



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

**Evaluación de la viabilidad de los sistemas adaptativos de
infiltración hídrica como estrategia para mitigar la
sobreexplotación del acuífero Valle de León**

TESIS

Que para optar por el grado de:

Doctor en Ciencia y Tecnología del Agua

P R E S E N T A:

José Arturo Espinoza Bonilla

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alejandro Flamenco Sandoval

CODIRECTORES:

Dra. Xitlali Virginia Delgado Galván

Dr. Daniel Tagle Zamora

GUANAJUATO, GTO., 27 DE JULIO DEL 2026



Campus Guanajuato

División de Ingenierías
Departamento de Ingeniería
Geomática e Hidráulica

Guanajuato, Gto. 27 de julio de 2026

Asunto: Aprobación de la versión final de tesis
para trámite de examen de grado.

DR. GILBERTO CARREÑO AGUILERA
Director de la División de Ingenierías
Campus Guanajuato
Universidad de Guanajuato
Presente.

Por medio del presente, nos permitimos informar que hemos leído y aprobado la tesis de **José Arturo Espinoza Bonilla**, alumno del **Doctorado en Ciencia y Tecnología del Agua**, con **NUA 426592**, titulada **"Evaluación de la viabilidad de los sistemas adaptativos de infiltración hídrica como estrategia para mitigar la sobreexplotación del acuífero Valle de León"**, desarrollada bajo la dirección de quienes suscribimos el presente documento.

Asimismo, hacemos constar que dicha tesis fue revisada por el comité sinodal asignado y que el alumno atendió las observaciones, realizando las correcciones correspondientes. En virtud de lo anterior, consideramos que la versión que se adjunta es la versión definitiva del trabajo y que no será objeto de modificaciones adicionales.

Sin otro particular, le enviamos un cordial saludo.

Atentamente,

"La Verdad Os Hará Libres"

Dr. Alejandro Fidel Flamenco Sandoval

Director de tesis

Dra. Xitlali Virginia Delgado Galván

Codirectora de tesis

Dr. Daniel Tagle Zamora

Codirector de tesis

AGRADECIMIENTOS

A mis abuelas Lucha y María, y a mi abuelo Gonzalo, quienes desde el cielo iluminan siempre mi camino.

A mi abuelo Rodolfo, por su cariño y por enseñarme con su ejemplo, el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A Maytee, por su amor y confianza.

A mis padres, hermano y Luz, por su amor y apoyo incondicional.

A mis colegas, revisores y directores de tesis, cuyos valiosos comentarios enriquecieron este trabajo.

A la Universidad de Guanajuato.

Al pueblo de México, que a través de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) hizo posible la realización de este trabajo mediante el otorgamiento de la Beca Nacional correspondiente a la Convocatoria 2022-2.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
RESUMEN	11
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Antecedentes	15
1.2 Un nuevo enfoque en la gestión de los recursos hídricos	17
1.3 La necesidad de buscar alternativas	20
1.4 Descripción del problema	21
1.5 Justificación del proyecto	22
1.6 Hipótesis	23
1.7 Objetivos	24
1.8 Estructura de la tesis	25
2. LOS SISTEMAS ADAPTATIVOS COMO ALTERNATIVA A LOS MEGAPROYECTOS HIDRÁULICOS	27
2.1 Introducción	27
2.3 Los megaproyectos hidráulicos	28
2.4 Gestión Adaptativa del Agua	32
2.5 Casos de implementación de acciones adaptativas para la captación e infiltración de agua de lluvia	33
2.6 Incertidumbre asociada a las acciones adaptativas de gestión hídrica	46
2.7 Conclusión	47
3. LA GESTIÓN DEL AGUA EN LA CIUDAD DE LEÓN	49
3.1 Introducción	49
3.2 Situación actual de los recursos hídricos en León	50
3.3 La administración hídrica en León	54

3.4 Resumen histórico de la gestión del agua en la ciudad de León	56
3.5 La crisis del agua en León y la búsqueda de alternativas para el abastecimiento de la ciudad – El caso de El Zapotillo	58
3.6 La gestión adaptativa del agua en la ciudad de León	63
3.7 Conclusión	65
4. ACCIONES ADAPTATIVAS DE CAPTACIÓN E INFILTRACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN EL MUNICIPIO DE LEÓN	67
4.1 Introducción	67
4.2 El papel de las acciones adaptativas de captación e infiltración de agua de lluvia ante la sobreexplotación del AVL.....	68
4.3 Acciones propuestas por la administración estatal	69
4.4 Acciones propuestas por instancias municipales.....	76
4.5 Proyectos y acciones no gubernamentales.....	81
4.6 Situación actual de las estrategias y proyectos que incluyen obras adaptativas de captación e infiltración hídrica en León	83
4.7 Conclusión	88
5. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA PARA EL AVL.....	90
5.1 Introducción	90
5.2 Metodologías para la identificación de zonas potenciales de recarga	91
5.3 Descripción del área de estudio: el AVL.....	104
5.4 Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en el AVL	113
5.4.1 Criterios que determinan la recarga al AVL.	115
5.4.2 Generación de capas temáticas	117
5.4.3 Reclasificación de las capas temáticas	126
5.4.4 Ponderación de los criterios.....	130
5.4.5 Superposición ponderada de las capas temáticas reclasificadas.....	131
5.5 Sitios con alta viabilidad para albergar acciones de recarga	134
5.6 Conclusión	136
6. SELECCIÓN Y PROPUESTA DE ACCIONES ADAPTATIVAS DE CAPTACIÓN E INFILTRACIÓN MAS VIABLES PARA MITIGAR LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL AVL	140
6.1 Introducción	140
6.2 Manejo de Recarga de Acuíferos	141
6.2.1 Principales técnicas MAR	142

6.3 Requerimientos esenciales para la implementación de acciones MAR.....	144
6.4 Selección de métodos de recarga para el AVL.....	146
6.4.1 Acciones de recarga hídrica: características y requerimientos.....	148
6.4.2 Selección de las acciones adaptativas de recarga para el AVL.....	155
6.4.3 Sitios propuestos para la implementación de zanjas, tinas, terrazas y estanques de infiltración	161
6.5 Conclusión	169
7. ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE LAS ACCIONES ADAPTATIVAS DE CAPTACIÓN E INFILTRACIÓN PARA MITIGAR LA SOBREENPLOTAÇÃO DEL AVL	171
7.1 Introducción	171
7.2 Metodología	173
7.3 Propuesta teórica de diseño e implementación de zanjas y estanques	175
7.3.1 Zanjas	176
7.3.2 Estanques	193
7.4 Evaluación económica de zanjas y estanques en el AVL bajo cuatro escenarios de rendimiento hidráulico	199
7.5 Posible impacto de las zanjas y estanques para la mitigación de la sobreexplotación del AVL	204
7.6 Conclusión	206
8. MARCO METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE VIABILIDAD DE ACCIONES ADAPTATIVAS DE CAPTACIÓN Y RECARGA HÍDRICA (MEVARH)	208
8.1 Introducción	208
8.2 Objetivos del MEVARH	209
8.3 Descripción del MEVARH	210
8.4 Resultados de la aplicación del MEVARH al AVL.....	218
8.5 Conclusión	226
DISCUSIÓN.....	227
CONCLUSIONES	233
REFERENCIAS.....	236

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Johad</i> en Rajasthan, India. Recuperada de The Water Network (2020).	34
Figura 2. Canales de riego en el sur de España. Recuperada de Barea (2018).	35
Figura 3. Sistema de <i>barraginhas</i> . Recuperada de Irrigat (2023).	36
Figura 4. Zanja de infiltración en la provincia de Bolognesi, Perú. Recuperada de Arana (2021).	37
Figura 5. Sistema de recarga hídrica implementado en el río Chuvíscar. Recuperada de Silva-Hidalgo (2017).	38
Figura 6. Obras de recarga hídrica construidas por comunidades autóctonas en la subcuenca del Valle de Ocotlán, Oaxaca, México. Arriba izquierda: pozo de absorción circular con reja, arriba derecha: pozo de absorción cuadrado construido con tabiques, abajo derecha: olla captadora de agua, abajo izquierda: presa construida sobre río. Recuperadas de Ojeda-Olivares et al. (2017).	39
Figura 7. Arriba: Alcantarillas pluviales construidas sobre la avenida Salk. Abajo: Área de captación y recarga en un banco de material en desuso. Recuperadas de Briseño-Ruiz (2017).	41
Figura 8. Jagüey para captación e infiltración de agua pluvial construido como parte del proyecto “Agua para Siempre”. Recuperada de Méndez (2019).	43
Figura 9. Bordo para captación e infiltración hídrica construido en el municipio de Atarjea como parte del programa “Captemos Agua”. Recuperada de Gobierno del Estado de Guanajuato (2024).	44
Figura 10. Bordo para captación e infiltración hídrica construido en el municipio de Tarimoro como parte del programa “Captemos Agua”. Recuperada de Gobierno del Estado de Guanajuato (2024).	45
Figura 11. Comunidades en las que se implementaron sistemas de captación de agua de lluvia como parte del proyecto SISCAP. Elaboración propia.	82
Figura 12. Acciones llevadas a cabo en la comunidad de San José de Otates Sur. Izquierda: tinas ciegas. Derecha: colocación de geocostales para el cabeceo de cárcavas. Recuperadas de Cotas de León, A.C. (2019).	83
Figura 13. Bordo en el municipio de León para usos múltiples e infiltración de agua en los mantos acuíferos. Recuperada de Ayuntamiento de León (2020).	86
Figura 14. Comunidades en León en las que se han implementado obras de bordería. Elaboración propia.	87

Figura 15. Acuífero Valle de León. Elaboración propia.	105
Figura 16. Subcuencas dentro del área comprendida por el AVL. Elaboración propia.....	107
Figura 17. Zonas de recarga de acuíferos del estado de Guanajuato, en color rojo zonas con alta potencialidad, amarillo zonas con media potencialidad y verde zonas con baja potencialidad. Recuperada de CEAG (2018).	114
Figura 18. Capa temática de pendiente del terreno del AVL. Elaboración propia.....	119
Figura 19. Capa temática de tipo de suelo del AVL. Elaboración propia.	120
Figura 20. Capa temática de litología del AVL. Elaboración propia.	121
Figura 21. Capa temática de geomorfología del AVL. Elaboración propia.....	122
Figura 22. Capa temática de densidad de drenaje del AVL. Elaboración propia.	123
Figura 23. Capa temática de uso de suelo y cobertura vegetal del AVL. Elaboración propia.	124
Figura 24. Capa temática de uso de suelo y cobertura vegetal del AVL. Elaboración propia.	125
Figura 25. Capa temática de densidad de lineamientos del AVL. Elaboración propia.....	126
Figura 26. Capas temáticas reclasificadas de acuerdo con su aptitud para la recarga hídrica. Elaboración propia.	129
Figura 27. Peso relativo de los ocho criterios biofísicos en el proceso de recarga al AVL. Elaboración propia.	130
Figura 28. Mapa de aptitud para la recarga hídrica del AVL. Elaboración propia.	132
Figura 29. Zonas con alto potencial de recarga hídrica del AVL. Elaboración propia.	134
Figura 30. Polígonos con alta viabilidad para albergar acciones de recarga hídrica al AVL. Elaboración propia.	135
Figura 31. Modelo de Ordenamiento Sustentable del Territorio en el año 2019 para el AVL. Elaboración propia.	145
Figura 32. Cuenca de infiltración. Recuperada de United States Environmental Protection Agency (2021).	149
Figura 33. Represas de control para recarga hídrica de distintas dimensiones. Recuperadas de Tahoe Regional Planning Agency (2014) y Lucas-Borja et al. (2021).	150
Figura 34. Construcción de una presa subsuperficial. Recuperada de Vétérinaires Sans Frontières (2006).....	151
Figura 35. Pozo de absorción construido para captar agua de escorrentía. Recuperada de Ojeda-Olivares et al. (2017).	152
Figura 36. Tinas ciegas (zanjas trincheras). Recuperada de Rubio et al. (2009).	153
Figura 37. Zanjas de infiltración. Recuperada de CONAFOR (2021).	154

Figura 38. Terrazas individuales. Recuperada de Cardoza et al. (2008).	154
Figura 39. Ubicación óptima para la implementación de zanjas, tinas y terrazas en el polígono 1. Elaboración propia.	163
Figura 40. Ubicación óptima para la implementación de zanjas, tinas y terrazas en el polígono 2. Elaboración propia.	164
Figura 41. Ubicación óptima para la implementación de zanjas, tinas y terrazas en el polígono 3. Elaboración propia.	165
Figura 42. Ubicación óptima para la implementación de cuencas y estanques de infiltración en el polígono 1. Elaboración propia.	166
Figura 43. Ubicación óptima para la implementación de cuencas y estanques de infiltración en el polígono 2. Elaboración propia.	167
Figura 44. Ubicación óptima para la implementación de cuencas y estanques de infiltración en el polígono 3. Elaboración propia.	168
Figura 45. Parcelas para la implementación de estanques y zanjas en el AVL. Elaboración propia.	175
Figura 46. Parcela 1 para zanjas en el AVL. Elaboración propia.....	176
Figura 47. Dimensiones propuestas para las tinas ciegas. Recuperada de Rubio et al. (2009).	179
Figura 48. Distribución de las tinas ciegas en el terreno. Elaboración propia.	180
Figura 49. Parcela 2 para zanjas en el AVL. Elaboración propia.....	186
Figura 50. Parcela 3 para zanjas en el AVL. Elaboración propia.....	190
Figura 51. Parcela 1 para estanques en el AVL. Elaboración propia.	194
Figura 52. Parcela 1 para estanques en el AVL. Elaboración propia.	195
Figura 53. Ejemplo de estanque. Elaboración propia.	197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concesiones de agua subterránea para el municipio de León de acuerdo con la base de datos del REPDA, con corte al 31 de marzo del 2024 (CONAGUA, 2024). Elaboración propia.	52
Tabla 2. Concesiones de agua superficial para el municipio de León de acuerdo con la base de datos del REPDA, con corte al 31 de marzo del 2024 (CONAGUA, 2024). Elaboración propia.	52
Tabla 3. Acciones inmediatas a nivel estatal en tema de fortalecimiento de infraestructura del agua. Recuperada de Gobierno del Estado de Guanajuato (2011).....	75
Tabla 4. Resumen de iniciativas gubernamentales y no gubernamentales para la propuesta e implementación de acciones de gestión adaptativa del agua en el estado de Guanajuato y el municipio de León. Elaboración propia.	79
Tabla 5. Estado del arte sobre la identificación de zonas potenciales de recarga mediante metodologías de análisis multicriterio. Elaboración propia.	93
Tabla 6. Escala de importancia 1-9 propuesta por Thomas Saaty. Recuperada de Alam et al. (2022).	101
Tabla 7. Índice de inconsistencia aleatorio. Recuperada de Zghibi et al. (2020).....	103
Tabla 8. Clases de gradiente de la pendiente. Elaborada a partir de FAO (2009).	118
Tabla 9. Criterios reclasificados de acuerdo con su aptitud para la recarga hídrica. Elaboración propia.	128
Tabla 10. Superficie ocupada por nivel de aptitud para la recarga hídrica. Elaboración propia.	133
Tabla 11. Principales técnicas MAR. Elaboración propia.	143
Tabla 12. Viabilidad de distintas acciones MAR para implementarse en el AVL. Elaboración propia.	159
Tabla 13. Viabilidad y prioridad de distintas acciones MAR para implementarse en el AVL. Elaboración propia.	160
Tabla 14. Parámetros óptimos para la implementación de zanjas, tinas, terrazas y estanques de infiltración en el AVL. Elaboración propia.....	162
Tabla 15. Factores para el coeficiente de escurrimiento (C). Recuperada de Rubio et al. (2009).	178

Tabla 16. Costo para la construcción de 100 zanjas trinchera . Recuperada de Cardozo et al. (2008) y modificado por el autor.	181
Tabla 17. Datos climáticos de precipitación y evaporación para la estimación de la recarga. Elaboración propia.	182
Tabla 18. Porcentaje de lluvia que infiltra. Elaboración propia.	184
Tabla 19. Volumen anual de recarga estimado para las zanjas en una hectárea de la parcela 1. Elaboración propia.	184
Tabla 20. Volumen anual de recarga estimado para las zanjas en una hectárea de la parcela 2. Elaboración propia.	188
Tabla 21. Volumen anual de recarga estimado para las zanjas en una hectárea de la parcela 3. Elaboración propia.	192
Tabla 22. Aproximación del valor del coeficiente de escurrimiento. Recuperada de Fernández et al. (2017).	196
Tabla 23. Volumen anual de recarga estimado para el estanque propuesto. Elaboración propia.	198
Tabla 24. Comparación costo–rendimiento de las obras de infiltración propuestas en las parcelas de estudio del AVL. Elaboración propia.	201
Tabla 25. Evaluación costo-rendimiento de zanjas y estanques de infiltración bajo distintos escenarios de desempeño hidráulico en el AVL. Elaboración propia.	202
Tabla 26. Modelo metodológico para estimar la viabilidad de implementación de acciones adaptativas de recarga como medidas de mitigación de la presión sobre acuíferos sobreexplotados. Elaboración propia.	215

RESUMEN

La ciudad de León, uno de los centros urbanos y comerciales más importantes del Bajío y de México, depende casi exclusivamente de las aguas subterráneas provenientes de los principales acuíferos de la región, particularmente del acuífero Valle de León (AVL). Esta dependencia, aunada a un modelo de gestión hídrica históricamente centrado en la oferta y en la construcción de grandes obras hidráulicas, las cuales pueden generar efectos ambientales y territoriales adversos, ha puesto en evidencia la necesidad de explorar alternativas más resilientes y ambientalmente sostenibles que permitan mitigar la sobreexplotación del acuífero y reducir la presión hídrica que enfrenta la ciudad. En este contexto, la gestión adaptativa del agua (del inglés, *Adaptive Water Management*, AWM) surge como una alternativa de manejo más resiliente que los modelos convencionales frente a los cambios hidroclimáticos, sociales e institucionales. Este enfoque promueve el desarrollo de infraestructura orientada a la captación e infiltración de agua sustentada en esquemas de cogestión social y en soluciones descentralizadas, frecuentemente basadas en la naturaleza. Con el objetivo de explorar la viabilidad de incorporar este tipo de acciones dentro del modelo de gestión hídrica de la ciudad de León, la presente investigación propone desarrollar un modelo metodológico que permita identificar la factibilidad de implementar acciones adaptativas de captación y recarga orientadas a mitigar la sobreexplotación de acuíferos y que pueda ser replicado en territorios con problemáticas hidrológicas similares. El modelo metodológico se estructura a partir de un proceso analítico compuesto por seis etapas interrelacionadas que integran el análisis de los sistemas adaptativos de gestión hídrica orientados a la captación y recarga, la revisión histórica e institucional de la gestión del agua en el área de estudio y la identificación de zonas con potencial de recarga subterránea. Asimismo, el modelo contempla la selección de acciones viables de captación e infiltración y la estimación de su posible impacto en la mitigación de la sobreexplotación del acuífero. Entre los principales hallazgos derivados de la aplicación de esta metodología al AVL destaca que, a partir de la revisión de los instrumentos de planeación en materia de desarrollo, ordenamiento territorial y cambio climático del municipio de León, se identifica que desde inicios del siglo XXI se ha configurado en la ciudad un respaldo institucional hacia enfoques de gestión sustentable del agua con carácter adaptativo, particularmente orientados a la captación de lluvia y a la recarga de acuíferos con el propósito de disminuir la presión

sobre los recursos hídricos subterráneos tanto a nivel estatal como municipal. No obstante, el análisis también evidencia limitaciones importantes, especialmente en lo relativo a la disponibilidad de información pública sobre el estado de las obras, su localización precisa y las instancias responsables de su ejecución, evaluación y seguimiento. En el proceso de identificación de zonas con potencial de recarga se detectó la existencia de 453.01 km² con alto potencial, localizados principalmente en la zona noroeste del AVL y en su porción meridional, así como 679.53 km² con potencial moderado, distribuidos principalmente en la Sierra de Guanajuato (SG) y en el flanco occidental y el extremo sur del AVL. A partir del análisis de las principales técnicas de Manejo de Recarga de Acuíferos (MAR, por las siglas en inglés de *Managed Aquifer Recharge*) se determinó que las acciones más viables para contribuir a la mitigación de la sobreexplotación del acuífero son las terrazas, zanjas y tinas de infiltración. En este sentido, la región de Los Altos de Jalisco presenta las condiciones más favorables para su establecimiento, identificándose 4.62 km² con alta aptitud para la construcción de estanques de infiltración y 19.32 km² para la implementación de terrazas, zanjas, tinas y obras afines. Se estima que mediante la incorporación de estas obras podría generarse un volumen potencial de infiltración de 132,788 m³ anuales hacia el AVL. Además del volumen infiltrado, la relevancia de estas acciones también se relaciona con los beneficios socioambientales que pueden generar en el sistema territorial al promover formas participativas de manejo del agua y fortalecer los vínculos entre la gestión hídrica, el territorio y las comunidades. En este sentido, la aplicación de la metodología propuesta permite reconocer la pertinencia de avanzar hacia un modelo de gestión del AVL con un enfoque adaptativo y descentralizado. Si bien las acciones adaptativas de recarga no constituyen por sí mismas una solución definitiva al déficit hídrico del acuífero, sí representan una base sólida para el desarrollo de programas integrales de recarga sustentados en criterios de priorización espacial y en mecanismos de coordinación institucional orientados no solo a incrementar la disponibilidad de agua subterránea, sino también a fortalecer la resiliencia hidrológica y socioambiental de las comunidades involucradas en su implementación. Como aporte de investigación se destaca la relevancia de articular el análisis técnico, particularmente la priorización espacial de las zonas de recarga y de los sitios de implementación de las acciones, con la revisión crítica de los procesos históricos y actuales que han orientado la gestión del agua en la zona de estudio.

