medio $KT = 0.17$.

Con el objetivo de mantener la escala temporal de los parámetros del balance de suelos, para obtener la evapotranspiración potencial mensual (ETP mensual), se estimará primero la evapotranspiración potencial (mm/día) para el día 15 del mes estudiado, y después se deberá multiplicar el valor obtenido por el número de días que tenga dicho mes (Segura y Ortiz, 2017).

f) Recarga al acuífero

Para mantener la consistencia de las unidades de los parámetros de capacidad de campo, punto de marchitez, humedad del suelo, precipitación y evapotranspiración, Schosinsky (2006) sugiere la conversión de unidades a milímetros; para convertir la humedad del suelo, el punto de marchitez y capacidad de campo a milímetros, se pasará de porcentaje por peso de suelo seco a porcentaje de humedad por volumen, mediante la ecuación B8.

$$\% \text{ humedad por volumen} = (\% \text{ por peso de suelo seco}) * (\text{densidad aparente})$$

Ec. B8. Conversión de peso por porcentaje de suelo seco, a porcentaje por volumen.

Recuperado de Schosinsky (2006).

Una vez obtenido el porcentaje de humedad por volumen, se aplicará la ecuación B9 para obtener las unidades en milímetros. La tabla A8 muestra la profundidad de distintas raíces.

*Milímetros de agua = (% de humedad por volumen) *(profundidad de raíces en mm)*

Ec. B9. Conversión de porcentaje de humedad por volumen a milímetros de agua.
Recuperado de Schosinsky (2006).

Se denominará coeficiente de humedad (Ch): $Ch = (\text{humedad del suelo} - \text{punto de marchitez}) / (\text{capacidad de campo} - \text{punto de marchitez})$. Al iniciar un mes cualquiera, el suelo tendrá una humedad inicial (Hsi), si no existiese evapotranspiración, la precipitación que infiltra (Pi) aumentaría la humedad en el suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración, por lo tanto, el coeficiente de humedad al final del mes (C1) se estimaría con la ecuación B10.

$$C1 = (HSi - PM + Pi) / (CC - PM)$$

Ec. B10. Cálculo del coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración. Recuperado de Schosinsky (2006).

Donde:

C1: Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la infiltración.

HSi: Humedad del suelo al inicio del mes (mm).

PM: Punto de marchitez (mm).

Pi: Precipitación que infiltra (mm/mes).

CC: Capacidad de campo (mm).

Si se considera que ocurre la evapotranspiración, una vez ocurrida la infiltración, el coeficiente de humedad, al final del mes (C2) se estimaría con la ecuación B11:

$$C2 = (HSi - PM + Pi - ETR1) / (CC - PM)$$

$$ETR1 = (C1)*(ETP)$$

Ec. B11. Cálculo del coeficiente de humedad al final del mes una vez ocurrida la evapotranspiración. Recuperado de Schosinsky (2006).

Donde:

C2: Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración.

ETR1: Evapotranspiración potencial real (mm/mes), considera la humedad correspondiente al coeficiente C1.

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/mes).

El valor de C1 corresponde al coeficiente de humedad máximo, ya que considera la humedad del suelo al inicio del mes, más la infiltración de la lluvia, sin ocurrir la evapotranspiración. El valor de C2, corresponde al coeficiente de humedad mínimo, ya que está calculado considerando la humedad del suelo anterior, restándole la evapotranspiración mensual, estimada con el coeficiente de humedad máximo, C1. Por lo tanto, el coeficiente C2 se aproxima al coeficiente de humedad al final del mes.

Considerando que la infiltración y la evapotranspiración ocurren durante el mes, se estima que el coeficiente de humedad del mes corresponde al promedio de C1 y C2; es decir, $(C1+C2)/2$; por lo tanto, la evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes está dada por la ecuación B12:

$$ETPR (mm/mes) = ((C1+C2)/2) * ETP$$

Ec. B12. Evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes dado. Recuperado de Schosinsky (2006).

Donde:

ETPR: Evapotranspiración real tentativa promedio en una zona, ocurrida durante el mes (mm/mes).

C1: Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración.

C2: Coeficiente de humedad mínimo, considerando la evapotranspiración.

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/mes).

Los coeficientes de humedad *C1* y *C2* no pueden ser mayores a 1 ni menores a 0. En caso de que *C1* o *C2* sea mayor de 1, se tomará igual a 1, si fueran negativos, se tomarían con valor 0.

Se define como humedad disponible (*HD*), aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas para poder evapotranspirar. La humedad disponible está dada por la ecuación B13.

$$HD = HSi + Pi - PM$$

Ec. B13. Humedad disponible. Recuperado de Schosinsky (2006).