ABSTRACT

The city of León, one of the most important urban and commercial centers in the Bajío region and in Mexico, relies almost exclusively on groundwater extracted from the region's principal aquifers, particularly the Valle de León aquifer (AVL). This dependence, coupled with a water management model historically centered on supply expansion and the construction of large hydraulic infrastructure, which may generate adverse environmental and territorial effects, has underscored the need to explore more resilient and environmentally sustainable alternatives capable of mitigating aquifer overexploitation and reducing the growing water pressure faced by the city. In this context, Adaptive Water Management (AWM) emerges as a more resilient management alternative than conventional models in the face of hydroclimatic, social, and institutional changes. This approach promotes the development of infrastructure oriented toward water capture and infiltration, supported by social co management schemes and decentralized solutions that are frequently nature based. In order to explore the feasibility of incorporating such actions into the water management model of the city of León, this research proposes the development of a methodological framework designed to identify the feasibility of implementing adaptive water capture and recharge actions aimed at mitigating aquifer overexploitation and capable of being replicated in territories facing similar hydrological challenges. The methodological framework is structured through an analytical process composed of six interrelated stages that integrate the analysis of adaptive water management systems focused on water capture and recharge, the historical and institutional review of water governance in the study area, and the identification of zones with groundwater recharge potential. In addition, the framework includes the selection of viable capture and infiltration actions and the estimation of their potential contribution to mitigating aquifer overexploitation. Among the main findings derived from the application of this methodology to the AVL is that, based on the review of planning instruments related to development, land use planning, and climate change in the municipality of León, an institutional orientation toward adaptive approaches to sustainable water management has been gradually consolidated in the city since the beginning of the twenty first century, particularly those focused on rainwater harvesting and aquifer recharge with the aim of reducing pressure on groundwater resources at both the state and municipal levels. Nevertheless, the analysis also reveals significant limitations, especially regarding the

availability of public information on the current status of the works, their precise location, and the institutions responsible for their implementation, evaluation, and monitoring. In the process of identifying areas with recharge potential, 453.01 km² with high potential were detected, mainly located in the northwestern zone of the AVL and in its southern portion, as well as 679.53 km² with moderate potential, primarily distributed in the Sierra de Guanajuato and in the western flank and southern edge of the AVL. Based on the analysis of the principal Managed Aquifer Recharge techniques (MAR), the most viable actions for contributing to the mitigation of aquifer overexploitation were identified as terraces, infiltration trenches, and infiltration basins. In this regard, the Los Altos de Jalisco region presents the most favorable conditions for their establishment, with 4.62 km² identified as having high suitability for the construction of infiltration ponds and 19.32 km² suitable for the implementation of terraces, trenches, basins, and related structures. It is estimated that the incorporation of these works could generate a potential infiltration volume of 132,788 m³ annually into the AVL. Beyond the infiltrated volume, the relevance of these actions is also associated with the socio environmental benefits they may generate within the territorial system by promoting participatory forms of water management and strengthening the links between water governance, territory, and local communities. In this sense, the application of the proposed methodology highlights the relevance of advancing toward a management model for the AVL based on an adaptive and decentralized approach. Although adaptive recharge actions do not in themselves constitute a definitive solution to the aquifer's water deficit, they nevertheless represent a solid foundation for the development of comprehensive recharge programs supported by spatial prioritization criteria and institutional coordination mechanisms aimed not only at increasing groundwater availability but also at strengthening the hydrological and socio environmental resilience of the communities involved in their implementation. As a research contribution, the study underscores the importance of articulating technical analysis, particularly the spatial prioritization of recharge zones and potential sites for implementing these actions, with a critical review of the historical and contemporary processes that have shaped water management in the study area.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Distintas ciudades de México han basado su desarrollo en la implementación de grandes obras de infraestructura hidráulica como presas y pozos profundos para asegurar una oferta constante de agua. No obstante, este modelo de gestión ha derivado, en muchos casos, en mayores conflictos por el recurso y plantea desafíos significativos para asegurar el abastecimiento a largo plazo, particularmente en el contexto del cambio climático (Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, A.C. [ITESO], 2021); Asociado a lo anterior, el incumplimiento de las expectativas de algunas de estas grandes obras hidráulicas ha provocado con frecuencia la necesidad de instrumentar proyectos de infraestructura adicionales (ITESO, 2021), lo que ha implicado tanto el despilfarro de recursos y sobrecostos (Aguilera, 2021) como el incremento del impacto social y ambiental de dichas obras. De ahí que el modelo actual de instalación de presas haya generado de forma recurrente graves violaciones a los derechos humanos, cuyas consecuencias acentúan aún más las desigualdades sociales ya de por sí graves (Gómez, Wagner, Torres, Martín y Rojas, 2014).

Relativo a lo anterior, un caso bien conocido en la región es la presa y acueducto El Realito, ubicados en el municipio de San Luis de la Paz, Guanajuato, proyecto de más de 3,500 millones de pesos, desarrollado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en colaboración con los gobiernos estatales de San Luis Potosí y Guanajuato con el objetivo gubernamental de suministrar agua a más de 800,000 habitantes de las ciudades de Celaya y San Luis Potosí, y de reducir el abatimiento de los acuíferos de la región y los hundimientos que afectan a la infraestructura urbana (CONAGUA, 2017). Si bien su construcción causó gran expectativa entre la población, la realidad es que, desde su inauguración en el año 2015, el complejo hidráulico se ha visto aquejado por constantes fallas, lo cual se ha traducido en periodos de falta de abastecimiento para miles de usuarios (El Sol de San Luis, 2021) (El Sol de San Luis, 2022). Consecuentemente, esta situación ha llevado a las autoridades a contemplar una inversión adicional de 123 millones de pesos para llevar a cabo reparaciones a la presa y el acueducto (González N., 2023).

Otro ejemplo notable es de la presa de Arcediano en el estado de Jalisco, cuya construcción, aprobada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) para abastecer de agua a la ciudad de Guadalajara, comenzó en el año 2003 para ser suspendida seis años después, en el año 2009, al advertir la inviabilidad del proyecto (EL INFORMADOR, 2009), dejando tras de sí una inversión inútil de casi 1000 millones de pesos la cual se ha sumado a la deuda pública del Estado, y sobre todo, el desalojo y la violación de los derechos humanos de los habitantes de la comunidad de Arcediano (Proceso, 2003).

Un ejemplo más en Jalisco, relevante recientemente, es la presa y acueducto El Zapotillo, ubicados en el municipio de Cañadas de Obregón. Con una inversión inicial de 6,788 millones de pesos (CONAGUA, 2017), este mega proyecto hidráulico desarrollado por la CONAGUA y los gobiernos de los Estados de Guanajuato y Jalisco, tenía como meta el aprovechamiento de 3.8 m³/s, 1.8 m³/s, y 3.0 m³/s para la ciudad de León, los Altos de Jalisco y la ciudad de Guadalajara, respectivamente, con lo que se suministraría agua a más de 1.6 millones de habitantes (CONAGUA, 2017). Sin embargo, tras años de disputas y negociaciones entre las autoridades y las comunidades de la región se resolvió desde el gobierno federal que la presa no abastecería agua a la ciudad de León, quedando así la ciudad de Guadalajara como principal beneficiada del complejo hidráulico (Cullell, 2021). Aunado a esto, una investigación realizada por el Instituto Mexicano para el Desarrollo Comunitario (IMDEC) con base en los datos de Transparencia Presupuestaria, mostró que la inversión destinada al megaproyecto era ya de 35,339 millones de pesos para el año 2019, con perspectivas de alcanzar los 71,960 millones para la conclusión de la obra (Silva, 2019), situándose con ello, muy lejos de los 7,960 millones de pesos que se estimaba en el año 2006 costaría su construcción (Silva, 2019). Otro punto que destacar es la vida útil de la obra, la cual se había determinado entre 25 y 30 años (Silva, 2019), por lo que después de más de 15 años en construcción, el mega complejo hidráulico se encuentra ya, a la mitad de su vida útil.

Además de los casos descritos anteriormente, es posible señalar muchos otros ejemplos en México donde la ejecución de mega proyectos de gestión hídrica han suscitado graves conflictos sociales, generado importantes daños ambientales, representado un importante despilfarro de recursos o no han generado los resultados esperados, como el caso de Miguel Alemán y Cerro de Oro (Oaxaca), Cañón de la Cabeza y Tigre (Coahuila) o La Yesca (Jalisco) (Gómez, 2015), por mencionar algunos. Para comprender mejor la magnitud de este problema basta con consultar los proyectos atendidos por el Movimiento Mexicano de Afectados por las Presas y en Defensa de los Ríos (MAPDER) (Gómez, 2015). Por lo tanto, es a partir de este panorama que dichos proyectos ponen en discusión la pertinencia de la política de

oferta basada en grandes presas y trasvases, e invitando así a explorar la posibilidad de adoptar alternativas bajo la perspectiva de una nueva economía del agua; la cual se enfoca a potenciar la gestión más razonable del recurso como alternativa a la construcción de más infraestructura hidráulica (Aguilera, 2008).

De manera similar a las grandes presas, se presenta el caso de las extensas baterías de pozos profundos de extracción de agua, megaproyectos que también acarrear graves problemas, relacionados sobre todo con la sobreexplotación de acuíferos (National Ground Water Fundation, 2022), como la disminución del nivel freático, lo que dificulta técnicamente el continuar extrayendo agua, el incremento de los costos de operación de pozos, la disminución de fuentes de agua superficiales ante su conexión con los cuerpos subterráneos, la subsidencia del terreno, o problemas relacionados con la contaminación del agua subterránea inducida por el propio acuífero.

En lo que respecta a México, las aguas subterráneas suponen la fuente principal de agua para sus usuarios. De acuerdo con la CONAGUA (2019), el agua subterránea representa el 56.7% del volumen total entregado a través de redes de agua potable. Como consecuencia de esto la sobreexplotación de acuíferos hace tiempo que supone un problema grave para el país. Según datos proporcionados por la propia CONAGUA (2022), de los 653 acuíferos de México, el número de estos con un déficit hídrico hasta el año 2019, ha oscilado anualmente entre 100 y 115. La gran variabilidad espacial y temporal del agua, el aumento en la demanda, los efectos del cambio climático, así como políticas públicas que incentivan cada vez mayor extracción de agua subterránea, ha orillado a que existan regiones en una situación extrema, como el caso del estado de Guanajuato, donde 19 de sus 20 acuíferos se encuentran en condición de sobreexplotación (González, 2023), representando con ello una alta vulnerabilidad hídrica para sus habitantes; ya que algunos de los centros urbanos más importantes y poblados del estado y el país, como es el caso de la ciudad de León, depende casi exclusivamente de esta fuente de agua (Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León [SAPAL], 2023).

1.2 Un nuevo enfoque en la gestión de los recursos hídricos

Como alternativa a este modelo de gestión hídrica es que surge la gestión adaptativa del agua como extensión esencial y oportuna del enfoque de gestión integral de los

recursos hídricos (IWRM) (Pahl-Wostl y Sendzimir, 2005). Los denominados sistemas de agua adaptativos se presentan como alternativas de gestión sustentable del agua más resistentes que los modelos ortodoxos a los cambios hidroclimáticos del entorno (Figueroa, 2020), siendo capaces de adaptarse a nuevas condiciones sociales, institucionales y medioambientales. Lo que hace distinto este enfoque de gestión de otros enfoques, es la necesidad de la evaluación cíclica del proceso de gestión a través de la participación de los actores relevantes, los cuales deben desarrollar una mayor capacidad para proteger sus intereses e incorporarlos en todo el enfoque del sistema para que el proceso de toma de decisiones y la gestión de recursos hídricos se haga de manera sostenible (Bharwani y Downing, 2009). Este cambio radical de paradigma consiste por tanto en modificaciones estructurales mayores tanto en la infraestructura, como en los marcos regulatorios a través del proceso de aprendizaje (Huntjens et al. 2008). Respecto a la infraestructura de los sistemas adaptativos encaminados a la gestión hídrica, ésta se basa principalmente en modelos de cogestión social que incluyen soluciones alternativas descentralizadas y a pequeña escala como ecotecnias, cosecha de lluvia, reducción de pérdidas físicas en redes de distribución, modernización de la agricultura (riego e inundación controlada), gestión de recarga de acuíferos (obras de intercepción e infiltración), obras de conservación de suelos, sistemas de tratamiento de agua y gestión de la demanda.

En la literatura es posible identificar múltiples casos de éxito en México y el resto del mundo en la implementación de estas alternativas de gestión hídrica, muchas encaminadas a brindar solución a una problemática tan relevante como es la recuperación de cuerpos de agua subterránea mediante la captación y recarga de agua de lluvia, tal es el caso, por ejemplo, de la gestión de la cuenca del río Arvari en India (Gale, 2005), donde en el año 1985 se inició un programa de captación de agua de lluvia mediante la construcción de represas de tierra con forma de media luna para recolectar la escorrentía producida durante breves, pero intensas tormentas que se producían en el área. Veinte años después más de setenta localidades estaban ya involucradas en el plan, construyendo miles de represas, así como otras estructuras para la captación de agua, dando como resultado un incremento de los niveles de agua subterránea, y permitiendo un caudal permanente en su río principal. Otro caso relevante descrito por el mismo autor se da en el sur de España entre los meses de marzo y junio, cuando hay un excedente de agua disponible debido al deshielo, la cual es desviada por medio de una extensa red de canales de riego hacia áreas altamente permeables. Debido a la actividad de recarga en el área, se han desarrollado dos tipos de manantiales: manantiales temporales y manantiales perennes, utilizados para riego y consumo humano. Así mismo, gracias a la humedad del suelo pendiente abajo de los canales de riego, se ha logrado el establecimiento de vegetación densa.

Además, el sistema no requiere de infraestructura sofisticada y se presume que es aplicable en otras partes del planeta.

Mas ejemplos de la aplicación de estas tecnologías son abordados por Grützmacher y Sajil Kumar (2012), donde destacan, por ejemplo, la implementación de un esquema de recolección de agua meteórica en el suburbio de Salisbury, Australia, compuesto por un área de captación de 11.2 hectáreas y 4 pozos de recarga, con el fin de captar, almacenar y tratar naturalmente el agua para irrigación municipal y suministro de agua con fines no potables; o la construcción de tres estanques de infiltración cerca del lago Tegel en Alemania para mejorar las condiciones de los cuerpos de agua subterráneos de la zona y hacer frente al incremento en la demanda de agua potable. Mas ejemplos en Europa son presentados por Sprenger et al. (2017), cuyo inventario de esquemas MAR muestra la adopción de estos sistemas en Alemania, Países Bajos, Francia, Finlandia, Suecia, Suiza y España, con la implementación principalmente de acciones como filtración ribereña, distribución superficial e inyección mediante pozos.

A nivel nacional, un ejemplo exitoso es el proyecto piloto de manejo de la recarga de agua subterránea en la zona de Ojos del Chuvíscar, en el estado de Chihuahua. En esta región, la disminución de los volúmenes de agua subterránea, ocasionada por la sobreexplotación del acuífero y el aprovechamiento intensivo de su capacidad natural de almacenamiento, hizo evidente la necesidad de implementar un sistema de recarga que contribuyera a reducir el déficit hídrico. 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 condujeran el agua captada a un pozo de recarga. Como resultado de este proyecto, en el año 2017 tras doce años ininterrumpidos de operación fue posible la estabilización del volumen de agua extraído anualmente del acuífero sin mayores abatimientos en los pozos de la zona (Silva-Hidalgo et al., 2017). Otros ejemplos interesantes en México son la implementación de un sistema de captación, conducción y almacenamiento de agua meteórica en la ciudad de San Luis Potosí, el cual drena un volumen de 21.93 m³/s y contribuye a la infiltración de agua subterránea (Briseño-Ruiz et al., 2017); la construcción de pozos de absorción, ollas captadoras y pequeñas represas en comunidades en la subcuenca del Valle de Ocotlán, Oaxaca (Ojeda-Olivares, Belmonte-Jiménez, y Ladrón de Guevara-Torres, 2017); o la construcción de embalses de infiltración contruidos sobre el cauce del río Nazas en la Región Lagunera (Gutiérrez y Ortiz, 2017).

1.3 La necesidad de buscar alternativas

El estado de Guanajuato enfrenta serios problemas relacionados con el agua subterránea. La mayoría de sus acuíferos, destinados al abastecimiento público y a los sectores agrícola, industrial y comercial, presentan elevados niveles de abatimiento, además de problemas de calidad del agua (Caldera y Tagle, 2020). Dicho problema ha venido en aumento en los últimos años, esto lo demuestran los datos proporcionados por el Gobierno del Estado de Guanajuato, quien mediante el Programa Estatal Hidráulico de Guanajuato declaraba en el año 2015, la sobreexplotación en 18 de sus 20 acuíferos, mientras que en la propuesta de punto de acuerdo para la actualización de dicho programa presentada al Congreso del Estado en el año 2023 se declara que son ya 19 de 20 acuíferos los que se encuentran en condición de sobreexplotación (González, 2023). Encabezando la lista con mayor déficit se encuentra el AVL, seguido de Irapuato-Valle, Valle de Celaya, Pénjamo-Abasolo, Ciénega Prieta-Moroleón y Silao-Romita (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2015).

En lo que respecta concretamente al municipio de León, reconociéndose su amplia población al ser el tercer municipio con mayor número de habitantes del país, además de constituir la ciudad con mayor relevancia económica del Bajío y del estado de Guanajuato (Ayuntamiento de León, 2014), ha venido creciendo en los últimos años la inquietud por parte del gobierno, investigadores y usuarios por buscar y proponer fuentes alternativas y sustentables de agua para la ciudad en oposición a las acciones tradicionales imperantes en el paradigma convencional de gestión hídrica; situación agravada a partir de la resolución por parte de autoridades federales de excluir a la ciudad de León como beneficiaria de la Presa El Zapotillo. Con estas alternativas los actores involucrados en la gestión del recurso buscan por un lado, disminuir la sobreexplotación del AVL, fuente principal de agua de los leoneses, y el cual presenta un déficit anual de 61,638,096 m³ (CONAGUA, 2024) con una fuerte tendencia desfavorable, aumentando considerablemente desde el año 2020, cuando el déficit era de 51,876,100 m³ (CONAGUA, 2020); y por otro, contribuir en cubrir la creciente demanda de agua por parte de los distintos usuarios bajo un contexto de cambio climático y crecimiento demográfico e industrial.

Como parte del interés gubernamental para incorporar acciones alternativas a la tradicional política de oferta, algunas de las medidas y proyectos propuestos por autoridades dentro de sus programas estatales y municipales para rehabilitar las fuentes de agua así como incrementar la disponibilidad de agua aprovechando fuentes disponibles y otras alternativas incluyen la del Programa Estatal de Cambio Climático de Guanajuato, el cual desde el año 2011 proponía la ejecución (en un

periodo de 4 años) de sistemas de captación de agua de lluvia en zonas urbanas y rurales dentro de las cuencas Turbio-Palote, Laja-Allende, Laja-Peñuelitas, Guanajuato y Laguna Seca, mediante cosechas de agua como medio de abastecimiento comunitario, así como la construcción de microbordería, bocas de tormenta y la inyección de agua de lluvia a los acuíferos (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2011).

O a nivel municipal, en el Programa de Gobierno Municipal de León 2021-2024, donde se propusieron distintas estrategias, como realizar noventa acciones de bordería para el almacenamiento de agua pluvial, o incrementar los subsidios entregados a las comunidades rurales para la implementación de acciones de captación de agua de lluvia (Ayuntamiento de León, 2022); estrategias similares se plantearon en el Programa Municipal de Cambio Climático de León elaborado en el año 2017, donde se condujo la priorización de distintas medidas de adaptación al cambio climático, resultando relevantes medidas como la ejecución de obras de regulación de escorrentía, la incorporación en la normatividad de construcción de edificaciones, infraestructura y equipamiento, elementos que incluyan análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgos ante el cambio climático, y la construcción de parques lineales para el control de inundaciones y la recarga de mantos acuíferos (Ayuntamiento de León, 2014).

En el caso de las organizaciones no gubernamentales, algunas iniciativas han impulsado la implementación de sistemas de captación de agua pluvial en zonas con alta vulnerabilidad hídrica de la Sierra de Lobos (Consejo Técnico de Aguas de León, A.C., 2018). Asimismo, se han llevado a cabo acciones como la construcción de tinas ciegas, la realización de podas fitosanitarias y la instalación de presas con geocostal en la comunidad de San José de Otates Sur, también ubicada en la Sierra de Lobos.

1.4 Descripción del problema

La ciudad de León, uno de los centros urbanos de mayor relevancia económica y política del país, cubre su demanda de agua potable en un 99 % de los acuíferos de la región (SAPAL, 2023), principalmente de los acuíferos Valle de León, Río Turbio y la Muralla (SAPAL, 2019), mientras que apenas el 1 % restante se obtiene por temporadas de la presa El Palote (SAPAL, 2023). Esta fuerte dependencia de fuentes

subterráneas de agua, alentada en buena medida por un modelo de gestión fundamentado en la oferta de agua, ha provocado una sobreexplotación significativa en los ya mencionados acuíferos, registrando un déficit anual en su volumen de agua, de acuerdo con las actualizaciones reportadas por CONAGUA en el año 2023, de 61,638,096 m³, 54,246,337 m³, y 10,341,518 m³, para los acuíferos Valle de León, Río Turbio y la Muralla, respectivamente. Estas cifras evidencian una alta vulnerabilidad hídrica que amenaza a millones de personas en la región, especialmente en el contexto de los posibles impactos del cambio climático global, cuyos efectos pueden agravar aún más la situación, incrementando la vulnerabilidad de la ciudad ante la escasez de agua.

Aunque en los últimos años se percibe un creciente interés por parte de académicos, autoridades y usuarios del agua de la ciudad de León por adoptar acciones sustentables de gestión hídrica como alternativa para mitigar la sobreexplotación del AVL, la realidad es que este nuevo enfoque no ha sido ampliamente apoyado como acción eje en la política hídrica estatal y municipal; pues como ya lo identificaba Godínez (2022), escépticos a estas alternativas han declarado que se tratan de medidas muy abstractas y poco fiables, mientras que otros, si bien la consideran una buena alternativa, han manifestado inquietud sobre las incertidumbres relativas a su viabilidad social, ambiental, hidrológica y técnica, o la incapacidad para estimar su potencial o desarrollar un plan cohesivo para emprenderlo; limitando en consecuencia, los beneficios que se puedan derivar de la instrumentación de este tipo de acciones, así como la posibilidad de obtener mayor apoyo económico e institucional para iniciar, dar continuidad o replicar a mayor escala este tipo de experiencias. Aunado a todo esto, otras incertidumbres asociadas a los procesos físicos subterráneos, la interacción entre el agua subterránea y superficial, la demanda futura de agua, o los efectos del cambio climático, han obstaculizado aún más la aceptación de estas alternativas, haciendo necesario y oportuno desarrollar estudios y análisis que disminuyan dichas incertidumbres.

1.5 Justificación del proyecto

Con base en lo anterior, el presente proyecto de investigación busca presentar una herramienta que permita disminuir la incertidumbre asociada a la implementación de este tipo de acciones mediante la propuesta y aplicación de un modelo metodológico

factible de ser replicado en sitios con estrés hídrico, que permita estimar la viabilidad hidrológica, técnica y social de implementar obras adaptativas orientadas a la captación e infiltración de agua para la recarga de acuíferos sobreexplotados. Dicha metodología se aplica como caso de estudio en la ciudad de León, con el fin de determinar la utilidad de estas acciones para contribuir a minimizar el déficit del AVL frente a los efectos del cambio climático global y al aumento en la demanda de agua por parte de sus distintos usuarios.

La pertinencia del proyecto se fundamenta en la necesidad de generar conocimiento orientado a apoyar la selección objetiva de acciones adaptativas, de modo que puedan ser consideradas por los tomadores de decisión como acciones eje dentro de la política hídrica. Con ello se busca alejarse de un enfoque centrado en la implementación de estrategias únicas, centralizadas y de gran escala orientadas a mantener la oferta, para optar por esquemas de infraestructura de gestión hídrica adaptativa. Estas opciones descentralizadas se presentan como alternativas cada vez más pertinentes y necesarias para hacer frente a la vulnerabilidad hidroclimática que enfrentan múltiples asentamientos urbanos en nuestro país, como es el caso de la ciudad de León, como consecuencia del cambio climático y del aumento en la demanda de agua.

1.6 Hipótesis

La hipótesis de esta investigación plantea que la aplicación de un modelo metodológico que integre criterios técnicos, sociales y políticos para la selección objetiva de acciones de infiltración y recarga permitirá evaluar la viabilidad de desarrollar proyectos de recarga hídrica para el AVL, evidenciando su potencial para incrementar la recarga y mitigar su sobreexplotación frente al aumento en la demanda de agua y los efectos del cambio climático. La hipótesis se sustenta en función de los siguientes cuatro supuestos:

1. El paradigma de gestión hídrica imperante en la ciudad de León, basado principalmente en la gestión de la oferta y dependiente de complejas obras hidráulicas, presenta limitaciones para enfrentar los eventos hidrometeorológicos extremos cada vez más frecuentes asociados a la variabilidad y al cambio climático, así como para responder a la creciente demanda de agua por parte de los sectores doméstico, industrial y agrícola.

2. Las obras adaptativas de gestión hídrica representan una alternativa de gestión descentralizada que, en muchos casos, requiere menos tiempo y recursos para su desarrollo y puede reducir diversos impactos económicos, sociales y ambientales asociados a los megaproyectos hidráulicos de gran escala.
3. Los posibles impactos del cambio climático, junto con el dinamismo económico y el aumento en la demanda de agua en la ciudad de León, pueden intensificar las presiones sobre los recursos hídricos, particularmente debido a la limitada capacidad de adaptación del modelo de gestión hídrica actual.
4. Llevar a cabo estudios de viabilidad mediante una metodología claramente definida puede contribuir a disminuir la incertidumbre comúnmente asociada a la implementación de acciones adaptativas de gestión hídrica.

1.7 Objetivos

El objetivo general de la investigación consiste en desarrollar un modelo metodológico orientado a estimar la viabilidad de implementar acciones adaptativas de captación y recarga para mitigar la sobreexplotación de acuíferos, tomando como caso de aplicación el AVL. Para ello, se plantean los siguientes objetivos particulares:

1. Definir los conceptos de gestión adaptativa, sistemas adaptativos de gestión hídrica y acciones adaptativas de captación e infiltración de agua, en el contexto del proyecto de investigación.
2. Recopilar y analizar casos de éxito en México y en el mundo sobre la implementación de acciones adaptativas de captación e infiltración de agua de lluvia.
3. Analizar la gestión hídrica actual e histórica en el estado de Guanajuato y en la ciudad de León, así como identificar las acciones adaptativas de captación e infiltración de agua propuestas e implementadas, tanto a nivel estatal como municipal, para el municipio de León, evaluando su grado de avance.
4. Determinar los sitios potenciales de infiltración y recarga hídrica del AVL.
5. Identificar las acciones de captación e infiltración hídrica más viables para su implementación en el AVL.
6. Evaluar el impacto de la implementación de acciones adaptativas de captación e infiltración de agua de lluvia para mitigar la sobreexplotación del AVL, determinando su viabilidad social, ambiental, hidrológica y técnica.

1.8 Estructura de la tesis

El documento de tesis se estructura en ocho capítulos, seguidos por los apartados de Discusión y Conclusión. El **capítulo 1** sirve como introducción al proyecto de investigación. En él se presentan el planteamiento del problema, la justificación del proyecto, la hipótesis y los objetivos.

En el **capítulo 2** se abordan los conceptos de gestión adaptativa del agua, sistemas adaptativos de gestión hídrica y acciones adaptativas para la captación e infiltración de agua. En este capítulo se recopilan y describen casos de éxito en México y en el extranjero relacionados con la aplicación de sistemas adaptativos de captación e infiltración de agua de lluvia orientados a la recarga de acuíferos. A través de este análisis se evidencia la pertinencia de adoptar una infraestructura de gestión hídrica basada en intervenciones pequeñas y descentralizadas como una alternativa sostenible frente a las grandes obras hidráulicas.

El **capítulo 3** ofrece un panorama integral sobre la situación actual de los recursos hídricos en la ciudad de León. Además de presentar una revisión histórica, se analiza el contexto general de la gestión del agua tanto en el estado de Guanajuato como en el ámbito local. Este capítulo examina la crisis hídrica que enfrenta León y las diversas estrategias y alternativas que se han considerado para garantizar el abastecimiento de agua a la población.

En el **capítulo 4** se analiza el papel de las acciones adaptativas de captación e infiltración hídrica en la política hídrica estatal y municipal. Para ello, se estudian distintos programas, informes y boletines, identificándose las acciones que se han propuesto para su implementación en el municipio de León, tanto desde iniciativas gubernamentales como de la sociedad civil. Asimismo, se examina el grado de avance de dichas acciones y su situación actual.

En el **capítulo 5** se lleva a cabo una zonificación del AVL, identificándose su aptitud para la recarga en una escala de 1 (baja aptitud para la recarga) a 5 (alta aptitud para la recarga), de acuerdo con los parámetros biofísicos más relevantes para los procesos de infiltración y percolación hacia el acuífero. Dentro de las zonas con alto potencial de recarga hídrica se proponen cinco polígonos cuyas dimensiones y características del terreno los hacen particularmente viables para la implementación de proyectos que incorporen acciones adaptativas de captación e infiltración.

En el **capítulo 6** se identifican las acciones de infiltración hídrica más viables para su implementación en el AVL. Asimismo, se determinan sus ubicaciones óptimas dentro

de las zonas con alta aptitud para la recarga mediante el análisis de las características biofísicas del área de estudio, las particularidades de cada acción de recarga y los parámetros recomendados en la literatura para su implementación.

En el **capítulo 7** se analiza el posible impacto que tendría la implementación de las acciones adaptativas de captación e infiltración hídrica identificadas en el capítulo 6, con el propósito de evaluar su potencial para mitigar la sobreexplotación del acuífero. Para ello, se proponen cuatro escenarios de aplicación de las técnicas de recarga, los cuales permiten ilustrar su viabilidad técnica y su grado de contribución potencial a la recuperación del acuífero.

En el **capítulo 8** se presenta el marco metodológico para la evaluación de viabilidad de acciones adaptativas de captación y recarga hídrica (MEVARH), resultado del proceso de investigación, el cual fue aplicado para conducir el análisis orientado a identificar la viabilidad y el posible impacto de implementar acciones adaptativas de captación y recarga hídrica destinadas a mitigar la sobreexplotación de acuíferos. Con el fin de facilitar su aplicación en proyectos similares, se destacan los aspectos más relevantes de cada etapa y se presentan los resultados obtenidos en su caso de aplicación al AVL.

La tesis concluye con un apartado de discusión de los resultados de la investigación, en el que se exponen las contribuciones de este trabajo a las comunidades científica y social, así como recomendaciones para futuras investigaciones. Finalmente, se presentan las conclusiones generales derivadas del estudio, las cuales sintetizan los principales hallazgos y aportes de la investigación.

2. LOS SISTEMAS ADAPTATIVOS COMO ALTERNATIVA A LOS MEGAPROYECTOS HIDRÁULICOS

2.1 Introducción

Un elemento patente dentro del manejo de los recursos naturales a nivel nacional es que el modelo imperante de gestión hídrica se ha fundamentado en la oferta de agua y la implementación de megaproyectos hidráulicos impulsados institucionalmente para cumplir con la visión neoliberal dentro de la política pública de gestión hídrica; lo cual ha implicado procesos de privatización, comercialización y mercantilización (Tagle, 2023). Sin embargo, el impulso a esta tendencia de gestión corporizada y de tipo neoliberal de los recursos hídricos no es novedad, la podríamos rastrear a finales de la década de los 80's, cuando por decreto de Carlos Salinas de Gortari, se creó en febrero de 1989 la CONAGUA, la cual se ha convertido hasta el día de hoy en la única autoridad encargada de las concesiones y asignaciones del agua en el país (Trejo, 2022). Algunos años después aconteció otro evento, y tal vez más trascendental y sensible que el anterior. Nuevamente, en el Gobierno de Salinas de Gortari, se aprobó el 1 de diciembre de 1992 la Ley de Aguas Nacionales; una ley que cedía a las empresas privadas los derechos de las presas y canales, así como permisos para explotar fuentes acuíferas (Trejo, 2022).

Más recientemente fue la presentación en el año 2014 por el entonces presidente de México, Enrique Peña Nieto, del Programa Nacional de Infraestructura (PNI) 2014-2018, que contemplaba una inversión total de 7.7 billones de pesos, de los cuales \$417,756 millones serían destinados para grandes proyectos hidráulicos; lo que significaba prácticamente doblar la inversión del PNI respecto al sexenio anterior (Martínez-Velarde, 2014). Ejemplos hay más, pero ya es posible apreciar una realidad genérica para México y otras economías emergentes sometidas al régimen neoliberal, y es que la gestión de los recursos naturales en las últimas décadas se ha fundamentado en un modelo de despojo extractivista con trasfondo privatizador, donde el saqueo, la imposición y el desplazamiento forzoso son prácticas sistemáticas

(Martínez-Velarde, 2014), y donde, como ya hemos visto, la gestión del agua no queda exenta.

El objetivo principal de este capítulo es definir los conceptos de gestión adaptativa, sistemas adaptativos de gestión hídrica y acciones adaptativas de captación e infiltración de agua en el contexto del proyecto de investigación, además de demostrar la relevancia y pertinencia de adoptar un enfoque de gestión adaptativa del agua como modelo para la administración hídrica; dicho propósito se sustenta en la exposición de diversos casos en México y otros países donde se han llevado a cabo con éxito acciones adaptativas para la gestión sostenible del agua, específicamente dirigidas a la infiltración y recarga de los acuíferos. Para lograr este cometido, se llevó a cabo una amplia revisión de la literatura especializada. Es importante destacar que, entre las diversas acciones identificadas en la literatura, se han elegido presentar aquellas cuyos costos y dificultades técnicas de implementación son relativamente bajos. Este criterio se alinea con los principios de la gestión integral de los recursos hídricos, promoviendo el desarrollo de infraestructura sencilla, descentralizada y de cogestión social. Respecto a la implementación de estas acciones a nivel mundial, se han incluido únicamente aquellas experiencias que se han considerado afines al área de estudio dadas sus condiciones climáticas y geográficas.

2.3 Los megaproyectos hidráulicos

Ofrecido este breve antecedente más bien político, pero necesario para comprender lo que posiblemente sea una de las principales causas de la proliferación de las grandes obras hidráulicas en México y muchos otros países, así como del estado crítico de los recursos hídricos, resulta pertinente abordar el hecho de que, a los megaproyectos hidráulicos como grandes presas y trasvases, se les ha asociado con graves impactos negativos que incluyen: la desaparición de núcleos de población (Funes, Martín, y González, 2018) y el desplazamiento masivo de personas (Zacune, 2011); un gran impacto ambiental que continúa en el tiempo; un esfuerzo económico (generalmente procedente de fondos públicos) del que no se obtiene ningún beneficio al no conseguir alcanzar los objetivos para los que fueron implementadas (Funes, Martín, y González, 2018); modificaciones de la geomorfología fluvial y transformación de ecosistemas (Martínez-Velarde, 2014); así como la inundación de tierras o cambios en el ecosistema de los ríos, cuyas afectaciones ambientales y

socioculturales van más allá de la zona de embalse (Gómez, Wagner, Torres, Martín, y Rojas, 2014). Para comprender la magnitud de estos problemas a nivel nacional y los conflictos sociales asociados basta con consultar algunos de los proyectos atendidos por el MAPDER (Gómez, 2015), los cuales se han encargado de llevar el recuento de los impactos y consecuencias que han traído las presas para las poblaciones afectadas, incluyendo promesas incumplidas, acciones corruptas, reubicaciones injustas e imposición de proyectos (Gómez, Wagner, Torres, Martín, y Rojas, 2014); entre estos proyectos se incluyen La Parota (Guerrero), Chinín, La Línea, El Porvenir, Isla El Cayo, Yaxchilán, Huixtán I, Huixtán II, Quetzalli, Altamirano-Nance, Sistema Cancuc, Itzantún (Chiapas), Boca del Cerro y Pantanos de Zentla (Tabasco), Las Cruces, Aguamilpa y El Cajón (Nayarit), Paso de la Reina, Benito Juárez, Miguel Alemán y Cerro de Oro (Oaxaca), Cañón de la Cabeza y Tigre (Coahuila), La Yesca (Jalisco), entre muchos otros (Gómez, 2015).

Además de los ya mencionados, otros problemas asociados a las grandes presas son los daños a la salud ocasionados durante su construcción, la emisión de gases de efecto invernadero (Zacune, 2011); tan relevante es este aspecto, que se estima que las emisiones de metano derivadas de las grandes represas representan por lo menos un 4 % del impacto de las actividades humanas en el calentamiento global, y constituyen la mayor fuente de metano de origen antropogénico (International Rivers, 2008), así como el despilfarro de dinero y sobrecostes (Aguilera, 2021) ante la necesidad de instrumentar proyectos de infraestructura adicionales como consecuencia de la falta de cumplimiento en las expectativas de estas grandes obras hidráulicas (ITESO, 2021). Posiblemente el ejemplo más relevante en la actualidad es el de la presa El Zapotillo, en la localidad jalisciense de Temacapulín, el cual tuvo una inversión inicial de 6,788 millones de pesos (CONAGUA, 2017), pero que tras una investigación realizada por el Instituto Mexicano para el Desarrollo Comunitario (IMDEC) y con base en los datos de Transparencia Presupuestaria (Silva, 2019), se reveló que la inversión destinada al megaproyecto era ya de 35,339 millones de pesos para el año 2019, con perspectivas de alcanzar los 71,960 millones para la conclusión de la obra, situándose con ello, muy lejos de los 7,960 millones de pesos que se estimaba en el año 2006, costaría su construcción.

Un hecho similar ocurre con la construcción y operación de pozos profundos de extracción de agua, implementados casi de manera indiscriminada para cubrir la creciente demanda de los distintos usuarios del agua. Para poner en perspectiva la relevancia de las aguas subterráneas, se ha estimado que el 50 % del abastecimiento actual de agua potable a nivel mundial es proporcionada por agua subterránea (United Nations, 2003), y que entre 1.5 y 2.8 billones de personas dependen del agua subterránea como fuente principal de acceso al agua potable (Morris et al., 2003). Sin

embargo, también se presentan regiones donde ésta es la fuente principal de agua, como en la Ciudad de México, donde las aguas subterráneas cubren el 68 % de las demandas (Martínez, 2021), y el propio estado de Guanajuato, donde de acuerdo con la CONAGUA se tiene un volumen concesionado total de 4,556.50 millones de metros cúbicos, de los cuales poco más del 68 % corresponde a aguas subterráneas (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2015). Los problemas más importantes asociados a los pozos profundos están relacionados inevitablemente con la sobreexplotación de los acuíferos, es decir, cuando la extracción de agua es mayor que la capacidad de reposición de ésta (National Ground Water Foundation, 2022). Entre los efectos negativos de la sobreexplotación de acuíferos se ha identificado: la disminución del nivel freático, lo que dificulta técnicamente el continuar extrayendo agua, el incremento de los costos de operación de pozos, la disminución de fuentes de agua superficiales ante su conexión con los cuerpos subterráneos, la subsidencia del terreno, o problemas relacionados con la contaminación del agua subterránea, lo cual representa una amenaza para la salud de los usuarios (National Ground Water Foundation, 2022).

Por lo que se refiere al estado de Guanajuato, se han presentado casos de subsidencia del suelo en zonas urbanas de Irapuato y Salamanca, o de casos de extracción de agua con características de fosilización y fuerte contaminación por causas humanas a través de desechos tóxicos, básicamente del sector industrial (Caldera, Tagle, y Davison, 2020). En el caso de la ciudad de León, el principal problema asociado a la intensa extracción de agua subterránea mediante pozos profundos ha sido la persistente crisis de escasez de agua que enfrenta desde hace décadas. Esta situación es consecuencia de la sobreexplotación de los acuíferos que abastecen a la ciudad, lo que ha provocado un grave déficit hídrico, particularmente en los acuíferos Río Turbio, La Muralla y, sobre todo, Valle de León, del cual se obtiene el agua mediante 1,455 pozos de extracción (Valdivia et al., 2022), y supone la fuente principal de agua para la ciudad. Cabe decir, que al igual que como sucede con las grandes represas, la implementación de pozos profundos de extracción no se ve exenta de generar graves conflictos sociales, alentados igualmente por la presión ejercida a los acuíferos.

Esto fue lo ocurrido en el municipio de León a principios de la década de los 90's, donde a partir de la insuficiencia del AVL para cubrir la creciente demanda de agua, se plantearon los proyectos La Muralla I y La Muralla II, el cual el primero de ellos concluyó en el año de 1992, y consistió en la construcción de 19 pozos y un acueducto en la zona de La Muralla, en el municipio vecino de Romita, con el objetivo de llevar agua hasta la ciudad de León (Caldera y Tagle, 2015). Ya desde etapas tempranas del proyecto de La Muralla I se habían escuchado algunas voces de inconformidad tanto de campesinos como de autoridades municipales de Romita, quienes sostenían que

al permitir llevar el agua a León se comprometería la disponibilidad para Romita (Caldera y Tagle, 2015). Sin embargo, fue a partir del proyecto La Muralla II, con el que se pretendía construir una segunda batería de pozos en el año 2002, que el conflicto escaló para enfrentar por un lado al Frente Cívico de Defensa Ecológica, y por el otro, a SAPAL apoyado por la policía estatal para avanzar en las obras; culminando eventualmente en un enfrentamiento violento entre 400 manifestantes del movimiento y 250 efectivos de la policía estatal, la policía ministerial y la policía preventiva de Romita (Caldera y Tagle, 2015), así como con la continuación del proyecto.

Como respuesta a este panorama de gestión hídrica basado en la oferta y el cual se asocia con grandes obras de infraestructura hidráulica como presas y pozos profundos de extracción de agua, se plantea la pertinencia del enfoque de la nueva cultura del agua, la cual prioriza la necesidad de alcanzar la sostenibilidad del recurso, respetar el derecho de las minorías a no ser expulsadas de sus territorios en aquellos casos donde se plantean obras hidráulicas de gran magnitud y a garantizar el derecho de las generaciones futuras para disponer de un patrimonio hidrológico (Martínez, 2003); transitando así de una orientación de la oferta de agua, que respalda los trasvases entre cuencas, a una gestión de la demanda, que implica la identificación de mecanismo que permitan lograr un equilibrio entre las necesidades de los diferentes usos y usuarios con la disponibilidad de agua de la cuenca, sin que se ponga en riesgo la salud de los ecosistemas (Barkin y Klooster, 2006).

Resulta pertinente mencionar también, que si bien, se han presentado aquí algunos casos específicos en la implementación de megaproyectos hidráulicos que inciden en el área de estudio, el interés por la adopción de alternativas adaptativas de gestión hídrica en la ciudad de León, no se limita a la oposición de la construcción de un megaproyecto específico, pues como menciona Gómez et al. (2014), la discusión se plantea en contra de una política hídrica mundial y en contra del paradigma de gestión del agua vigente. En el caso concreto de la ciudad de León, catedráticos y expertos sobre el problema de sobreexplotación del AVL ya han propuesto que la solución tiene que ver con la adaptación basada en ecosistemas, soluciones basadas en la naturaleza y la instalación de infraestructura verde (Segovia, 2021), motivando de esta manera la exploración de este nuevo enfoque de gestión hídrica como modelo eje para la remediación del AVL.

2.4 Gestión Adaptativa del Agua

Bajo este panorama de los recursos hídricos y su modelo de gestión, se tornó inevitable la gestación de un interés real por parte de distintos usuarios del agua, académicos y tomadores de decisión en México y el mundo, por explorar fuentes alternativas del recurso, implementadas a partir de una visión integral de cuencas y del ciclo hidrológico, apostando por medidas con mayor capacidad de resiliencia y adaptabilidad al cambio climático y a los cambios hidrosociales, que los megaproyectos hidráulicos convencionales. Para abordar este tema sería pertinente definir en una primera instancia el concepto de Gestión Adaptativa. Pahl-Wostl, Jeffrey y Sendzimir (2011) mencionan que, en términos generales, la gestión adaptativa puede ser definida como un proceso sistemático para mejorar las políticas y prácticas a partir del aprendizaje de los resultados de otras estrategias de gestión previamente implementadas y tomando en cuenta los cambios en los factores externos de una manera proactiva. Es decir, lo que hace distinto a este enfoque en la gestión hídrica respecto a otros enfoques, es la necesidad de la evaluación cíclica del proceso de gestión a través de la participación de los actores relevantes, los cuales deben desarrollar una mayor capacidad para proteger sus intereses e incorporarlos en todo el enfoque del sistema para que el proceso de toma de decisiones y la gestión de recursos hídricos se haga de manera sostenible (Bharwani y Downing, 2009), lo que implica una acción colectiva para administrar los recursos naturales a nivel local mediante un proceso de adaptación (Bisaro, Hinkel, y Kranz, 2020).

Por su parte Figueroa (2020), define los sistemas adaptativos de gestión del agua como alternativas de gestión sustentable del agua más resistentes que los modelos ortodoxos a los cambios hidroclimáticos del entorno, siendo capaces de adaptarse también a nuevas condiciones sociales e institucionales. La gestión adaptativa del agua es entonces una extensión esencial y oportuna del enfoque de gestión integral de los recursos hídricos (Pahl-Wostl y Sendzimir, 2005); que conlleva un cambio radical de paradigma que incluye modificaciones estructurales mayores tanto en la infraestructura hidráulica (Figueroa, 2020) como en los marcos regulatorios a través del proceso de aprendizaje (Huntjens et al., 2008). Por lo tanto, podemos definir una acción hídrica como adaptativa debido a dos aspectos fundamentales. En primer lugar, su proceso de gestión implica una evaluación cíclica y colectiva que permite administrar los recursos hídricos a nivel local a través de un proceso de adaptación y aprendizaje; y, en segundo lugar, estas acciones exhiben una importante capacidad de adaptación a nuevas condiciones climáticas, ambientales, sociales e institucionales.