Donde:

HD: Humedad disponible (mm/mes).

HSi: Humedad del suelo al inicio del mes (mm).

Pi: Precipitación que infiltra (mm/mes).

PM: Punto de marchitez (mm).

Si la humedad disponible es menor que la *ETPR*, la planta no podrá evapotranspirar dicha cantidad, si, por otro lado, la humedad disponible es mayor que la *ETPR*, la planta evapotranspirará el total de la *ETPR*. Considerando esto, la evapotranspiración real (*ETR*) se calculará mediante la ecuación B14.

$$Si, ((C1+C2)/2)*ETP \leq HD, ETR = ((C1+C2)/2)*ETP$$

$$Si, ((C1+C2)/2)*ETP > HD, ETR = HD$$

Ec. B14. Cálculo de la evapotranspiración real. Recuperado de Schosinsky (2006).

ETR: Evapotranspiración real promedio de la zona ocurrida durante el mes (mm/mes).

C1: Coeficiente de humedad máximo sin considerar la evapotranspiración.

C2: Coeficiente de humedad mínimo al considerar la evapotranspiración.

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/mes).

HD: Humedad disponible (mm/mes).

Para realizar el cálculo de la recarga del acuífero, se requiere conocer la humedad del suelo al final del mes (*Hsf*), la cual no podrá ser mayor a la capacidad de campo, y se obtiene con la ecuación B15.

$$\text{Si, } (HD + PM - ETR) < CC, Hsf = HD + PM - ETR$$

$$\text{Si, } (HD + PM - ETR) \geq CC, Hsf = CC$$

Ec. B15. Humedad del suelo al final del mes. Recuperado de Schosinsky (2006).

Donde:

HSf: Humedad del suelo al final del mes (mm).

HD: Humedad disponible (mm/mes).

PM: Punto de marchitez (mm).

ETR: Evapotranspiración real (mm/mes).

CC: Capacidad de campo (mm).

g) Cálculo de recarga potencial al acuífero

La recarga al acuífero se llevará a cabo si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga el acuífero (Schosinsky, 2006). La recarga potencial al acuífero se calculará mediante la ecuación B16.

$$Rp = Pi + Hsi - HSf - ETR$$

Ec. B16. Recarga potencial al acuífero. Recuperado de Schosinsky (2006).

Rp: Recarga potencial (mm/mes).

P_i: Precipitación que infiltra (mm/mes).

HS_f: Humedad del suelo al final del mes (mm).

HS_i: Humedad del suelo al inicio del mes (mm).

ETR: Evapotranspiración real (mm/mes).

La recarga potencial anual en la cuenca corresponderá a la suma de las recargas potenciales mensuales. Para la estimación del volumen potencial de agua que recargará al acuífero (m^3/mes o $\text{m}^3/\text{año}$) se deberá multiplicar la recarga potencial (R_p) por el área de la cuenca (m^2).

Anexo C

Método del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América USDA-SCS para la estimación de la lámina de escurrimiento superficial. Recuperado de CONAFOR (2007).

Las curvas numéricas son similares al coeficiente de escurrimiento y fueron obtenidas por el USDA-SCS. Estas curvas dependen del tipo de suelo, condición hidrológica de la cuenca, uso y manejo del suelo, así como de su antecedente de condición de humedad.

El cálculo del escurrimiento medio – a partir de las curvas numéricas – es obtenido mediante el siguiente proceso

Ecuación C1

$$Q = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S}$$

Ec. C1. Estimación del escurrimiento medio. Recuperado de CONAFOR (2007).

Donde:

Q: escurrimiento medio (mm).

P: precipitación (mm).

S: potencial máximo de retención de humedad (mm).

Esta fórmula sólo es válida si $0.2(S) < P$, es decir, si la precipitación es mayor que la retención máxima de humedad, ya que, si no se cumple esto, la lluvia es retenida por el suelo, por lo tanto, no escurre y la retención máxima se define mediante lo siguiente:

Ecuación C2

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254$$

Ec. C2. Estimación del potencial máximo de retención de humedad. Recuperado de CONAFOR (2007).

Donde:

S: potencial máximo de retención de humedad.

CN: curva numérica o número de curva obtenida de tablas.

El valor de las curvas numéricas está determinado por los siguientes factores:

a) Suelo: es uno de los factores de mayor incidencia en el escurrimiento; su contenido de materia orgánica y textura son los factores que ayudan de manera importante en la infiltración. El USDA-SCS tomó en cuenta la clase textural de los suelos y su infiltración básica, para agruparlos en cuatro clases (tabla C1).