Ahora bien, respecto a las acciones adaptativas de gestión hídrica encaminadas a la mitigación en el abatimiento de acuíferos sobreexplotados, y a la que nos referiremos como acciones adaptativas para la infiltración de agua; en apego con los objetivos de la IWRM, que buscan garantizar el uso óptimo y sostenible de los recursos hídricos para el desarrollo económico y social, al mismo tiempo de que se protege y mejora el valor ecológico del medio ambiente (Pahl-Wostl, Jeffrey, y Sendzimir, 2011); se basan principalmente en modelos de cogestión social que incluyen soluciones alternativas descentralizadas, a pequeña escala y muchas veces basadas en la naturaleza, como restauración de humedales, cosecha de lluvia, terrazas, zanjas de infiltración, zanjas de siembra, estanques de infiltración (jagüeyes), presas filtrantes, pozos de recarga someros, tinas ciegas, entre otras.

Cabe señalar que, si bien el proceso de elección y diseño no es complejo en comparación con los grandes proyectos hidráulicos, este no será trivial, por lo que será necesario llevar a cabo un análisis de viabilidad para identificar la técnica más adecuada para un determinado sitio, lo que dependerá de las condiciones locales, así como de características como el clima, el tipo de suelo, la geología, la cobertura del suelo o la pendiente del terreno (Espinoza, 2022). También deberá de tenerse en consideración antes de su ejecución las posibles desventajas u obstáculos que puedan presentarse durante y después su implementación, así como los trabajos de mantenimiento que las acciones requerirán (Espinoza, 2022).

2.5 Casos de implementación de acciones adaptativas para la captación e infiltración de agua de lluvia

Casos internacionales

Un caso ejemplar en la implementación de acciones adaptativas para la infiltración de agua al subsuelo fuera de México se presentó en la cuenca del río Arvari en India, la cual para el año 1985 se encontraba ya en un estado de alta degradación debido al sobre bombeo de agua subterránea, la remoción de la vegetación natural y la erosión del suelo (Gale, 2005). Ante esta situación y agravados por una severa sequía, la ONG Tarun Bharat Sangh (TBS) afrontó el problema de vulnerabilidad hídrica iniciando un programa de captación de agua de lluvia mediante la construcción de estanques de

tierra con forma de media luna denominados *johad* para recolectar la escorrentía producida durante breves, pero intensas tormentas que se producían en el área (Figura 1). A partir de entonces, la implementación de acciones similares por un número creciente de comunidades en el ejercicio de captación resultó en que para el año 2005 más de setenta localidades ubicadas dentro de la cuenca estuvieran involucradas en el plan, construyendo miles de represas, así como otras estructuras para la captación de agua, dando como resultado un incremento de los niveles de agua subterránea, y permitiendo que desde el año 1995 el río Arvari tenga un caudal permanente (Gale, 2005).



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

Otro caso descrito por Gale (2005) acontece en el sur de España entre los meses de marzo y junio, cuando hay un excedente de agua disponible debido al deshielo. Durante estos meses, el agua de los ríos es desviada por medio de una extensa red de canales de riego hacia áreas bien definidas, altamente permeables (Figura 2). Debido a la actividad de recarga en el área, se han desarrollado dos tipos de manantiales: manantiales temporales, que emergen en los lugares en que se observa circulación de agua del subsuelo, los cuales son utilizados únicamente para riego, y manantiales perennes, mismos que suministran agua de calidad superior que los primeros y son utilizados para abastecer de agua potable a las aldeas. El mismo autor aclarara que el agua recuperada de los manantiales es solo una fracción del agua de recarga; ya que gran parte de ésta es utilizada para mantener la humedad del suelo pendiente abajo de los canales de riego, lo cual ha tenido un efecto duradero en el área, al permitir el establecimiento de vegetación densa. Por si fuera poco, el sistema no requiere de infraestructura sofisticada y se presume que es aplicable en diferentes partes del mundo.



Figura 2. Canales de riego en el sur de España. Recuperada de Barea (2018).

Un ejemplo en Sudamérica, concretamente en Brasil, surge a partir de la deforestación acelerada acontecida en el país durante las últimas cuatro décadas, situación que ha llevado a que se introduzcan cultivos y pastos sin los debidos cuidados respecto a la conservación del suelo y la reposición de nutrientes. Aunado al grave problema de deforestación, el crecimiento enérgico de estos pastos ha propiciado por otra parte, su adopción cada vez en mayor extensión por parte de productores de ganado; acelerando la compactación de los suelos, reduciendo las tasas de infiltración del agua de lluvia, y ocasionando escurrimientos superficiales violentos (Cordoal y De Alquino, 2009). Con la finalidad de revertir este cuadro, Embrapa Milho e Sorgo, una de las 43 unidades de la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa), desarrolló el *Proyecto Barraginhas* (Cordoal y De Alquino, 2009), un sistema de mini cuencas destinado a contener la esorrentía superficial generada durante los eventos intensos de lluvia (Figura 3), con los objetivos de contribuir a la recarga de agua subterránea, de abastecer los pozos y corrientes superficiales de la zona, y también de propiciar una agricultura de calidad y sin riesgos gracias al aumento de la humedad del suelo.



Figura 3. Sistema de *barraginhas*. Recuperada de Irrigat (2023).

De acuerdo con Cordoval y De Alquino (2009) las dimensiones de las *barraginhas* dependerán de distintos factores, pero tenderán a ser más grandes en suelos poco profundos y con capacidad media a baja de infiltración, por lo que bajo estas condiciones lo recomendable son 20 metros de diámetro y un volumen en el orden de los 300 m³. Por otro lado, en suelos porosos y profundos, las dimensiones serán ligeramente menores, con un diámetro de 15 m y un volumen de almacenamiento de entre 100 y 150 m³. Distintos sistemas de *barraginhas* ya han sido implementados en Brasil (Cordoval y De Alquino, 2009), por ejemplo, en el municipio de Sete Lagoas en Minas Gerais, 30 *barraginhas* construidas en un área de 70 hectáreas ha permitido el desarrollo de cultivos de maíz, frijoles y hortalizas, y además ha permitido mantener un flujo perenne en el río Paiol. Otro caso se da en el municipio de Minas Novas, también en Minas Gerais, donde la construcción de tres *barraginhas* ha permitido abastecer de agua a más de 20 familias, las cuales ya no dependen más de pipas de agua. Un tercer ejemplo se presenta en el municipio de João Costa, donde un sistema de *barraginhas* ha logrado contener el avance en la degradación del suelo y también ha favorecido la recarga del acuífero y garantizado más seguridad en la agricultura de la zona.

Por último, se presenta el caso de la construcción de zanjas de infiltración para recarga hídrica en la provincia de Bolognesi, Perú (Arana, 2021), una región en la que en tiempos de estiaje se ve gravemente amenazada la disponibilidad del recurso hídrico para sus habitantes. Las zanjas de infiltración son canales sin desnivel construidos en laderas de forma manual o mecanizada, los cuales tiene por objetivo captar el agua que escurre, evitando procesos erosivos de manto, y permitiendo la infiltración del agua en el suelo (Pizarro et al., 2004). En el caso del distrito Huayllacayan en la provincia de Bolognesi, el Estado Peruano a través de la Unidad ejecutora “Fondo Sierra Azul” dependiente del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, llevó a cabo la

construcción de 19,000 m de zanjas de infiltración en la localidad de Shulluqocha con el objetivo de implementar actividades de siembra y cosecha de agua de lluvia, abarcando un total de 57 hectáreas de laderas (Figura 4).



Figura 4. Zanja de infiltración en la provincia de Bolognesi, Perú. Recuperada de Arana (2021).

Para este proyecto en concreto, el espaciamiento promedio entre zanjas considerando la pendiente del terreno fue de 14 m, así mismo las dimensiones de las zanjas fue de 40 cm de ancho de base, 50 cm de borde superior, y 30 cm de altura efectiva, con un espaciamiento entre tabiques a lo largo de cada zanja variando entre 10 y 20 m. De acuerdo con estimaciones llevadas a cabo (Arana, 2021), el volumen de infiltración anual que aportarían las zanjas de infiltración construidas en la localidad de Shulluqocha es de aproximadamente 131,210.8 m³, lo que también permitirá alimentar distintos aprovechamientos de agua en la zona.

Casos en México

A nivel nacional, un ejemplo de éxito es el proyecto piloto en la zona de Ojos del Chuvíscar en el estado de Chihuahua (Silva-Hidalgo, 2017) (Figura 5). Este proyecto se comienza a gestar a mediados de los años noventa ante la preocupación derivada de los resultados de distintos estudios hidrogeológicos realizados en el estado, los cuales evidenciaban un aprovechamiento de agua subterránea muy superior a las estimaciones de recarga. A partir de dichos resultados, autoridades y expertos consideraron la pertinencia de optar por la implementación de alguna técnica MAR como alternativa para la mitigación en el abatimiento de los niveles freáticos en algunos de los acuíferos sobreexplotados del estado de Chihuahua. Para el diseño del

proyecto se definió que el origen del agua de recarga serían los escurrimientos torrenciales derivados de tormentas de gran intensidad, las cuales generan flujos abundantes durante periodos de tiempo relativamente cortos.

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 a la ciudad de Chihuahua, además de que la zona presenta condiciones naturales favorables para la recarga. Como obra se optó por construir un sistema integrado por una cortina filtrante de 2 m de altura y 26 m de longitud sobre el río Chuvíscar, formada con un muro de gaviones en un sitio en el que aflora roca fracturada. 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 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 el punto de entrada de agua al pozo; para su limpieza y mantenimiento se instaló una tubería de desfogue entre la cortina y el medidor de flujo.

El costo total del proyecto para el 2004, año en que se concluyó su construcción y comenzó su operación, fue de \$450,000 MXN, 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. Como resultado de este proyecto, en el año 2017 tras 12 años ininterrumpidos de operación, el monitoreo de los niveles estáticos y dinámicos de tres pozos de observación (Ojos 6, Ojos 5 y Chuvíscar) demostró la estabilización del volumen de agua extraído anualmente sin mayores abatimientos en los pozos (Silva-Hidalgo et al., 2017).



Figura 5. Sistema de recarga hídrica implementado en el río Chuvíscar. Recuperada de Silva-Hidalgo (2017).

A nivel nacional otro proyecto ejemplar de implementación de obras adaptativas de infiltración hídrica fue el llevado a cabo por 16 comunidades autóctonas en la subcuenca del Valle de Ocotlán, Oaxaca, México (Ojeda-Olivares et al., 2017). Las cuales unieron esfuerzos para construir, desde el año 2005, obras que ayudaran a la recarga del acuífero y mismas que en su debido momento, no contaron con ningún tipo de asesoría técnica o científica. A partir del monitoreo y evaluación de efectividad de las obras iniciado en el año 2014 en estas comunidades por Ojeda-Olivares et al. (2017) del Centro Interdisciplinario de Investigación Para el Desarrollo Integral Regional Unidad CIIDIR-Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional) se 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 6).

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; el segundo tipo son pozos 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 están contruidos 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, y, por último; las ollas captadoras de lluvia, con 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.



Figura 6. Obras de recarga hídrica construidas por comunidades autóctonas en la subcuenca del Valle de Ocotlán, Oaxaca, México. Arriba izquierda: pozo de absorción circular con reja, arriba derecha:

pozo de absorción cuadrado construido con tabiques, abajo derecha: olla captadora de agua, abajo izquierda: presa construida sobre río. Recuperadas de Ojeda-Olivares et al. (2017).

Los materiales y equipos de construcción fueron aportados por las presidencias municipales de cada una de las comunidades, mientras que la fuerza de trabajo fue asumida por los propios habitantes. Los costos de construcción estimados para cada tipo de obra, de acuerdo con la cotización promedio del dólar para el año 2014, fueron de \$515.80 USD (\$6,860.14 MXN) para cada pozo de absorción circular, \$1,564.00 USD (\$20,801.20 MXN) para cada pozo cuadrado construido con tabiques, \$7,800.00 USD (\$103,740.00 MXN) para las ollas captadoras de lluvia más grandes, \$360.00 USD (\$4,788.00 MXN) para las ollas captadoras pequeñas, y \$5,937.60 USD (78,979.08 MXN) para cada presa construida sobre ríos y arroyos; siendo el 48 % del costo cubierto por las comunidades y el resto por apoyos del gobierno. A partir del estudio realizado por Ojeda-Olivares et al. (2017) para evaluar la efectividad de las obras de recarga, se concluyó que, debido a que su implementación era relativamente reciente, aún no era posible determinar su impacto mediante mediciones piezométricas. Por ello, los autores recurrieron a un balance hídrico, a partir del cual estimaron que, si bien el volumen de agua aportado por estas obras a la recarga es marginal en comparación con el volumen de extracción concesionado por la CONAGUA, la impresión local de una mayor disponibilidad de agua en temporadas de sequía ha motivado la construcción de más obras por parte de los habitantes y las autoridades, así como la adopción de medidas para el buen uso y la protección del recurso hídrico, lo cual a mediano y largo plazo puede brindar un impacto mayor.

Un ejemplo de la implementación de acciones destinadas a recargar agua en zonas urbanas se puede observar en la ciudad de San Luis Potosí (Briseño-Ruiz, 2017). En este caso, se identificó una explotación intensiva del acuífero del Valle de San Luis Potosí (SLP), por lo que motivados por esta situación y la oportunidad de aprovechar la abundante agua de lluvia proveniente de la Sierra San Miguelito debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos, distintas autoridades consideraron pertinente la construcción de un sistema de recarga compuesto por un colector, denominado “Salk”, y un área de captación localizada en un antiguo banco de materiales, esto con el objetivo principal de facilitar la infiltración del agua de lluvia en el acuífero. El proceso de recarga al acuífero comienza con la captación de los escurrimientos de las aguas de tormenta generados en la cuenca a través de alcantarillas pluviales construidas sobre la avenida Salk (Figura 7), las cuales permiten la entrada de los escurrimientos mientras retienen los sólidos y los desechos mayores de una pulgada. El colector Salk tiene una longitud de 1,386 m y está construido en sus primeros 220 m con tubería de concreto de 1.52 m de diámetro, mientras que los

restantes 1,166 m tienen una tubería de 2.50 m de diámetro con una pendiente general del conducto de 0.0015.



Figura 7. Arriba: Alcantarillas pluviales construidas sobre la avenida Salk. Abajo: Área de captación y recarga en un banco de material en desuso. Recuperadas de Briseño-Ruiz (2017).

Lo que respecta a la zona de almacenamiento e infiltración del agua pluvial captada por el colector Salk, esta se encuentra en un banco de materiales fuera de uso, con capacidad de 1,140,000 m³. Por aclaración de los propios autores se detalla que debido a que en el año en que se construyó el sistema (2006) aún no había una normatividad que definiera la calidad del agua de recarga de acuíferos, únicamente se tomó en consideración que el agua de tormenta a infiltrar al acuífero tuviera una calidad similar a la que se extraía con fines de abastecimiento de agua potable. Los resultados de la construcción y puesta en funcionamiento del colector Salk han estimado que mediante una inversión aproximada de \$30,000,000 MXN se ha logrado llevar a cabo tanto la recarga artificial del acuífero del Valle de SLP con agua de tormentas, como controlar las inundaciones en la parte suroeste de la ciudad (Briseño-Ruiz, 2017).

Otro caso ejemplar en la implementación de acciones adaptativas de captación, recarga y almacenamiento de agua de lluvia bajo un enfoque birregional, participativo e interdisciplinario, se da en la región Mixteca, ubicada en los estados de Puebla, Oaxaca y Guerrero; región con escasa y mal distribuida precipitación pluvial que ha contribuido a una importante escasez física del recurso para sus habitantes, y para la cual, las soluciones tecnológicas convencionales como pozos profundos de extracción representan importantes limitantes de carácter geológico, ecológico y económico

(Toledo y Solís, 2001). Bajo esta problemática surgió en el año de 1980 un proyecto conocido actualmente como “Agua para Siempre”, impulsado inicialmente por la Central de Servicios para el Desarrollo de Tehuacán, A.C (CEDETAC), y posteriormente fortalecido y expandido por la organización civil Alternativas y Procesos de Participación Social, A.C. (Alternativas), contando además con importantes apoyos tanto de agencias del gobierno de México (Toledo y Solís, 2001) como de organizaciones y fundaciones privadas e institucionales, nacionales e internacionales, entre las que destacan la fundaciones Ford, Interamericana, Cante, Basiliiana, Rotaria y los clubes rotarios de Loveland, Tehuacán y Tehuacán Manantiales (Hernández y Herrerías, 2024).

La propuesta de solución al problema hídrico consistía en la construcción de un sistema que combinara de forma adecuada obras de regeneración de cuencas para retención de agua y recarga de acuíferos; revegetación de laderas y cauces de barrancas; optimización del uso del agua obtenida; y tratamiento adecuado y reutilización de las aguas residuales para evitar contaminación (Hernández y Herrerías, 2004). Siguiendo estos objetivos, como obras de retención en los cerros se implementaron zanjas trincheras, anillos de captación y reforestación; para el aprovechamiento en las lomas se optó por la construcción de bordos, jagüeyes, terrazas a nivel (Figura 8), así como la recuperación de la cobertura vegetal mediante el recubrimiento de los suelos con pastos y plantas de la región; para la regeneración en las barrancas se construyeron represas filtrantes con piedra acomodada y represas filtrantes de gaviones; como alternativas para la extracción de agua se construyeron obras de captación en los manantiales, así como galerías filtrantes y pozos someros a escasos metros de la barranca, esto para obtener agua limpia previamente filtrada a través de las paredes de la fuente de la que proviene la misma; finalmente se implementaron obras de conducción de agua y de almacenamiento, como pequeñas represas montaña abajo, cuya vida útil es prolongada gracias a la disminución de la deposición de azolve gracias al resto de obras que componen el sistema (Hernández y Herrerías, 2024).



Figura 8. Jagüey para captación e infiltración de agua pluvial construido como parte del proyecto “Agua para Siempre”. Recuperada de Méndez (2019).

De acuerdo con información obtenida por CNN Español (2021), desde el inicio del proyecto se han realizado 11,600 obras, con las que se han beneficiado a 275,000 personas, principalmente con el abastecimiento de agua para el consumo humano, así como con el aporte de los excedentes para cultivar pequeñas parcelas (CNN Español, 2021), pero también con más beneficios como abrevaderos para el ganado; riego de auxilio; recarga de mantos acuíferos; revitalización de manantiales y pozos; regeneración ecológica; mantenimiento de la vida silvestre; y mejora en general de la calidad de vida de la población (Alternativas, 2024). La experiencia del proyecto “Agua para Siempre” resulta particularmente interesante al ser una iniciativa que fundamenta su modelo de gestión hídrica en la recuperación de conocimientos y tecnologías ancestrales de conservación y aprovechamiento de suelos, agua y vegetación propias de la región que se busca atender; y su combinación al mismo tiempo con herramientas modernas, como el procesamiento digital de información satelital; apostándose así por la restauración integral del equilibrio de los ecosistemas regionales los cuales son representados por un sistema de cuencas.

Casos en el estado de Guanajuato

A nivel estatal distintas acciones encaminadas a la captación y recarga hídrica han sido implementadas, como parte sobre todo de los programas estatales “Mi Cuenca Sustentable” y “Captemos Agua”. Dentro de los proyectos del programa “Mi Cuenca Sustentable” destaca la construcción en el año 2021 de un bordo de terraplén y una presa de mampostería para la captación de agua en la comunidad de San Antonio de

San Isidro en el municipio de San Luis de la Paz, los cuales fueron implementados en coordinación con la Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural (SDAyR), la cual aportó \$2,977,650 MXN de los \$4,511,099 MXN necesarios para la realización del proyecto (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2024); de manera similar, se ha construido en el año 2020 un bordo de cortinillas en tierra compactadas con capacidad de 42,000 m³ en la comunidad de Mesa Alta, en el municipio de Victoria (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2024).

Como parte del programa “Captemos Agua”, distintas acciones han sido presentadas en boletines del gobierno del estado de Guanajuato (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2024). Algunos ejemplos han sido la construcción en el año 2020 de ocho bordos de terraplén en las comunidades de Aldama, La Tapona, Llanitos y El Cantón, en el municipio de Atarjea (Figura 9), con una inversión de \$600,000 MXN, con aportación entre la SDAyR y los beneficiarios, o la implementación de 25 bordos en el municipio de Abasolo.



Figura 9. Bordo para captación e infiltración hídrica construido en el municipio de Atarjea como parte del programa “Captemos Agua”. Recuperada de Gobierno del Estado de Guanajuato (2024).

En el año 2020 se inició la implementación de más acciones de bordería en las comunidades El Varal, Monte Prieto, El Picacho, Cuesta de Peñotes y Milpa Blanca, en el municipio de Tierra Blanca; en la comunidades El Carrizo, Llano Grande, La Esperanza, Los Fierros, El Acebuche, La Noria, Minillas, La Cañada y San Nicolás de la Condesa, en el municipio de Tarimoro (Figura 10); las comunidades de La Venta del Sur, El Lindero, Loma Bonita, Salto de León, La Vivorilla y Sauz de Cebolletas, en el municipio de Coroneo; en las comunidades Vallecillo, El Fresno, La Esquina, Puruagua, La Sabina, Ojo de Agua de Mendoza, El Chilarillo, San Lucas, San Pedro de los

Agustinos y Santa María, en el municipio de Jerécuaro; en las comunidades El Patolito, El Zorrillo, La Alameda, El Chupadero, La Cinta, Miranda, Ojo de Agua, Puerto de la Ceniza y Buenavistilla, en el municipio de Iturbide; en la comunidades de El Salto de Abajo, Sauz de Armenta, Arroyo Seco, El Jaralillo, Jalapa, Maravillas, El Nacimiento y San Lorenzo del Lobo, en el municipio de San Francisco del Rincón; o en las comunidades de Santiaguillo, La Merced, San José de las Pilas, Cutaro, Moncloa, Tocuaro, Santa Clara, San Juan Jaripeo, San Pablo Pejo, Parcialidad de Irámuco y El Moral, en el municipio de Acámbaro (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2024).



Figura 10. Bordo para captación e infiltración hídrica construido en el municipio de Tarimoro como parte del programa “Captemos Agua”. Recuperada de Gobierno del Estado de Guanajuato (2024).

En lo que respecta al municipio de León, este programa de bordería se ha implementado también en la comunidades de El Huizache, Mesa de Ibarrilla y Rincón Grande (Ayuntamiento de León, 2022). Cabe decir que el impacto hidrológico o social por la implementación de estas acciones no se detalla en los boletines, estos debido a que al momento de la publicación de dichos boletines muchos de los bordos estaban en proceso de construcción o apenas habían sido concluidos, por lo que posiblemente no se contara aun con resultados sustanciales e indicadores del todo fiables.

2.6 Incertidumbre asociada a las acciones adaptativas de gestión hídrica

A partir de los casos presentados, se evidencia la preocupación de diversos actores involucrados en la gestión del recurso hídrico, que incluyen a usuarios del agua, académicos y tomadores de decisiones, por buscar alternativas sustentables de gestión del agua con el objetivo dual de reducir la sobreexplotación de los cuerpos de agua subterránea, que son la principal fuente de agua para gran parte de la población mundial, y de satisfacer la demanda de agua de la sociedad mediante prácticas de gestión sustentables y, sobre todo, resilientes frente a los cambios climáticos, sociales e institucionales. Resulta importante mencionar que, si bien en varios de los casos presentados se ha contado inclusive con apoyo económico por parte de las autoridades gubernamentales para el desarrollo de los proyectos, no se puede dejar de destacar que, tanto en estos casos como en otros documentados en la literatura, las acciones adaptativas de gestión hídrica continúan siendo implementadas de manera aislada y experimental; no formando parte integral de una política hídrica destinada a proteger y gestionar el recurso desde una perspectiva adaptativa, participativa e integral.

Esto puede ser atribuido, fundamentalmente a los distintos intereses entre los actores involucrados en la gestión del agua, sobre todo en un contexto de gestión privatizadora y mercantil que como ya se anticipaba, hasta hace pocos años prevaleció en gran parte de nuestro país, y que persiste en muchos otros lugares aún bajo el régimen neoliberal, lo que motiva el rechazo a la implementación a gran escala de estas alternativas sustentables; como también al argumento recurrente en contra de estas alternativas respaldado sistemáticamente por "expertos" del agua, el cual las acusa de ser acciones poco realistas en las que existe una alta incertidumbre sobre su viabilidad social, ambiental, hidrológica y técnica, con desafíos a resolver, como por ejemplo, la mejor ubicación para la implementación de estas tecnologías, o inclusive el tipo de tecnología más apropiada de acuerdo con las condiciones del área de estudio y las propias necesidades del lugar (Alam, Borthakur, Ravi, Gebremichael, y Mohanty, 2021); además, de cuestionar su utilidad real para resolver las necesidades hídricas de los lugares donde se implementan.

Es por esto por lo que se considera crucial fomentar el desarrollo de investigaciones orientadas a reducir estas incertidumbres y demostrar la eficacia de este tipo de acciones. Que, si bien ya han demostrado traer beneficios en los lugares donde se han implementado, lo que respalda su pertinencia y viabilidad, la falta de soporte

"técnico" para su instrumentación se ha convertido ya en una acusación reiterada en su contra, que si bien no es más que un argumento que encubre los intereses personales de los distintos usuarios, si es un obstáculo que limita la posibilidad de obtener el respaldo de las autoridades para impulsar este paradigma de gestión a una mayor escala.

Finalmente, es crucial destacar que, aunque esta investigación se ha enfocado en demostrar la pertinencia de implementar acciones sustentables y adaptativas de recarga hídrica a través de la presentación de diversos casos de aplicación, resulta fundamental reconocer que estas tecnologías son tan solo una parte de los elementos que conforman el paradigma de gestión adaptativa. Que como se ha definido previamente, es un enfoque que implica modificaciones sustanciales tanto en la infraestructura hidráulica como en los marcos regulatorios; de ello resulta la necesidad de lograr un compromiso tangible por parte de las autoridades, ya que serán ellas las responsables de incorporar estas prácticas dentro de la política pública de gestión hídrica, así como de llevar a cabo el seguimiento y acompañamiento durante todo el proceso de adopción, pues sin este, el impacto real y a gran escala que estas medidas tienen por ofrecer no será alcanzado. Se insiste en que resulta esencial que estas tecnologías se integren de manera efectiva en las políticas gubernamentales para garantizar un cambio significativo en la gestión del recurso hídrico.

2.7 Conclusión

Se han abordado diversos casos de aplicación de acciones adaptativas para la gestión sustentable del agua, focalizadas en la recarga de los acuíferos en México y otros países. A través de la exposición de estos ejemplos, se evidencia la pertinencia de adoptar una infraestructura de gestión hídrica milenaria, basada en intervenciones pequeñas, descentralizadas y de co-gestión social, las cuales han demostrado ser una fuente alternativa y viable de agua, generando diversos beneficios en las áreas donde se han implementado, sin incurrir en los efectos adversos asociados a las grandes obras hidráulicas. Aunque el impacto de estas acciones aún se circunscribe a un ámbito local y relativamente limitado, se postula que, mediante el avance de investigaciones destinadas a reducir las incertidumbres asociadas a estas estrategias, se podrá insistir en la búsqueda del respaldo institucional y económico necesario para

su implementación a mayor escala; pues se reitera el gran potencial que poseen estas acciones como fuente de agua de recarga, especialmente en aquellas regiones que experimentan desafíos significativos relacionados con el estrés hídrico y la sobreexplotación de acuíferos. En conclusión, la implementación de acciones adaptativas de gestión hídrica resurge como una alternativa prometedora y sustentable, destacando la necesidad de continuar con el desarrollo de investigación para consolidar su eficacia y promover su adopción a un nivel más amplio como respuesta a los desafíos asociados a la escasez de agua y la sobreexplotación de los recursos hídricos.

3. LA GESTIÓN DEL AGUA EN LA CIUDAD DE LEÓN

3.1 Introducción

Estudiar el desarrollo histórico del manejo del recurso hídrico en el sitio donde se esté contemplando la implementación de alguna acción de recarga hídrica resulta fundamental. Esto permite, por un lado, comprender la evolución del manejo del recurso, las transformaciones del territorio y las decisiones que han influido en la disponibilidad y calidad del agua; y, por otro, brinda una base sólida para orientar las estrategias con el objetivo de que estas respondan realmente a las condiciones y necesidades actuales del sistema hidrológico. Se considera esencial también reconocer las distintas instancias y órdenes de gobierno, así como los actores de la sociedad civil involucrados en la gestión del agua, pues su participación, coordinación y experiencia resultarán claves para el diseño, ejecución y sostenibilidad de cualquier iniciativa de recarga hídrica.

Relativo a lo anterior, el presente capítulo aborda cuatro ejes fundamentales que permiten conformar una visión general sobre los recursos hídricos en León y comprender las causas que han dado lugar al modelo de gestión actual, caracterizado por una orientación hacia el aumento de la oferta de agua y la construcción de grandes obras de infraestructura hidráulica. En primer lugar, se expone la situación actual de los recursos hídricos en la ciudad, analizando la demanda de agua según los diferentes usuarios, así como las principales fuentes de abastecimiento y los problemas asociados a la creciente presión ejercida sobre ellas; poniendo así en perspectiva los altos volúmenes de agua comprometidos en la ciudad, resultado de la combinación entre una creciente demanda poblacional y una intensa actividad industrial.

Posteriormente, con el objetivo de identificar las competencias, responsabilidades y posibles áreas de coordinación entre los distintos niveles de gobierno y sociedad civil, se describen las instancias encargadas de la administración hídrica de León, partiendo del nivel federal con la CONAGUA, continuando con organismos estatales como la

Secretaría del Agua y Medio Ambiente (SAMA) y el Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato (IPLANEG), y concluyendo con el ámbito municipal representado por SAPAL y el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) de León. A continuación, se presenta una síntesis histórica de la gestión del agua en León, que abarca desde finales del siglo XIX hasta la desaparición del COTAS de León en el año 2023, ofreciendo así una perspectiva sobre la evolución de las políticas hídricas locales, las transformaciones en los mecanismos de gobernanza y la manera en que se han configurado las prácticas de gestión que prevalecen en la actualidad.

Finalmente, se examina la crisis hídrica que afecta al municipio y las principales medidas que se han propuesto para hacer frente a esta problemática. Destacándose el megaproyecto de la presa y acueducto El Zapotillo, concebido desde hace más de dos décadas como la “gran” solución a la escasez de agua en la ciudad. Sin embargo, se discuten también enfoques más sostenibles, como la gestión adaptativa, la cual parece no haberse consolidado aun como eje rector dentro de la política hídrica de León. En conjunto, este capítulo busca ofrecer una comprensión amplia del contexto hídrico leonés, al tiempo que busca reflexionar sobre la posible transición hacia modelos de gestión más resilientes y acordes con los retos actuales de sostenibilidad.

3.2 Situación actual de los recursos hídricos en León

Geográficamente, el municipio de León, cuya superficie representa el 4.0 % de la superficie del estado de Guanajuato, se ubica en el centro del país dentro de la Región hidrológico-administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico, su corriente principal de agua superficial es el Río Turbio. El municipio colinda al norte con el estado de Jalisco y el municipio de San Felipe, al este con los municipios de San Felipe, Guanajuato y Silao, al sur con los municipios de Silao, Romita y San Francisco del Rincón y al oeste con los municipios de San Francisco del Rincón, Purísima del Rincón y el estado de Jalisco (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 1993).

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda del año 2020 (INEGI, 2024), el municipio de León contaba ya con 1,721,215 habitantes, convirtiéndose en el tercer municipio más poblado del país, solo por detrás de Tijuana e Iztapalapa (INEGI, 2024). Respecto a la actividad económica del estado de Guanajuato, esta se desarrolla en un total de 20 sectores, siendo algunos de los más importantes la industria

manufacturera, comercio, servicios inmobiliarios, construcción, transportes, correos y almacenamiento, servicios educativos, agropecuario, forestal y pesca (INEGI, 2016). Destaca que las ventas internacionales del municipio en 2023 alcanzaron los \$1,678 millones de dólares, siendo los principales productos exportados el calzado, las carretillas apiladoras, y partes y accesorios de vehículos automotores (Gobierno de México, 2024).

Para comprender la problemática que sufre la ciudad de León en materia hídrica resulta fundamental reconocer la relevancia de estos indicadores, pues en su conjunto, la ubicación estratégica del municipio de León dentro del territorio nacional, su rápido crecimiento poblacional por procesos de urbanización y metropolización, así como por su enérgica actividad económica dentro del Bajío guanajuatense han incidido inequívocamente en sus recursos hídricos, sobre todo en sus aguas subterráneas esto debido sobre todo a que el 99 % de las fuentes de abastecimiento de agua para la ciudad es de tipo subterránea, la cual se obtiene a través de 167 pozos (Ayuntamiento de León, 2022), localizados en su mayoría en el AVL en las baterías: Ciudad, Sur, Turbio, Oriente, Poniente I y II, y Muralla I y II (Ayuntamiento de León, 2021); mientras que solo el 1 % restante se obtiene superficialmente de la presa El Palote (Ayuntamiento de León, 2022) cuando las condiciones climáticas permiten su disponibilidad.

El agua potable es abastecida a la población a través de una red de conducción y distribución de 6,420 km (Ayuntamiento de León, 2021), la cual es administrada y operada por SAPAL (Ayuntamiento de León, 2021), organismo operador del municipio de León. Respecto a la cobertura de agua potable, esta cubre al 96.1 % de la población, mientras que el 3.9 % restante corresponde a asentamientos que, de acuerdo con las autoridades, no se ha podido dar la introducción del servicio debido a su condición irregular (Ayuntamiento de León, 2021). Por otra parte, destaca que en la zona rural del municipio el 11.4 % no dispone de agua entubada, mientras que poco menos del 5 % no dispone de drenaje, excusado o sanitario (Ayuntamiento de León, 2022). En referencia al saneamiento del agua, según datos proporcionados por el Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN, 2023), entre los años 2013 y 2019 en León se generaron un promedio de 53,871,316 m³ de agua residual por año, reportándose por parte del mismo organismo (IMPLAN, 2019) el tratamiento, en el año 2019, de 50,816,809 m³ de agua mediante 19 plantas de tratamiento de aguas residuales (aproximadamente el 94.33 % del volumen total de agua residual generada).

Atendiendo a los usos del agua, de acuerdo con datos proporcionados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) con fecha de corte el 31 de marzo del año 2024 (CONAGUA, 2024), en el municipio de León se tienen vigentes 1,290 títulos de

concesión para la explotación de aguas subterráneas (Tabla 1), y 102 títulos para la explotación de aguas superficiales (Tabla 2). El volumen total de agua subterránea concesionado alcanza los 159,388,718 m³ anuales, siendo la gran parte destinada a uso agrícola con 83,452,027 m³ (52.36 %) y uso público urbano con 65,118,301 m³ (40.86 %), con volúmenes menores destinados para uso industrial, diferentes usos, servicios, agroindustria, uso doméstico y pecuario. Respecto a las aguas superficiales, el volumen total concesionado es de 33,264,543 m³, asignándose 28,352,490 m³ (85.23 %) para uso agrícola, 4,454,097 m³ (13.39 %) para uso público urbano y 457,956 m³ (1.38 %) para diferentes usos. Mientras que la dotación promedio diaria de agua en León es de 129.5 litros por habitante (SAPAL, 2023).

Tabla 1. Concesiones de agua subterránea para el municipio de León de acuerdo con la base de datos del REPDA, con corte al 31 de marzo del 2024 (CONAGUA, 2024). Elaboración propia.

	Número de concesiones	Volumen de agua concesionado (m ³ /año)	Porcentaje del total (%)
Agrícola	919	83,452,027.64	52.36
Público urbano	173	65,118,301.01	40.86
Industrial	45	4,628,906.66	2.90
Diferentes usos	63	3,481,244.15	2.18
Servicios	69	2,634,308.25	1.65
Agroindustrial	1	31,000.00	0.02
Doméstico	18	30,761.00	0.02
Pecuario	2	12,170.00	0.01
TOTAL	1290	159,388,718.71	100.00

Tabla 2. Concesiones de agua superficial para el municipio de León de acuerdo con la base de datos del REPDA, con corte al 31 de marzo del 2024 (CONAGUA, 2024). Elaboración propia.

	Número de concesiones	Volumen de agua concesionado (m ³ /año)	Porcentaje del total (%)
Agrícola	33	28,352,490.00	85.23
Público urbano	64	4,454,097.85	13.39
Diferentes usos	5	457,956.00	1.38
TOTAL	102	33,264,543.85	100.00

De acuerdo con SAPAL (2023), en el caso concreto del AVL los usos del agua se encuentran destinados a uso agrícola (59.85 %), urbano (35.84 %), industrial (2.61 %) y usos múltiples (1.70 %). Resulta fundamental destacar que, como consecuencia de

esta importante dependencia de aguas subterráneas, por parte de la ciudad de León y sus zonas conurbadas, el AVL se ha visto orillado a una fuerte sobreexplotación, presentándose para el primer semestre del año 2021, un abatimiento que alcanzaba ya los 1.5 m anuales (Ayuntamiento de León, 2022). Por otra parte, a partir del estudio de las actualizaciones periódicas en la disponibilidad media del AVL realizadas por la CONAGUA, se observa un largo antecedente de sobreexplotación para dicho acuífero, muestra de ello es que en el año 2015 alcanzó un déficit de 177,673,448 m³ anuales (CONAGUA, 2015), el cual disminuyó en el año 2020 a una cifra de 51,876,000 m³ anuales (CONAGUA, 2020) atribuido en gran medida a la disminución de los volúmenes de agua concesionados, para aumentar nuevamente en 2023 y 2024 hasta los 61,638,096 m³ anuales (CONAGUA, 2023, 2024), incremento que coincide prácticamente con el aumento en el volumen de agua concesionado, el cual pasó de 176,376,100 m³ (CONAGUA, 2020) a 186,138,096 m³ (CONAGUA, 2023), mientras que la recarga total media anual se mantuvo en un valor 124,500,000 m³ (CONAGUA 2020, 2023).

De acuerdo con lo establecido en la actualización de la disponibilidad media anual de agua en el AVL emitido por la CONAGUA (2023), administrativamente, el acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VII “Lerma-Santiago-Pacífico”, al consejo Cuenca Lerma-Chapala, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guanajuato. Su territorio se encuentra totalmente vedado (CONAGUA, 2023) y sujeto a las disposiciones de tres decretos de veda establecidos en los años 1948, 1958 y 1983. En la mayor parte del acuífero se mantiene vigente un decreto de veda de tipo I, el cual establece que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente los mantos acuíferos; en la porción norte, oriental y en una pequeña área del extremo suroccidental rige una decreto de veda de tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos solo permite extracciones para usos domésticos; y finalmente en el extremo suroriental está vigente una veda de tipo III, en la que la capacidad de los acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros (CONAGUA, 2023). Así mismo, dentro del territorio del AVL no se localiza distrito o unidad de riego alguna, siendo sus usuarios organizados y constituidos por el ahora extinto COTAS de León, uno de los 89 Comités Técnicos de Aguas Subterráneas establecidos en México (CONAGUA, 2024).

3.3 La administración hídrica en León

Partiendo del esquema de gestión hídrica que rige a nivel federal, se debe comenzar por destacar la función que desempeña la CONAGUA; órgano administrativo, normativo, técnico, consultivo y desconcentrado de la SEMARNAT, creado en el año de 1989. Desde la promulgación en el año de 1992 de la Ley de Aguas Nacionales (documento en el que se plantea la gestión del agua a nivel nacional) recientemente reformada en el año 2023, se estableció la relevancia y el rol protagónico y exclusivo de la CONAGUA en la explotación, uso, aprovechamiento, distribución y control de las aguas nacionales, como lo sería la expedición de títulos de concesión, asignación y permisos de descarga o la designación de zonas de veda y reserva.

Prueba de ello se encuentra aún en el Artículo 9, Fracción I, de la mencionada Ley, el cual establece que una de las atribuciones de la CONAGUA es la de “Fungir como la Autoridad en materia de la cantidad y de la calidad de las aguas y su gestión en el territorio nacional y ejercer en consecuencia aquellas atribuciones que conforme a la presente Ley corresponden a la autoridad en materia hídrica, dentro del ámbito de la competencia federal, con apego a la descentralización del sector agua, excepto las que debe ejercer directamente el Ejecutivo Federal o la “Secretaría” y las que estén bajo la responsabilidad de los Gobiernos de los estados, del Distrito Federal o municipios” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2023). Esto último dictando que, sin renunciar del todo a su intención más bien centralizadora, se reconoce que para llevar a cabo las atribuciones que le han sido conferidas, la CONAGUA deberá de trabajar en conjunto con diversas instancias en el ámbito federal, estatal y municipal, asociaciones de usuarios y empresas, instituciones del sector privado y social, así como con organizaciones internacionales (CONAGUA, 2024); aunque manteniéndose como el principal y más importante organismo responsable de la gestión de los recursos hídricos del país.

A nivel estatal, de acuerdo con lo establecido en los artículos 16, 17, 17 bis, 17 bis 1, 19, 29 y 30 del Código Territorial para el Estado y los Municipios de Guanajuato (Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato, 2019), las entidades operativas y ejecutoras responsables de conducir, instrumentar o dar seguimiento a las políticas, lineamientos, directrices, estrategias, proyectos y acciones derivadas del Programa Estatal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Guanajuato (PEDUOET) son: el Titular del Poder Ejecutivo, la Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Ecológico Territorial (SMAOT), la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG); estas dos últimas unificadas como Secretaría del Agua y Medio Ambiente (SAMA) desde el año 2024, el IPLANEG, y la

Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato (PAOT). Esto se advierte además en la estructura orgánica de la administración estatal de Guanajuato incluida en el Programa de Gobierno 2018-2024 (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2019), la cual declara que las entidades designadas para atender el eje de desarrollo ordenado y sostenible son: la Secretaría de Infraestructura, Conectividad y Movilidad, y el SMAOT, la cual incluye a su vez dentro de su estructura orgánica, a la PAOT y a la CEAG. Así pues, respecto a la gestión hídrica a nivel estatal, ésta corresponde fundamentalmente al SMAOT a través de la Comisión Estatal del Agua, organismo que dentro de sus facultades incluye expresamente, promover el uso y manejo eficiente del agua en el estado de Guanajuato en coordinación con las autoridades, academia y sociedad (Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, 2024).

Por otro lado, relativo a las protección en particular de las aguas subterráneas y zonas de recarga en el estado, resulta preciso destacar que en el Código Territorial para el Estado y los Municipios de Guanajuato se ha declarado que también corresponde al SMAOT establecer en el PEDUOET las directrices relativas al ordenamiento de los espacios y sistemas naturales, para la identificación, declaración y administración de áreas naturales protegidas, zonas de restauración y zonas de recarga de acuíferos (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2023), así como el establecimiento de las atribuciones para que los Ayuntamientos determinen las medidas necesarias para proteger las zonas de recarga de mantos acuíferos y expedir las declaratorias respectivas. Por otra parte, se confiere a la Comisión Estatal del Agua las atribuciones para gestionar ante los Ayuntamientos, que los reglamentos y programas establezcan las medidas necesarias para proteger las zonas de recarga de acuíferos (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2023).

Respecto a los responsables de la gestión del agua a nivel municipal, de acuerdo con el artículo 115 constitucional, la responsabilidad de prestar los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento corresponde a los municipios, sujetos a la observancia de leyes tanto federales como estatales (CONAGUA, 2024). Por lo tanto, se faculta a los organismos operadores, en este caso, a SAPAL, como el encargado de administrar y mantener la infraestructura hidráulica, así como de brindar los servicios de agua potable, saneamiento y aprovechamiento del agua tratada a la población del municipio de León (SAPAL, 2024). Cabe decir que, además del papel fundamental que ocupa SAPAL y SAPAL-Rural dentro del modelo de gestión hídrica en el municipio de León, otra entidad relevante en la gestión del recurso a nivel municipal es la Dirección General de Medio Ambiente, dependencia a la cual se le ha conferido la responsabilidad de instrumentar el proyecto “Agua para todos”, la cual tiene entre sus acciones: incrementar la disponibilidad de agua para todos los leoneses aprovechando las fuentes disponibles y otras alternativas; implementar acciones y

apoyos para la captación de agua de lluvia en comunidades; realizar obras de infraestructura hidráulica en zonas rurales; o la incorporación de comunidades rurales prioritarias y con disponibilidad social al Sistema Operativo de SAPAL para la dotación del Servicio de Agua Potable y Drenaje Sanitario (Ayuntamiento de León, 2022), siendo el IMPLAN el responsable de su seguimiento.