Tabla C1. Grupos de suelos de acuerdo con sus características. Recuperado de CONAFOR (2007).

GRUPOS DE SUELOS	
grupo	Descripción de las características del suelo
A	Suelo con bajo potencial de escurrimiento. Incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla y suelo permeable con grava en el perfil. infiltración básica 8-12 mm / hr.
B	Suelos con moderadamente bajo potencial de escurrimiento. Son suelos arenosos menos profundos y más agregados que el grupo A. Este grupo tiene una infiltración mayor que el promedio cuando húmedo. Ejemplo: suelos migajones, arenosos ligeros y migajones limosos. Infiltración básica 4-8 mm/hr.
C	Suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento. Comprende suelos someros y suelos con considerable contenido en arcilla, pero menos que el grupo D. Este grupo tiene una infiltración menor que la promedio después de saturación. Ejemplo: suelos migajones arcillosos. Infiltración básica 1-4 mm / hr.
D	Suelos con alto potencial de escurrimiento. Ejemplo, suelos pesados, con alto contenido en arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados. Infiltración básica menos a 1 mm / hr.

b) Condición hidrológica o cobertura vegetal del terreno: este factor considera la cobertura vegetal del terreno, el cual incide directamente sobre la interceptación de la precipitación y la rugosidad que se opone al escurrimiento. Para este factor, se determinaron tres clases de cobertura,

así como una serie de parámetros para agruparlas de acuerdo con el uso del terreno (tablas C2 y C3).

Tabla C2. Clases de cobertura vegetal. Recuperado de CONAFOR (2007).

CLASES DE COBERTURA VEGETAL	
Clase	% de cobertura
Buena	> de 75%
Regular	entre 50 y 75%
Mala	< de 50%

Tabla C3. Vegetación y condición hidrológica. Recuperado de CONAFOR (2007).

VEGETACIÓN Y CONDICIÓN HIDROLÓGICA	
Vegetación	Condición hidrológica
Pastos naturales	En malas condiciones: dispersos, fuertemente pastoreados, con menos que la mitad del área total con cobertura vegetal. En condiciones regulares: moderadamente pastoreados, con la mitad o las tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal. En buenas condiciones: ligeramente pastoreados y con más de las tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal.
Áreas boscosas	En condiciones malas: tienen árboles dispersos y fuertemente pastoreados, sin crecimiento rastrero. En condiciones regulares: moderadamente pastoreadas y con algo de crecimiento. En buenas condiciones: densamente pobladas y sin pastorear.
Pastizales mejorados	En buenas condiciones: pastizales mezclados con leguminosas sujetas a un cuidadoso sistema de manejo de pastoreo.
Rotación de praderas	En malas condiciones: áreas con material disperso, sobre pastoreado. En buenas condiciones: praderas densas, moderadamente pastoreadas, bajo una adecuada planeación de rotación de cultivos.
Cultivos	En malas condiciones: cultivos manejados con base en monocultivos. En buenas condiciones: cultivos que forman parte de una buena rotación de cultivos (cultivos de escarda, praderas, cultivos tupidos).

C) Uso de suelo: es un factor determinante en la estimación del escurrimiento superficial. Por tal motivo se consideran las diferentes prácticas de manejo a que es sometido. Con este último parámetro se

compone la tabla C4 para obtener la curva numérica que se utilizará en la fórmula.

Tabla C4. Uso, tratamiento y condición hidrológica del suelo. Recuperado de CONAFOR (2007).

USO, TRATAMIENTO Y CONDICIÓN HIDROLÓGICA DEL SUELO						
Uso de suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Curvas numéricas			
			A	B	C	D
Suelo en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
Cultivos de escarda	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curva a nivel	Mala	70	79	84	88
	Curva a nivel	Buena	95	75	82	86
	Terraza y curva a nivel	Mala	66	74	80	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos	Surcos rectos	Mala	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curva a nivel	Mala	63	74	82	85
	Curvas a nivel	Buena	61	73	81	84
	Terraza y curva a nivel	Mala	61	72	79	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hilera o forraje en rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curva a nivel	Mala	64	75	83	85
	Curva a nivel	Buena	55	60	78	83
	Terraza y curva a nivel	Mala	63	73	80	83
	Terraza y curva a nivel	Buena	51	67	76	80
Pastizales	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	99
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curva a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas a nivel	Buena	20	35	70	79
Pasto a corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Camino de tierra		Buena	72	82	87	89
Caminos pavimentados		Buena	90	90	90	90