Además de estas instituciones, con el objetivo de establecer la coordinación y trabajo entre sociedad y gobierno en materia de gestión hídrica se han establecido los denominados COTAS, los cuales representan un importante instrumento social promotor de la gestión del agua, concertando acciones entre los usuarios, para buscar el uso eficiente del recurso y su preservación en cantidad y calidad (Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, 2024). En el estado de Guanajuato se han constituido hasta el día de hoy catorce COTAS (CEAG, 2024), siendo el Consejo Técnico de Aguas de León, A.C., hasta el momento de su desaparición, el responsable de la representación de los usuarios del agua para la región comprendida por el AVL. No obstante, hasta la fecha no se ha definido con claridad un mecanismo o figura institucional que sustituya las funciones que desempeñaba dicho organismo, particularmente en lo relativo a la representación de usuarios, la coordinación entre actores y la promoción de acciones para la gestión sustentable del recurso hídrico.

3.4 Resumen histórico de la gestión del agua en la ciudad de León

De acuerdo con la descripción histórica de la gestión del agua en León desarrollada por Caldera y Tagle (2015), hasta prácticamente finales del siglo XIX la ciudad de León se abastecía principalmente por un gran manantial (ojo de agua) que se situaba en un extremo del actual parque Hidalgo, y el cual era empleado entre otros usos para el riego de huertas y el lavado y curtido de pieles. No sería hasta el año de 1887 que se perforaría el primer pozo en León ubicado en el Barrio Arriba, y el cual fue construido sobre todo para satisfacer las necesidades y demandas de la industria curtidora; comenzando desde ese momento con la intensificación en la perforación de pozos cada vez más profundos con maquinaria moderna a través de empresas como la de Juan José Guerra, Enrique Ulibarri y Alfonso Martínez, quedando de manifiesto la priorización que tendría el sector productivo en materia de agua potable y saneamiento (Caldera y Tagle, 2015) y convirtiéndose el agua subterránea desde

entonces, como la fuente principal de abastecimiento en el municipio (Hernández, 2018). Pocos años después otro evento importante aconteció en cuanto a la gestión del agua, pues desde el año de 1902 el Ayuntamiento de León había gestionado recursos con el gobierno estatal para construir la presa de Los Castillos (Caldera y Tagle, 2015), conocida actualmente como la presa El Palote, y la cual hasta el día de hoy continúa siendo la fuente principal de agua superficial para la ciudad de León, aunque aportando exclusivamente el 1 % del volumen requerido por la ciudad (Ayuntamiento de León, 2022).

Pasando a la primera mitad del siglo XX, desde la década de los años veinte hasta la segunda mitad de la década de los cuarenta, el servicio de agua potable de la ciudad había sido suministrado a través de una dependencia de la administración municipal llamada “Ramos de Aguas Municipales”, momento en el que la centralización desde el ámbito nacional creó las Juntas Federales de Agua Potable y Alcantarillado. Resulta relevante mencionar que si bien en abril de 1964 se publicó el decreto número 181 en el que se creaba una Junta Estatal como un organismo descentralizado encargado de las obras, redes y sistemas de las poblaciones que hasta entonces eran administradas por las Juntas Federales, o incluso algunos comités municipales, la única excepción que quedó a cargo del gobierno federal fue precisamente la del municipio de León, posiblemente por la complejidad que ya tenía el sistema de servicio para ese momento (Caldera y Tagle, 2015). Respecto a los orígenes de SAPAL, estos se encuentran en la publicación en febrero de 1968 del decreto número 362 que expide la Ley para el Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado del Medio Rural del Estado de Guanajuato, el cual culminó en el año de 1982 con la creación de una comisión mixta estatal-municipal en León con carácter provisional, para que después de la reforma federal se trasladara finalmente la función a un organismo totalmente municipal; naciendo así SAPAL en el año de 1984 (Caldera y Tagle, 2015).

Finalmente, relativo a las instituciones del agua en León, una comparable en importancia a SAPAL es el COTAS de León, de quien los autores Caldera y Tagle (2015) también brindan un importante repaso histórico. Esta institución surge en el año de 1998 como iniciativa del gobierno estatal para instaurar en León, al igual que ya se había hecho en el año 1997 en Laguna Seca y Celaya, una política hídrica basada en el principio de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), fundamentada en los principios de manejo de cuencas y participación social. En el Consejo Directivo del COTAS se integran a representantes de los principales usos del acuífero: agrícola, comercios y servicios, público urbano e industrial; mientras que la Asamblea General está compuesta por todos los propietarios de pozos dentro del acuífero, a quienes se les convoca cada tres años para elegir al Consejo Directivo, conformado por un presidente (quien es el que lleva la representación del COTAS ante el Consejo Estatal

Hidráulico), un secretario y un tesorero (Caldera y Tagle, 2015). De acuerdo con los mismos autores, si bien el COTAS de León logró congregarse en un mismo espacio a los principales usuarios de agua del AVL, los acuerdos efectivos para bajar la presión sobre el acuífero han estado más bien ausentes y estos mecanismos no han logrado efectividad para superar la crisis local del agua. Respecto a su situación actual, se sabe que, a consecuencia de recortes presupuestales, el COTAS de León ha cesado ya operaciones; iniciando por una “degradación” a funciones de consultoría, el que se le impidió el recurso para continuar con distintos proyectos, entre los que se incluían acciones para retención de agua y la recarga de los mantos acuíferos (Jiménez, 2023)

3.5 La crisis del agua en León y la búsqueda de alternativas para el abastecimiento de la ciudad – El caso de El Zapotillo

La idea de “crisis del agua” en el municipio de León surge hacia finales de la década de los ochenta, estructurándose a partir de la contaminación, tanto de las aguas subterráneas como superficiales, producto principalmente de los desechos de la industria curtidora y de la evidente sobreexplotación del AVL, lo que ya generaba en aquellos años que solo el 70 % de la red de suministro fuera regular (Caldera y Tagle, 2015). Esta situación hacía evidente que el AVL era insuficiente para dotar de agua a la población y la industria de la ciudad, y resultaba inminente la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento. Esto motivó en el año de 1990 que las autoridades de SAPAL decidieran buscar por primera vez traer agua fuera de la subcuenca, por lo que ese mismo año se toma la primera acción; sentando con ello las bases de la estrategia de gestión hídrica que adoptará desde entonces la ciudad; SAPAL adquiere derechos de extracción del acuífero La Muralla, en el municipio de Romita, y construye un acueducto con 19 pozos que aportarían 60 litros por segundo al municipio de León y que sería finalizado en 1992 (Hernández, 2018). Sin embargo, el proyecto no concluiría ahí, una década después, en el año 2002, se decidió construir otra batería de pozos en el proyecto denominado Muralla II, el cual como ya se exponía en el Capítulo 2, agravó los conflictos sociales que se venían suscitando desde el proyecto Muralla I, principalmente por parte de la oposición de los habitantes de Romita por continuar cediendo agua subterránea a la ciudad de León, llegando hasta al punto de realizarse una serie de modificaciones administrativas por parte de las autoridades para que se considerara el acuífero de Romita como parte del AVL y de esa manera se

continuara con su aprovechamiento por parte de la ciudad de León (Hernández, 2018).

Si bien, los proyectos de la Muralla I y Muralla II fueron y continúan siendo de suma relevancia para el abastecimiento de agua en León, y sentaron el modelo de gestión hídrica que imperará hasta el día de hoy, el interés real de SAPAL en su búsqueda de alternativas para el abastecimiento de la ciudad siempre fue el de traer agua desde la cuenca del Río Verde, proyecto que tardaría en materializarse desde que se contempló en el año de 1992, principalmente por dos razones (Caldera y Tagle, 2015): la primera, era el costo financiero que entonces ya se calculaba en \$3,500 millones de pesos, y para el cual no se encontraba una formula financiera entre el gobierno federal y los estados involucrados para reunirlos; y la segunda, la relación conflictiva entre Guanajuato y Jalisco en el contexto del Consejo de Cuenca Lerma-Chapala.

Dichos conflictos se verían resueltos en buena medida tras una negociación política celebrada en 1995 con el que se lograría el decreto presidencial a través del cual se determinaba un volumen de reserva de 119.8 hm³ del Río Verde, en el estado de Jalisco, para la dotación de uso doméstico y público-urbano a la ciudad de León (Caldera, Tagle, y Davison, 2020). A esto siguió la oficialización, mediante otro decreto publicado el 17 de noviembre de 1997 en el Diario Oficial de la Federación, del aprovechamiento integral del río Verde, el cual incluía la construcción de la presa de almacenamiento El Zapotillo, con una capacidad de 911 millones de metros cúbicos de agua (Peniche, García, y Martínez, 2023). Así, el proyecto El Zapotillo parecería materializarse finalmente en el año 2005 cuando se anunció su construcción, el cual se ubicaría en la cuenca del Río Verde en el estado de Jalisco, y tendría al inicio una cortina contemplada de 80 metros de altura capaz de retener el agua suficiente para abastecer a la ciudad de León (Hernández, 2018) mediante la construcción de un acueducto de 135 km de longitud que iría desde la planta de bombeo a 200 m aguas arriba de la cortina, hasta la planta potabilizadora localizada en León (Mendoza, Tagle, Mora, y Delgado, 2023).

Si bien, en esto consistía la propuesta original del proyecto El Zapotillo, dos años después, tras los reclamos de los habitantes de los Altos de Jalisco, se aprobó la modificación a la altura de la cortina de la presa de 80 a 105 metros, para abastecer también a la ciudad de Guadalajara y así tener un gasto firme de 3.3 m³/s para esta ciudad, 1.8 m³/s para la región de Los Altos y 3.8 m³/s para León (Casillas, 2023), modificación que no solo incrementaría la zona de inundación a 4,500 hectáreas, implicando la inundación de tres comunidades: Temacapulín, Acasico y Palmarejo, y el desplazamiento de 1500 personas, sino también, la afectación al medio ambiente a través de la pérdida de afluentes de agua, cambios en la producción agrícola y la

amenaza a la biodiversidad de la región (Hernández, 2018). Como era de esperarse, este tipo de propuestas de trasvases interestatales e intermunicipales presentan elementos que generan discordias, tensiones y contrapuntos entre diversos actores (Pacheco-Vega y Hernández, 2014), siendo a partir de esta modificación a la presa que los habitantes de Temacapulín manifestaron por primera vez su rechazo total al proyecto (Pacheco-Vega, 2017).

Como se ha mencionado, desde un inicio la oposición al proyecto fue intensa, ubicándose principalmente en los movimientos surgidos a partir de la resistencia de las comunidades afectadas por las inundaciones, así como de grupos sociales y redes de intelectuales de la ciudad de Guadalajara (Caldera, 2014), entre los que, algunos de ellos, también consideraban desde entonces que resultaba injusto que un proyecto de tal magnitud y naturaleza beneficiara a León en mayor medida que a Guadalajara (Pacheco-Vega y Hernández, 2014). No obstante, para el grupo gobernante del Bajío y el propio gobierno federal, la presa y acueducto El Zapotillo representaban una obra estratégica y prioritaria, a través de la cual se aseguraría “el crecimiento de la ciudad de León y la sustentabilidad de su acuífero”, a tal punto que la propia CONAGUA justificaría el proyecto bajo el argumento de la necesidad de cubrir el déficit actual de la zona y la demanda futura, expresando claramente la necesidad de sacar de operación los pozos de León para que su acuífero se pudiera recuperar (Caldera, 2014).

A pesar de la abrumadora defensa por parte de autoridades y empresarios leoneses del proyecto de la presa El Zapotillo (Caldera, 2014), en diciembre de 2008 y como consecuencia de la fuerte oposición en el incremento en la altura de la cortina, una sentencia de amparo limitó la construcción del muro más allá de los 80 metros de altura para así proteger a los habitantes de Temacapulín y Acasico (Casillas, 2023), iniciando formalmente la construcción de la presa y acueducto en el año 2009 (Peniche, García, y Martínez, 2023). Cuatro años más tarde, en el 2013, teniendo ya un avance del 54.6 % en la construcción de la presa (Pacheco-Vega, 2017) la Federación y los gobiernos estatales de Jalisco y Guanajuato enfrentaron un nuevo obstáculo, en esta ocasión la Segunda Sala de la Suprema Corte de Justicia de la Nación declaró inválido el convenio de entendimiento de 2007, lo que mantenía detenida la construcción, conclusión y operación de la presa, limitándose a llevar a cabo únicamente obras de mantenimiento (Tagle, Caldera, y Rodríguez, 2023). Distintos autores han descrito con profundidad la evolución del proyecto del Zapotillo durante los años siguientes (eg. Caldera, 2014; Caldera y Tagle, 2015; Pacheco-Vega, 2017; Hernández, 2018; Mendoza, Tagle, Mora, y Delgado, 2023; Peniche, García, y Martínez, 2023), donde queda patente que se mantuvo; al tiempo que continuaba la construcción del complejo hidráulico; un fuerte conflicto entre los opositores al

proyecto encabezados sobre todo por el Comité Salvemos Temacapulín, y los gobiernos estatales de Guanajuato y Jalisco, respaldados por la CONAGUA.

Tras más de 16 años de resistencia por los habitantes locales organizados, en lo que se denominaba ya un “conflicto intratable” (Pacheco-Vega y Hernández, 2014), en noviembre de 2021 la CONAGUA y el Gobierno Federal encabezado por el presidente de México, Andrés Manuel López Obrador, llegaron finalmente a un acuerdo con las comunidades afectadas para poner fin al largo conflicto, esto mediante el establecimiento del “Plan de justicia integral para los pueblos de Acasico, Palmarejo y Temacapulín”, en el que se estableció, entre otros puntos, que el nuevo nivel de la presa se limitaría a 42 metros; a pesar de que la cortina de la presa ya contaba con una altura de 80 metros, esto mediante la construcción de seis ventanas (Peniche, García, y Martínez, 2023) de 12 m de ancho y 9 m de alto que actuarían como vertederos (Godínez, Ochoa-García, Van Cauwenbergh, y Van der Zaag, 2023); además de dejar fuera de la derivación del agua de la cuenca del Río Verde al Estado de Guanajuato (Peniche, García, y Martínez, 2023).

Como era de esperarse, desde esta resolución se ha generado una fuerte incertidumbre en el estado de Guanajuato y concretamente la ciudad de León, pues de golpe se esfumaba un proyecto que desde hace más de dos décadas era calificado por las autoridades como un “proyecto de interés general”, planteándolo de manera tendenciosa como única opción viable para enfrentar el reto del agua en León (Tagle, Caldera, y Rodríguez, 2023), lo cual fue permeando fuertemente en el discurso y la opinión pública tanto de Guadalajara como de León (Pacheco-Vega y Hernández, 2014). Ya sea que para una representase la esperanza para superar su crisis del agua, mientras que para la otra una acción de trasvase a la que se oponían, la realidad es que la dotación de agua a León ha quedado anulada, por lo que ahora es poco claro como la ciudad resolverá sus problemas de abastecimiento de agua.

Si bien en el año 2021 León perdió la posibilidad de trasvasar agua del Zapotillo, cuenta con una concesión del Río Verde, por lo que una de las alternativas se ha planteado en comprobar si las cuencas cercanas a la ciudad de León tienen agua disponible suficiente para reemplazar el volumen de agua esperado del proyecto El Zapotillo (Godínez, Ochoa-García, Van Cauwenbergh, y Van der Zaag, 2023). Expertos en la materia, también han expresado que la solución para León podría encontrarse, al menos parcialmente, dentro del propio organismo operador SAPAL, mejorando su eficiencia física, y aumentando con ello su economía y volúmenes de agua disponibles para los usuarios de León (Mendoza, Tagle, Mora, y Delgado, 2023). Por su parte, personajes ligados a las asociaciones civiles que se oponen al proyecto continúan insistiendo en que la solución radica en la implementación de estrategias para la

reducción de la demanda dentro de la zona de influencia, es decir, el AVL (Caldera, 2014), de otra manera, se presume, la dotación de agua del Zapotillo no haría más que alentar la exportación de agua en productos regionales (Casillas, 2023).

Finalmente, otros autores han expuesto la viabilidad y pertinencia de optar por acciones locales de gestión del agua con gestión del territorio, como la promulgación de una educación hídrica basada en el ahorro, la aplicación de tarifas que sancionen el dispendio y favorezcan el ahorro de agua, la restauración de la cuenca, la captación de agua de lluvia, o el manejo eficiente en los usos agrícolas, industriales y comerciales, entre otras acciones locales (Tagle, Caldera, y Rodríguez, 2023). Sin embargo, a pesar de estas opciones, todo apunta a que la ciudad de León apostará nuevamente por los megaproyectos hidráulicos, como lo demuestra el avance en la construcción del Acueducto Solís-León, el cual tendrá una inversión de 15 mil millones de pesos y contemplará los municipios de Celaya, Irapuato, León, Silao, Villagrán, Tarimoro, Salamanca, Cortazar, Salvatierra y Acámbaro (Gobierno de Guanajuato, 2025).

Con todo esto, el caso del acueducto y presa El Zapotillo supone un ejemplo modélico del paradigma tradicional de gestión hídrica imperante en el bajío guanajuatense, fundamentado en la implementación de este megaproyecto hidráulico, el cual ha sido sigilosamente incorporado en la opinión pública leonesa mediante el eslogan oficial “El Zapotillo: agua para todos, agua para siempre”, nada menos que a manos del organismo operador SAPAL y la CEAG, como única opción viable para atender las necesidades hídricas (físicas) de la ciudad por los siguientes 25 años, descartando así cualquier posibilidad de rechazo al proyecto en el estado de Guanajuato (Tagle, 2023). Fue solo fruto de la intensa lucha de más de dos décadas entre los opositores del proyecto contra las elites económicas y autoridades responsables de la gestión del agua, así como la resolución de la misma en el año 2021, que se ha comenzado a visibilizar para la población en general las graves amenazas que conlleva el confiar como única solución a los problemas hídricos, a las acciones propias de este paradigma de gestión del agua estático y centralizado, el cual implica no solo desplazamientos forzosos o destrucción del patrimonio cultural e histórico de pueblos enteros, sino que genera también graves amenazas a la riqueza medioambiental de regiones enteras, poniendo en entredicho así la viabilidad y pertinencia de estos megaproyectos hidráulicos. Una investigación llevada a cabo en años recientes ha arrojado información reveladora que pone aún más en duda la validez de estas acciones como solución para la problemática hídrica en León: la escasez que padece la ciudad de León no es de tipo físico, sino que corresponde a una escasez socialmente construida por SAPAL, y la cual está asociada con su modelo de gestión, como su elevado nivel de fugas y el bajo nivel de aprovechamiento de agua saneada (Tagle,

2023); dejando claro que los problemas que padece la urbe en materia de gestión hídrica no corresponden con los factores institucionalmente mencionados por autoridades para justificar la pertinencia de la presa El Zapotillo (Tagle, 2023).

Como señala también Tagle (2023), el proyecto hidráulico El Zapotillo no se concibe para garantizar el derecho humano al agua ni a un medio ambiente sano en León; más bien, su objetivo central es ampliar el mercado, promoviendo la mercantilización del recurso como insumo para la demanda constante de los sectores inmobiliario, comercial e industrial asentados en la ciudad guanajuatense; y cuya construcción cabe añadir, y tal vez sea por esta naturaleza mercantil, se ha visto caracterizado por procesos poco transparentes en cuanto a su licitación, costos y características (Hernández, 2018), sumándose esto a su larga lista de repercusiones. Presentado este caso, así como algunas de las soluciones que se han propuesto para atender la problemática hídrica en León de cara a la resolución que la ha dejado fuera del proyecto El Zapotillo, ¿no cabría preguntarse la pertinencia de implementar acciones alternativas y descentralizadas para la captación, infiltración y recuperación de la fuente principal de agua de la ciudad? Para contestar a esa pregunta resultará apropiado explorar el desarrollo del modelo de gestión adaptativa del agua en la ciudad de León.

3.6 La gestión adaptativa del agua en la ciudad de León

La propuesta de un cambio de paradigma en la gestión del agua para León puede ubicarse a mediados de la década de los 90's del siglo pasado, cuando los reclamos y el discurso en contra del centralismo ejercido por la CONAGUA por parte de actores económicos y políticos locales de Guanajuato llevaron a la reestructuración interna de la entonces Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG); la cual buscaba por un lado su profesionalización, y por el otro, permitir el involucramiento de los usuarios en lo que se llamó “gestión social del agua en lo local”, en apego a los principios de la GIRH (Caldera, Tagle, y Davison, 2020), con consideraciones hasta entonces poco exploradas en el estado y el municipio de León, como que la gestión del agua debería de ser manejada a través de las cuencas hidrográficas (microcuencas y acuíferos) o la promoción de la participación tanto de autoridades como de usuarios en el ejercicio de gestión.

Como ya se mencionaba, un avance importante en materia de gestión adaptativa y GIRH en León, que se dio de manera paralela a la restructuración organizacional de la CEASG, fue la creación en el año de 1998 del COTAS de León. Respecto a estas organizaciones, debían estar integradas únicamente por usuarios con concesión, debían ser órganos de gestión local orientadas a la regulación, vigilancia y conservación del agua; y a diferencia de los Comités propuestos por CONAGUA, en los COTAS de Guanajuato ninguna autoridad gubernamental podría formar parte de sus órganos representativos ni de gobierno; estos tendrían la capacidad de llevar a cabo el manejo integrado de la aguas superficiales y subterráneas; y además, su función iría más allá de la simple consulta, integrando un Sistema Estatal de Planeación y Manejo del Agua a partir del cual se podría contribuir a la formulación de acciones y estrategias para estabilizar los acuíferos, así como con la propuesta de proyectos de infraestructura específicos (Caldera, Tagle, y Davison, 2020).

Si bien se ha dado prácticamente la desaparición del COTAS de León para el año 2023 (Jiménez, 2023), algunos de los proyectos llevados a cabo por esta asociación durante los años que estuvo en operación fue la construcción, mediante el financiamiento del SMAOT, de acciones de recarga y conservación de suelos como 625 tinas ciegas, 7 obras de cabeceo de cárcavas y 5 podas fitosanitarias en la comunidad de San José de Otates Sur, en el norte de la ciudad de León, o la construcción entre el año 2016 y 2018 de 17 sistemas de captación y potabilización de agua pluvial para consumo humano, con el objetivo de ayudar a las personas en zonas marginadas, de bajos recursos y situaciones de escasos de agua potable ubicadas en la Sierra de Lobos, concretamente en las comunidades de Mesa de Ibarra, Saucillo de Avalos, Sauz Seco, Media Luna, San José de Otates Sur, San José de Otates Norte, Mesa de Medina, Llano Grande y Los Bancos; beneficiando de manera directa a 53 viviendas y aproximadamente 183 personas con la captación y purificación de 170,000 litros de agua durante la duración del proyecto (Consejo Técnico de Aguas de León, A.C., 2018).

Si bien ya han transcurrido más de dos décadas desde la adopción, en teoría, de este paradigma en el diseño institucional en León, tal como mencionan Caldera, Tagle, y Davison (2020), los esquemas participativos y de GIRH han sido más bien limitativos tanto de la participación como del alcance en la descentralización en la toma de decisiones, no brindando la posibilidad de construir condiciones propicias para que los actores se comprometan con acciones radicales para frenar la sobreexplotación de los acuíferos. Con respecto a la ciudad de León, si ha ocurrido la descentralización del Estado en el espacio público, pero no precisamente a favor de la sociedad, sino básicamente de actores privado-mercantiles, hecho que se ve reflejado en los mismos esquemas participativos y de gestión integrada que se han intentado introducir (Caldera, 2014), como el modelo de GIRH, el cual es todavía limitado no solo por el

control centralizado que aún mantiene la CONAGUA y la CEAG, sino por lo ambiguo de la legislación nacional y estatal (Caldera, Tagle, y Davison , 2020).

En relación con lo anterior, un problema relevante radica en que los proyectos y programas de gestión de la demanda implementados en León han mostrado alcances limitados, debido a que solo han podido aplicarse a escalas muy reducidas. Esto se explica porque, para el gobierno y los usuarios con mayor capacidad de incidir en la toma de decisiones en materia hídrica, ha resultado más persuasivo, o simplemente más sencillo, imponer su voluntad, privilegiando los megaproyectos de infraestructura, como el caso de El Zapotillo (Caldera, 2014; Caldera, Tagle y Davison, 2020). De este modo, se evidencia que los principales obstáculos para superar la crisis del agua en León son de carácter político y están anclados en arreglos institucionales que han configurado una gobernanza poco democrática y aún distante de alcanzar la sustentabilidad del AVL (Caldera y Tagle, 2015). Asimismo, queda claro que la mera formulación de acciones adaptativas de gestión integral del agua por parte de las autoridades responsables, bajo un discurso asociado al enfoque de la GIRH, no supone una transición ni una adopción efectiva de este modelo como eje rector de la política hídrica de la ciudad.

3.7 Conclusión

Se ha identificado que la ubicación estratégica del municipio de León dentro del territorio nacional, su rápido crecimiento poblacional por procesos de urbanización y metropolización, así como su enérgica actividad económica dentro del Bajío guanajuatense, son factores que han incidido indudablemente en sus recursos hídricos. Esto se ha visto reflejado sobre todo en sus aguas subterráneas, generándose una fuerte presión sobre el AVL, cuyo volumen concesionado ascendió en el año 2024 a 159,388,719 m³.

Con la finalidad de vislumbrar las posibles causas de la delicada situación de los recursos hídricos en la ciudad, se ha abordado el transcurrir de la gestión del agua en León durante los siglos XX y XXI, así como la estructura responsable de su manejo en los niveles federal, estatal y municipal. En este análisis ha quedado en evidencia la influencia de intereses empresariales y económicos que históricamente han moldeado la gestión del recurso en la ciudad, los cuales continúan teniendo gran relevancia en la actualidad. Durante años, estos intereses impulsaron proyectos como

la presa y el acueducto El Zapotillo para atender la prolongada crisis hídrica. Sin embargo, dicha crisis parece no responder enteramente a una escasez de tipo físico, sino a una escasez socialmente construida por SAPAL, asociada principalmente con su modelo de gestión.

Se advierte que, aunque desde la década de los noventa del siglo pasado la Comisión Estatal del Agua ha mostrado un supuesto interés en incorporar el enfoque de la GIRH en el estado y la ciudad de León, se han evidenciado los limitados resultados obtenidos a partir de la adopción de este enfoque participativo. Lo que puede ser atribuido principalmente a obstáculos políticos y a una serie de arreglos institucionales que han configurado una gobernanza no democrática y alejada de la sustentabilidad del AVL. Pues si bien se ha buscado la descentralización del Estado en el espacio público en materia de gestión hídrica, dicha descentralización en Guanajuato y en la ciudad de León parece no haber sido precisamente a favor de la sociedad, sino fundamentalmente de actores privado-mercantiles.

En síntesis, el análisis histórico del manejo del agua en la ciudad de León y en el estado de Guanajuato, junto con la revisión de su estructura administrativa, revela la persistencia de un modelo de gestión centrado en la oferta y en la construcción de grandes obras de infraestructura hidráulica como respuesta predominante ante la crisis hídrica. Este paradigma ha sido el eje de la política pública en materia de agua durante las últimas décadas, teniendo en el complejo hidráulico de El Zapotillo su ejemplo más reciente y representativo. A pesar de los aparentes esfuerzos institucionales por incorporar el enfoque de la GIRH desde inicios de los años 2000, respaldados por reformas a la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato y la creación de organismos como el ya desaparecido COTAS de León, los avances han sido limitados y de alcance reducido. Evidenciando que los principales obstáculos no son de carácter técnico, sino político e institucional, lo que ha perpetuado un modelo de gobernanza que prioriza intereses económicos sobre la sustentabilidad del acuífero y la participación social efectiva.

4. ACCIONES ADAPTATIVAS DE CAPTACIÓN E INFILTRACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN EL MUNICIPIO DE LEÓN

4.1 Introducción

En años recientes, los esfuerzos por impulsar la adopción de técnicas de recarga de acuíferos se han centrado principalmente en atender los aspectos técnicos de las acciones, como la elección de los métodos de recarga, el análisis de las características hidrológicas del área de estudio, la calidad del agua de recarga o la evaluación económica de los proyectos. Si bien estos factores son esenciales, los desafíos para implementar exitosamente estas técnicas trascienden lo técnico, lo que convierte a los aspectos institucionales en un componente igual o incluso más relevante (Miller, Milman y Kiparsky, 2021). De acuerdo con estos autores, para que las técnicas de recarga contribuyan efectivamente a la sostenibilidad de los recursos subterráneos, es necesario diseñar instituciones capaces de coordinar a los actores involucrados, garantizar el cumplimiento normativo, monitorear avances y ejecutar las funciones administrativas necesarias.

Relativo a lo anterior, destaca que, en el estado de Guanajuato, desde comienzos del siglo XXI, se han venido incluyendo dentro de sus distintos planes y programas de desarrollo, acciones de gestión adaptativa para el uso y manejo del agua, muchas encaminadas a la protección y remediación de zonas de recarga para mitigar el grave déficit que presentan algunos de los acuíferos del estado, como el caso del AVL. Con el objetivo de comprender el grado de incorporación real en la política hídrica actual de la ciudad de León de este enfoque de gestión, en este capítulo se identificarán y expondrán las distintas acciones de gestión adaptativa del agua encaminadas a la recarga hídrica propuestas en los principales planes, programas e informes ambientales, de cambio climático y de desarrollo, para León. Así mismo, como parte del análisis, se intentará realizar un seguimiento de las acciones y medidas propuestas

en los diferentes instrumentos de gobierno, para conocer si realmente éstas se han ejecutado, y de ser así, conocer su grado de avance y situación actual.

Este capítulo presenta un panorama sobre la incorporación de las acciones adaptativas de recarga hídrica en el área de estudio dentro de la política hídrica actual; reafirmandose la necesidad por parte de las autoridades responsables y tomadores de decisiones en materia de gestión hídrica de la ciudad de León por migrar genuinamente a un modelo de gestión adaptativo, participativo y transparente, fundamentado en la gestión de la demanda y la implementación de acciones sustentables y descentralizadas encaminadas a la remediación de su principal fuente de abastecimiento de agua, el AVL.

4.2 El papel de las acciones adaptativas de captación e infiltración de agua de lluvia ante la sobreexplotación del AVL

En relación con la reestructuración interna de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato y la supuesta adopción del modelo GIRH en León y el estado de Guanajuato en general, es que a principios del siglo XXI se comienza a plantear, principalmente en los planes de desarrollo de Guanajuato, la incorporación de tecnología adaptativa y sustentable como alternativa para hacer frente a los problemas hídricos en el estado y en la ciudad de León. En un esfuerzo por conocer el interés real de las autoridades responsables de la gestión hídrica por la adopción de infraestructura adaptativa encaminada sobre todo a la infiltración hídrica, así como la prioridad que ocupan dentro de la política hídrica actual, en este apartado se exponen las medidas y acciones afines propuestas desde el Plan Estatal de Desarrollo Guanajuato con visión al 2025, publicado en el año 2003, hasta el Programa de Gobierno Municipal de León 2021-2024, publicado en el año 2022.

Se contemplan, por lo tanto, durante ese periodo, además de los ya mencionados, los Planes Estatales de Desarrollo Guanajuato con Visión 2030 (2011), 2035 (2012), 2040 (2018); el Programa Estatal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Guanajuato 2040 PEDUOET (2019); el Programa Estatal de Cambio Climático Guanajuato (PECCG) (2011); el Programa Municipal de Cambio Climático de León (PMCC) (2014); el Programa del Gobierno del Estado de Guanajuato 2018 – 2024 (2019); y el Plan Municipal de Desarrollo, León hacia el futuro Visión al 2045 (PMD 2045) (2021). Así mismo se han incluido algunas acciones implementadas

por iniciativa civil, como el proyecto Sistemas de Captación de Agua Pluvial en zonas de alta vulnerabilidad hídrica en comunidades de la Sierra de Lobos pertenecientes al Municipio de León (SISCAP) (2018).

Por otro lado, para conocer el avance o situación actual de las acciones, se ha explorado dentro de distintos informes ambientales, entre los que se incluyen los Informes Ambientales del Estado de Guanajuato del año 2012 al 2022. Se han recuperado también informes de avance reportados en boletines informativos del propio gobierno y en periódicos locales; y finalmente, con el objetivo de profundizar la búsqueda de información sobre el estado actual de las acciones, se intentó establecer contacto con las autoridades responsables de la implementación y seguimiento de los proyectos, realizando en algunos casos visitas de manera presencial a las oficinas de SAPAL, del IMPLAN, a la Dirección General de Gestión Gubernamental del Ayuntamiento de León, al SMAOT y finalmente, a la CEAG.

4.3 Acciones propuestas por la administración estatal

Planes Estatales de Desarrollo Guanajuato (PED)

El Plan Estatal de Desarrollo de *Guanajuato* tiene su origen a partir de la experiencia generada por el estudio Guanajuato Siglo XXI, en el año 2000, cuando se formalizó la planeación de largo plazo en la Ley de Planeación para el Estado de Guanajuato, estableciéndose desde entonces su elaboración con una visión a un plazo a 25 años y su actualización en el quinto año de la administración en turno; elaborándose de esta manera, hasta el momento de conclusión de este capítulo, los Planes Estatales de Desarrollo con visión 2025, 2030, 2035, y más recientemente, 2040. Tanto en el Plan Estatal de Desarrollo 2025, como en sus posteriores actualizaciones, destacan dos características en común: estos surgen como producto de la consulta de distintos líderes de los sectores sociales, políticos y económicos, así como de expertos técnicos; y en todos se incluye la propuesta de un conjunto de líneas estratégicas que se deberán de implementar a nivel estatal para impulsar un desarrollo ordenado en Guanajuato (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2003).

Desde el Plan Estatal de Desarrollo con visión 2025 se comienza a advertir la pertinencia de adoptar infraestructura adaptativa de gestión hídrica como parte de

las estrategias de desarrollo en lo que respecta a los servicios del agua, esto lo demuestra la estrategia de impulsar en todas las zonas urbanas y rurales del estado, el establecimiento de sistemas de captación de agua pluvial, reciclaje y reutilización del agua, así como asegurar la sustentabilidad en la extracción, captación, conducción y uso del agua (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2003). Por su parte en la actualización con visión al 2030, se considera dentro del plan estratégico en materia de infraestructura, concretamente con la propuesta de ampliación y mejoramiento de la infraestructura hidráulica tanto en el medio rural como urbano, el desarrollo de infraestructura que permita el aprovechamiento de las aguas pluviales (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2011).

Cinco años después, en la actualización con visión al 2035, como parte de la dimensión estratégica de Medio Ambiente y Territorio, se propone la implementación de cosechas de agua de lluvia en comunidades rurales y urbanas, así como en edificios públicos y particulares, viables para la instalación de los sistemas de captación (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2012). Cabe decir, que respecto a la evaluación y seguimiento del avance de los objetivos y estrategias propuestos en estos planes, poco o nada se ha detallado; en el caso de los planes 2025 y 2030 no se propone un mecanismo o instituto para realizar el seguimiento de las estrategias y acciones propuestas, mientras que para el plan con visión 2035 únicamente se hace mención que el IPLANEG tendrá entre sus atribuciones la actualización, seguimiento y evaluación del Plan Estatal de Desarrollo y sus instrumentos derivados a través de la participación ciudadana (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2012).

Respecto a la última actualización, con visión al 2040, esta fue presentada en el año 2018 por el IPLANEG tomando en cuenta, además del marco normativo vigente de planeación nacional y estatal, los lineamientos de buenas prácticas nacionales e internacionales. A diferencia de las actualizaciones anteriores del Plan, en esta no hay ninguna estrategia que explícitamente aborde el uso de alternativas adaptativas de gestión hídrica, como lo era, por ejemplo, la implementación de sistemas de cosechas de agua de lluvia, sin embargo, se considera que las siguientes guardan relación: crecimiento y consolidación de la infraestructura hidráulica para la captación y la distribución eficiente del agua; protección de las zonas de recarga de acuíferos; y conservación y restauración del suelo y de la vegetación nativa.

Adicional a estas estrategias, se ha presentado en el Programa un listado de retos priorizados para las distintas regiones del estado. La que nos ocupa para el presente estudio es la región del centro, en la cual se ubica la zona metropolitana de León. Cabe destacar que, en la lista de priorización de retos para esta región, el conservar y proteger el medio ambiente y los recursos naturales, principalmente el agua, se ubica

hasta la posición once, mientras que, en último lugar, con la posición quince, se encuentra el lograr una participación social más activa y efectiva. Esta ubicación baja de ambos temas en la jerarquía de prioridades podría interpretarse como una señal de la limitada atención o comprensión sobre la problemática ambiental e hídrica de la región, así como de la importancia del involucramiento de la ciudadanía para el éxito de cualquier estrategia de gestión y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico. De manera complementaria a esto, como proyecto principal en la región Centro del estado, afín a la infraestructura hidráulica adaptativa, únicamente se ha propuesto el Proyecto integral hidráulico para la recolección, manejo y distribución del agua pluvial.

Dentro de los indicadores y metas presentados con relación directa a los objetivos y las estrategias de medio ambiente y territorio, no se han brindado de manera concreta ninguno de ellos para la implementación y seguimiento de estas alternativas adaptativas de gestión hídrica, tenido relevancia y algo de relación, únicamente el indicador del porcentaje de territorio correspondiente a áreas naturales protegidas bajo manejo estatal. El cual cabe señalar, es más bien insatisfactorio, pues como lo demuestran los datos publicados por el propio IPLANEG al cierre del 2022 (IPLANEG, 2022), se esperaba que el porcentaje de territorio correspondiente a áreas naturales protegidas bajo manejo estatal ascendiera de 12.14 % en el 2012 hasta 23.46 % en el 2024, con perspectiva de alcanzar un rango de entre 20.10 y 30.6 % para el año 2040. Sin embargo, hasta el último resultado reportado en el 2020, este porcentaje no solo no mostraba un ascenso, si no que había disminuido a 12.13 %.

Respecto a la instrumentación del Plan Estatal de Desarrollo 2040, se menciona en el mismo plan que se comenzó a llevar a cabo a través de los planes, programas y proyectos desarrollados por las propias administraciones estatales y municipales, elaborándose en congruencia a las líneas, objetivos y estrategias contenidas en el Plan. Por su parte, en el Plan se detalla también, que corresponderá a los distintos municipios elaborar o actualizar sus planes municipales de desarrollo bajo la perspectiva 2040. Respecto al proceso de monitoreo, El Ejecutivo a través de sus dependencias y entidades bajo la coordinación técnica del IPLANEG, habrá de ejecutar al menos los siguientes mecanismos: alineación de las metas del Programa de Gobierno al Plan Estatal de Desarrollo; monitoreo del avance de las metas del Plan Estatal de Desarrollo; monitoreo del avance de proyectos de gran visión; y análisis de la inversión por cada dimensión del Plan Estatal de Desarrollo (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2018).

Programa Estatal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Guanajuato 2040 (PEDUOET)

En el año 2019, y derivado de la actualización del ya expuesto Plan Estatal de Desarrollo Guanajuato con visión 2040, es presentada la actualización del Programa Estatal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico Territorial – 2040 (IPLANEG, 2019). En dicho programa fueron propuestas distintas estrategias vinculadas a los objetivos estratégicos planteados en el PED 2040, con la finalidad de sistematizar acciones encaminadas a resolver las problemáticas y mitigar las deficiencias identificadas en el territorio estatal en materia ambiental, social, económica y del medio transformado (IPLANEG, 2019).

Dentro del listado de estrategias se han identificado cinco que incluyen la implementación de acciones de captación y recarga hídrica, o de acciones de conservación de suelo con finalidades agrícolas, pero útiles también como acciones de recarga: 1) implementación de infraestructura verde en las principales ciudades del estado, con acciones que incluyen pozos de absorción / infiltración y zanjas de infiltración; 2) promover actividades y obras que propicien la recarga de los acuíferos; 3) generación de estudios encaminados a evaluar la capacidad de infiltración de diferentes áreas de recarga y el desarrollo de obras de captación hídrica como presas de gavión en cañadas, y terraceo en áreas deforestadas preferentemente forestales; 4) realización de obras para el control de la erosión laminar, como terrazas de formación sucesiva, terrazas individuales, sistema de zanja bordo, acomodo de material vegetal muerto en curvas de nivel, barreras de piedra en curvas a nivel y acomodo y alineación de material muerto; y 5) promover obras de conservación del suelo, tales como presas (de malla, piedra acomodada, geocostales, gaviones, etc.), estabilización de taludes, terrazas, zanjas y practicas vegetativas.

De acuerdo con la programación de proyectos, obras y acciones concretas, afines a las estrategias de interés, únicamente destaca la construcción de infraestructura para la captación de agua de lluvia, la cual se ha clasificado como obra (actividad encaminada a materializar un proyecto cuyos resultados son tangibles y cuantificables), y a la cual se le ha planteado un plazo de implementación a corto plazo, estableciéndose como responsables a la CEAG, y como corresponsables a SMAOT y CONAGUA. Resulta importante enfatizar que al igual que los distintos Planes de Desarrollo de Guanajuato, las acciones se proponen a nivel estatal y no de manera particular para determinados municipios.

Programa Estatal de Cambio Climático de Guanajuato (PECCG)

Ante los escenarios mundiales de cambio climático global, el Gobierno del Estado definió en el año 2011 su estrategia de acción climática con el Programa Estatal de Cambio Climático de Guanajuato (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2011); en el que se propuso iniciar acciones en tres aspectos estratégicos fundamentales: la mitigación de emisiones, la adaptación y la educación ambiental. Dicho programa, el cual se presentó como punto de partida en las estrategias para hacer frente al cambio climático, tiene un precedente importante, cuando el 2 de octubre del 2007 se decretó la instalación de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático del Estado de Guanajuato (COCLIMA), cuyas funciones fueron integrar un diagnóstico sobre la problemática del cambio climático y su impacto en el Estado de Guanajuato, formular y proponer políticas públicas estatales, así como las reformas legales necesarias en la materia, y formular un programa estatal en materia de cambio climático.

En lo que respecta al Marco Normativo Nacional, el programa deriva de la “Alineación del PECC con los Objetivos del Programa Nacional de Desarrollo por Eje de Política Pública” presente en el Programa Estatal de Cambio Climático 2009-2012 (PECC) publicado por el Ejecutivo Federal el 28 de agosto de 2009. Mientras que el Marco Jurídico Estatal se fundamenta en el Plan de Gobierno 2006-2012 de Guanajuato. Además de estos, otros dos instrumentos que dan marco al programa son, como ya se anticipaba, la creación de la Comisión Intersectorial de Cambio Climático del Estado de Guanajuato (COCLIMA), y el Reglamento Interno de la Comisión Intersectorial de Cambio Climático del Estado de Guanajuato.

La formulación de estrategias y acciones dentro del plan para la atención del cambio climático se realizó con base en escenarios prospectivos elaborados por el Instituto Nacional de Ecología (INE), mediante los cuales se obtuvo una proyección del comportamiento de la temperatura y la precipitación en el estado para el periodo comprendido entre 2010 y 2099. En dichos estudios se identificaron las cuencas del Río Laja, Turbio-Palote y Laguna Seca como las más expuestas a los efectos del cambio climático. Asimismo, se determinó que la cuenca hidrológica Turbio-Palote, que incluye a los municipios de León, San Francisco del Rincón y Purísima del Rincón, presenta un alto grado de vulnerabilidad en términos de uso y abastecimiento de agua subterránea hacia el año 2030, por lo que se consideró necesario establecer acciones a corto, mediano y largo plazo para prevenir impactos negativos derivados del cambio climático.

De manera adicional a este análisis de vulnerabilidad, una consulta realizada a expertos, así como un foro de consulta pública y una encuesta de percepción ciudadana, demostraron que algunas de las acciones planteadas por la sociedad hacia el gobierno, consideradas de suma importancia para hacer frente al cambio climático, incluyen la incorporación de programas de cosecha de agua de lluvia comunitarios en zonas rurales, así como programas de microbordería para captar agua de lluvia en zonas rurales y zonas con degradación de suelos; demostrando con ello el innegable interés de la sociedad hacia este nuevo paradigma de gestión hídrica para afrontar la crisis del agua de cara a los efectos del cambio climático global.

Continuando con las estrategias y acciones del Programa Estatal que directamente abordan el tema de la implementación de infraestructura adaptativa encaminada a la captación e infiltración hídrica para la recuperación de los acuíferos, destacan dos estrategias: 1) reducir el déficit hídrico en el Estado de Guanajuato mediante el aprovechamiento del agua de lluvia y la optimización de la infraestructura hídrica disponible, mediante acciones impulsoras como la elaboración de un Programa de Captación de Agua de Lluvia en el estado; implementar cosechas de agua de lluvia en comunidades rurales y urbanas, así como en edificios públicos y particulares viables para la instalación de los sistemas de captación; fortalecer el sistema ordenado de microbordería en el estado con perspectiva de retener el agua de lluvia; y promover e implementar sistemas de fosas ciegas de agua en áreas naturales protegidas y reservas territoriales estatales y municipales como medio para facilitar la filtración a mantos freáticos; y 2) promover acciones para la reducción del riesgo por siniestralidad de cultivos por sequía o inundación, y fortalecer la gestión sustentable de las actividades agrícolas, con acciones que incluyen la implementación de programas de reforestación y de captación de agua de lluvia para fines agrícolas.

Además de las estrategias mencionadas, derivado del Diagnóstico Climatológico y Prospectiva sobre Vulnerabilidad al Cambio Climático del Estado de Guanajuato, se propusieron una serie de acciones inmediatas que resultan importantes implementar para contrarrestar sus efectos en el territorio guanajuatense. En la tabla 3 se muestran las acciones más relevantes para el tema de captación y recarga con enfoque adaptativo.

Tabla 3. Acciones inmediatas a nivel estatal en tema de fortalecimiento de infraestructura del agua.
Recuperada de Gobierno del Estado de Guanajuato (2011).

Tema	Línea estratégica	Acción	Lugar a implementar	Periodo de ejecución	Instituciones responsables	Impacto esperado	Indicador
Agua	Fortalecimiento de la infraestructura del agua	Implementar sistemas de captación de agua de lluvia en zonas urbanas y rurales, mediante: cosechas de agua en zonas rurales como medio de abastecimiento comunitario; Microbordería y bocas de tormenta o inyección de agua de lluvia a acuífero subterráneo.	Cuenca Turbio – Palote, entre otras	2011 - 2014	CEAG, Secretaría de Desarrollo Agropecuario (SDA), IEE y municipios involucrados.	Ahorro de agua extraída del acuífero por sustitución por agua de lluvia captada.	Volumen de Agua de Lluvia Captada por año en m ³ y consumo de agua de lluvia captada per cápita al año en m ³ .

Con respecto a la Instrumentación, seguimiento y evaluación del Programa, se ha establecido que la evaluación de los avances y sus impactos deberá de ser realizada por la COCLIMA, como parte del mecanismo que defina para su seguimiento, involucrando activamente al Consejo Consultivo de la propia COCLIMA, quien, a partir de la evaluación técnica de resultados y detección de nuevas necesidades, propondrá los aspectos y mecanismos de retroalimentación y mejora. Se plantea también que al menos cada dos años se lleve a cabo una consulta ciudadana de la efectividad de los resultados del programa, y con ello realizar los ajustes pertinentes para asegurar su efectividad (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2011).

Programa de Gobierno del Estado de Guanajuato 2018 – 2024

Preparado, Integrado y elaborado por el IPLANEG, este programa supone un instrumento rector de las acciones del Ejecutivo estatal al ser la base de las políticas públicas de la administración; en él se busca priorizar, en teoría, los requerimientos y necesidades de la ciudadanía desde una perspectiva integral (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2019). En este sentido, el Programa contiene iniciativas que aportan directamente a la solución de las problemáticas más sentidas por la población. Para ello se constituyen los ejes gubernamentales, a partir de los cuales se estructuran los objetivos, estrategias, acciones y proyectos que se desarrollarán en cumplimiento de las atribuciones establecidas para cada dependencia o entidad involucrada, buscando

además el cumplimiento de lo establecido en el Plan Estatal de Desarrollo 2040 (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2019).

Relativo a las acciones adaptativas afines a la captación y recarga hídrica, destacan únicamente dos: 1) implementar el programa de sistemas de captación de agua de lluvia (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2019) y; 2) incrementar la cobertura, eficiencia y mejorar la calidad del agua con acciones como la recuperación de agua mediante acciones de reforestación en Áreas Naturales Protegidas, la identificación de fuentes alternas de agua o la protección de las zonas de recarga de acuíferos.

Respecto a los responsables del cumplimiento de estos objetivos en concreto, no se ha establecido a ninguno, como tampoco ningún indicador para su seguimiento. Sin embargo, el SMAOT y la CEAG son responsables de otros objetivos propios del Eje de Desarrollo Ordenado y Sostenible, por lo que cabría esperar que alguno de ellos fueran los responsables del cumplimiento de estos objetivos. Así mismos resulta importante hacer hincapié en que las acciones propuestas son generales para todo el estado y no para regiones o ubicaciones específicas.

4.4 Acciones propuestas por instancias municipales

Programa Municipal de Cambio Climático de León (PMCC)

Con el objetivo de elevar la sustentabilidad ambiental de la ciudad de León para hacer frente a la emergencia del cambio climático, el ayuntamiento de la ciudad publicó en el año 2014 el PMCC. En dicho programa se definieron 63 medidas, de las cuales 30 corresponden al componente de mitigación, 26 son del componente de adaptación, y 7 abordan el componente de educación y comunicación.

Dentro de los objetivos en materia hídrica afines a la captación y recarga destacan: la implementación de obras de regulación de escorrentías; la incorporación en la normatividad de construcción de edificaciones, infraestructura y equipamiento, elementos que incluyan análisis de peligro, vulnerabilidad al cambio climático e integren criterios para la implementación de infraestructura verde; la construcción de parques lineales para el control de inundaciones y la recarga de mantos acuíferos; y la implementación de un programa de obras de compensación, restauración y conservación de suelo en las microcuencas del ANP Sierra de Lobos.

Si bien en el propio PMCC se les asignó una alta priorización a estas medidas, dando muestra, en teoría, del interés por parte de las autoridades municipales por reducir la vulnerabilidad de la ciudad ante el cambio climático, el programa no menciona una forma de evaluación, seguimiento o verificación del cumplimiento de estas metas.

Plan Municipal de Desarrollo, León hacia el futuro. Visión al 2045 (PMD 2045)

El PMD 2045, publicado en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado en el año 2021, surge como resultado de la actualización del Plan con visión al año 2040. Para ello se evaluó la vigencia de los retos identificados en 2015 y se confirmaron o replantearon las orientaciones generales de mediano y largo plazo, así como las orientaciones particulares y prioridades de corto plazo del Sistema Municipal de Planeación (Ayuntamiento de León, 2021).

Dentro de la piedra angular de Territorio Sustentable y Ciudad Resiliente, destacan tres estrategias afines a la protección y recuperación de aguas subterráneas: 1) generar programas y políticas para la no sobreexplotación, conservación del subsuelo y recarga del acuífero; 2) explorar nuevas fuentes alternas como la infiltración, captación de agua de lluvia e intercambio de agua tratada y agrícola, para asegurar el abastecimiento de agua potable y el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico; y 3) regenerar las cuencas hidrológicas para la protección, captación e infiltración, que aseguren el recurso del agua. Mientras que como parte del pilar de sustentabilidad ante el cambio climático destacan tres acciones: 1) promover la conectividad ecológica y restaurar los suelos degradados en las zonas serranas y áreas naturales protegidas, a través de las compensaciones ambientales que favorezcan la regeneración de los servicios ecosistémicos en corredores biológicos, e incrementar la superficie permeable en zonas de recarga; 2) conservar, fortalecer e incrementar el número de árboles para la renaturalización de la ciudad, que permitan aumentar la superficie permeable en la zona urbana; y 3) aprovechar las zonas inundables para el reúso del agua o para la generación de obras de absorción del recurso hacia el subsuelo.

Atendiendo el tema de la instrumentación de las estrategias y acciones derivadas del plan estratégico, además de las orientaciones generales para el proceso de seguimiento y evaluación, los expertos del IMPLAN y de la Administración Pública Municipal han propuesto distintos actores para colaborar en el proceso de instrumentación de acciones y proyectos y el seguimiento de estos. Se detalla en el programa, que en cada caso la dependencia o entidad municipal responsable deberá

de asumir el liderazgo para encabezar las distintas acciones y proyectos de la estrategia correspondiente, así como involucrar, coordinar y gestionar la colaboración con otros actores (dependencias municipales o estatales, organismos, instituciones, cámaras, colegios de profesionistas, entre otros) que deberían sumarse para la adecuada implementación de las iniciativas (Ayuntamiento de León, 2021). Con respecto a los actores responsables de la instrumentación y seguimiento de las acciones mencionadas, dichas responsabilidades recaen en SAPAL y en la Dirección General de Medio Ambiente. Asimismo, se considera entre los corresponsables a la Dirección General de Desarrollo Rural, la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, el Instituto Municipal de Planeación y la Dirección General de Obra Pública.

Programa de Gobierno Municipal de León 2021-2024

El Programa de Gobierno Municipal de León 2021-2024, se presenta como el instrumento en el que se plasman los proyectos y acciones concretos para lograr el desarrollo del municipio de León en diferentes ámbitos sociales por parte del Ayuntamiento y la administración pública (Ayuntamiento de León, 2022). Desde una orientación estatal, este programa tiene congruencia con el Plan Estatal de Desarrollo de Guanajuato 2040, atendiendo los alcances del Sistema Municipal de Planeación y respondiendo a las acciones de corto plazo establecidas en los instrumentos rectores de planeación.

Dentro de las estrategias en materia hídrica sobresale el proyecto “Agua para todos”, el cual forma parte de la estrategia de medio ambiente y sustentabilidad. El objetivo general del programa es lograr que la población leonesa, así como las instituciones, empresas y diversas instalaciones, cuenten con un servicio de abastecimiento de agua, drenaje sanitario y pluvial de calidad, accesible y constante, tanto a nivel urbano como rural, y que se promueva una educación para la cultura del cuidado del agua en un escenario cada vez más restrictivo en el número de fuentes de abastecimiento de agua, en el marco de las condiciones que genera el cambio climático (Ayuntamiento de León, 2022).

El proyecto consta de once acciones, de las cuales tres se pueden considerar afines a la implementación de acciones adaptivas para captación e infiltración hídrica: 1) generar acciones para incrementar la disponibilidad de agua para todos aprovechando las fuentes disponibles y otras alternativas, con el objetivo de sumar un caudal de 150 lps a la disponibilidad actual de agua durante el trienio, con metas de implementación del 60 % para el 2022, 30 % el 2023, y el 10 % restante durante el

2024; 2) implementar acciones y apoyos para la captación de agua de lluvia en comunidades rurales, con metas de implementación del 60 % para el 2022 y del 40 % restante para el 2023, así como realizar 90 acciones de bordería para almacenamiento de agua pluvial durante el trienio, con metas de implementación del 33 % para el año 2022, 33 % durante el año 2023, y 34 % durante el año 2024; y 3) realizar obras de infraestructura hidráulica en zonas rurales, cuyo objetivo es realizar dos obras de infraestructura hidráulica en zona rural para el 2023, con la meta de cumplirlo en un 50 % para el año 2022 y el resto durante el 2023. Respecto a todas estas acciones, se proponen para el municipio de León, sin detallar su ubicación.

De acuerdo con el Programa de Gobierno Municipal de León, Guanajuato, 2021-2024, el proceso de evaluación para conocer el grado de avance o aporte de los programas, proyectos y acciones dentro del programa de desarrollo estará a cargo del IMPLAN. Como parte de sus atribuciones el IMPLAN llevará a cabo un proceso de monitoreo en el que se analizarán las métricas y resultados de diversas fuentes nacionales e internacionales que permitan contar con el nivel de avance en los retos y desafíos del municipio de León.

En la tabla 4 se presentan un resumen de las distintas iniciativas gubernamentales de acciones adaptativas de gestión sustentable del agua para la ciudad de León afines a la captación y recarga hídrica.

Tabla 4. Resumen de iniciativas gubernamentales y no gubernamentales para la propuesta e implementación de acciones de gestión adaptativa del agua en el estado de Guanajuato y el municipio de León. Elaboración propia.

Plan / Proyecto	Iniciativa	Estrategias / Acciones generales	Acciones concretas	Lugar	Periodo	Responsable
PED 2025	Gobierno (Estatad)	Establecimiento de sistemas de captación, reciclaje y reutilización de agua, asegurando la sustentabilidad del recurso.	No se proponen	Estado	No se indica	No se menciona
PED 2030	Gobierno (Estatad)	Desarrollo de infraestructura que permita el aprovechamiento de las aguas pluviales.	No se proponen	Estado	No se indica	No se menciona
PED 2035	Gobierno (Estatad)	Implementar sistemas de cosecha de agua de lluvia en edificios públicos y particulares viables para su instalación.	No se proponen	Estado	No se indica	IPLANEG

PED 2040	Gobierno (Estatal)	Implementación de infraestructura para la captación y la distribución de agua; Protección de las zonas de recarga de acuíferos; Conservación y restauración del suelo y de la vegetación nativa; Proyecto para la recolección, manejo y distribución de agua pluvial (zona centro del estado).	No se proponen	Estado	No se indica	Ejecutivo a través de sus dependencias y entidades, bajo la coordinación del IPLANEG
PEDUOET	Gobierno (Estatal)	Implementación de infraestructura verde en las principales ciudades del estado; Implementación de acciones de captación hídrica; Realización de obras de conservación de suelos y control de erosión.	No se proponen	Estado	Corto plazo	CEAG, SMAOT y CONAGUA
PECCG	Gobierno (Estatal)	Implementar sistemas para la cosecha de agua en zonas rurales con acciones como microbordería, bocas de tormenta, o inyección de agua de lluvia al acuífero.	No se proponen	Cuenca Turbio - Palote, entre otras	2011 - 2014	CEAG (hoy SAMA); SDA (hoy SDAyR); IEE y municipios involucrados
Programa de Gobierno del Estado de Guanajuato 2018 - 2024	Gobierno (Estatal)	Implementar el programa de captación de agua de lluvia	No se proponen	Estado	2018 - 2024	SMAOT
PMCC	Gobierno (Municipal)	Obras de regulación de escorrentías y parques lineales; programa de restauración y conservación del suelo en Sierra de Lobos; e incorporación de infraestructura verde en la normatividad urbana.	No se proponen	Municipio de León	No se indica	No se menciona
PMD 2045	Gobierno (Municipal)	Desarrollo de programas para la recarga de acuíferos mediante infiltración y captación de agua de lluvia, regeneración de cuencas y aumento de superficies permeables a través de la renaturalización urbana y obras de absorción al subsuelo.	No se proponen	Municipio de León	No se indica	SAPAL y la Dirección General de Medio Ambiente
Programa de Gobierno Municipal 2021 - 2024	Gobierno (Municipal)	Incrementar la disponibilidad de agua aprovechando fuentes disponibles y otras alternativas; implementar acciones y apoyos para la captación de agua de lluvia en comunidades rurales	90 acciones de bordería y 2 obras de infraestructura hidráulica en zona rural	Municipio de León	2021 - 2024	IMPLAN

4.5 Proyectos y acciones no gubernamentales

De manera paralela a las propuestas gubernamentales, distintos proyectos apegados a la GIRH han sido propuestos y ejecutados por iniciativa civil para brindar alternativas de gestión sustentable del agua en León. Algunos de ellos se han enfocado a contribuir a la remediación del AVL, mediante la implementación de acciones de conservación de suelos, recarga hídrica o reforestación; como también se han propuesto y ejecutado acciones para contribuir en cubrir la demanda de agua en zonas rurales o marginadas, y con alta vulnerabilidad hídrica dentro del municipio. Ejemplos de esto es la ejecución, aunque no la financiación, a manos del COTAS de León, del proyecto de Sistemas de Captación de Agua Pluvial en zonas de alta vulnerabilidad hídrica en comunidades de la Sierra de Lobos pertenecientes al municipio de León (SISCAP) o la construcción de tinajas ciegas y presas con geocostales en la comunidad de San José de Otates Sur, también al norte de la ciudad de León.

Sistemas de Captación de Agua Pluvial en zonas de alta vulnerabilidad hídrica en comunidades de la Sierra de Lobos pertenecientes al Municipio de León (SISCAP)

A partir del año 2016 el COTAS de León adaptándose a los requerimientos que en ese momento solicitaba el gobierno municipal de León en materia de ecotecnias, amplió su abanico de proyectos en el cual incluyó la construcción de este tipo de tecnologías. Mediante la participación en concursos para obtener fondos de financiamiento, Cotas de León obtuvo recursos del Fondo Ambiental de Guanajuato y de la Dirección de Desarrollo Social de León, los cuales contribuyeron a la implementación de sistemas de captación y potabilización de agua pluvial para consumo humano, con el objetivo de ayudar a las personas en zonas marginadas, de bajos recursos y situaciones de escases de agua potable ubicadas en la Sierra de Lobos (Consejo Técnico de Aguas de León, A.C., 2018).

Como parte de estos programas se instalaron entre el año 2016 y 2018 en las comunidades de Mesa de Ibarra, Saucillo de Avalos, Sauz Seco, Media Luna, San José de Otates Sur, San José de Otates Norte, Mesa de Medina, Llano Grande y Los Bancos (Figura 11), una serie de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia conformados por un tanque de almacenamiento con capacidad de 10,000 litros, un tinaco de 450 litros instalado en la parte superior de las viviendas, un filtro estándar, una bomba hidráulica de ½ hp, así como la instalación hidráulica necesaria para la

captación del agua pluvial y la distribución del agua potable (Cotas de León A.C., 2018).

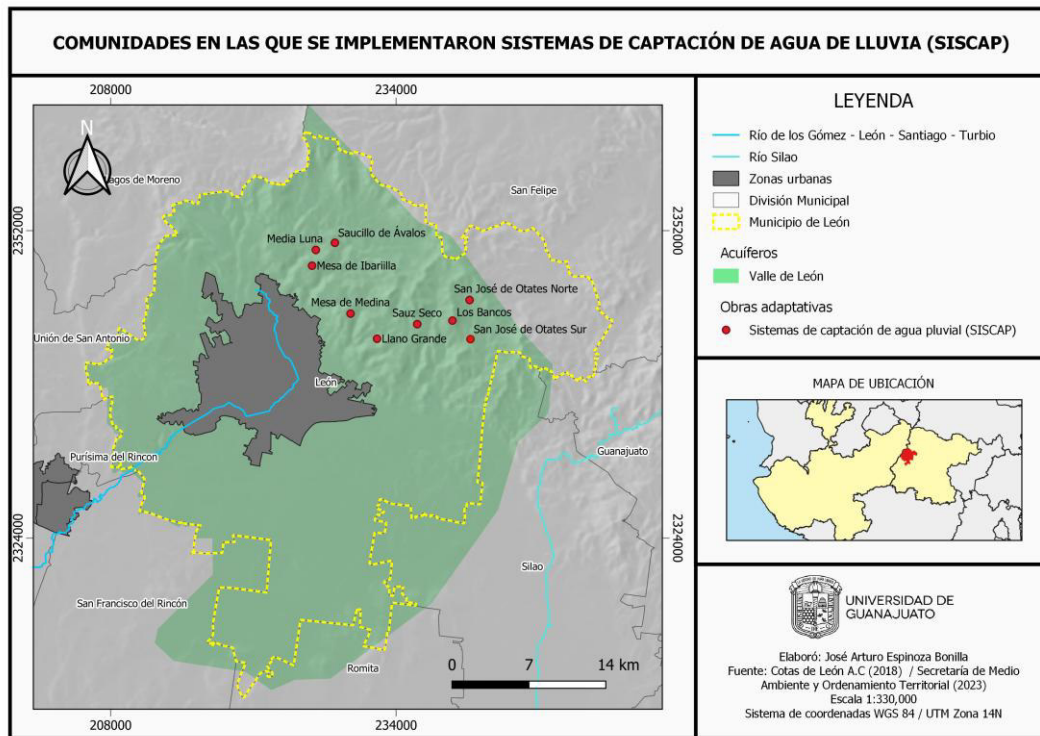


Figura 11. Comunidades en las que se implementaron sistemas de captación de agua de lluvia como parte del proyecto SISCAP. Elaboración propia.

Los resultados del proyecto hasta el año 2018 fueron la instalación de 17 sistemas de captación de agua pluvial, beneficiando de manera directa a 53 viviendas y aproximadamente 183 personas con la captación y purificación de 170,000 litros de agua durante la duración del proyecto; este alcance se puede adjudicar en buena medida a los distintos aspectos que se consideraron tanto en la fase previa a la implementación de los sistemas de captación, como la elaboración de un censo para conocer las características de los núcleos familiares existentes en las comunidades, las estructura de la casa elegida para la instalación del sistema y la relación social que llevan las personas de la casa elegida para la instalación del sistema; así como también a los análisis fisicoquímicos realizados de manera oportuna a distintas muestras de agua captada por los sistemas, demostrando que el agua recolectada y purificada era completamente apta para el consumo humano (Cotas de León A.C., 2018).

Además de los resultados directos de captación y purificación, otras ventajas de la implementación de estas tecnologías es el costo unitario relativamente bajo de cada

sistema de captación (\$59,942.34 MXN en el año 2018); su instrumentación rápida, pudiéndose implementar cada sistema en un periodo de 2 a 3 semanas; la reducción del impacto económico de los usuarios al disminuir el gasto en garrafones y agua embotellada; el favorecimiento del cuidado del recurso hídrico en la zona en la que son instalados; la integración social bajo el objetivo de construir infraestructura de uso comunitario; y finalmente la disminución de las enfermedades gastrointestinales gracias al consumo de agua purificada.

Otro ejemplo corresponde al llevado a cabo en la comunidad de San José de Otates Sur, localizada en la Sierra de Lobos al norte de la ciudad de León. Donde además de construir 625 tinas ciegas, se realizó también el cabeceo de 7 cárcavas para controlar la erosión en la cuenca mediante la colocación de geocostales (Figura 12).



Figura 12. Acciones llevadas a cabo en la comunidad de San José de Otates Sur. Izquierda: tinas ciegas. Derecha: colocación de geocostales para el cabeceo de cárcavas. Recuperadas de Cotas de León, A.C. (2019).

4.6 Situación actual de las estrategias y proyectos que incluyen obras adaptativas de captación e infiltración hídrica en León

Como parte de los Informes Ambientales de Guanajuato publicados por el SMAOT se han reportado los avances a nivel estatal con relación a la implementación de infraestructura hídrica adaptativa, en algunos casos de captación y recarga hídrica. Tal es el caso del Informe Ambiental del Estado de Guanajuato 2012 – 2018, en el que se ha reportado la restauración del suelo en más de 44,724 hectáreas de la zona del Bajío, en la que se asume se incluye León, con acciones como tinas ciegas, piedra

acomodada, geocostales y zanjas (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2018), las cuales además de ser medidas de conservación y restauración del suelo, tienen el potencial como obras de infiltración hídrica. En el Informe Ambiental del Estado para el año 2020, se reportó la implementación de acciones en zonas de recarga de acuíferos en Unidades de Gestión Ambiental Territorial con política de Conservación y Protección, atendiendo 550 hectáreas con acciones que incluyeron podas sanitarias y redensificación de superficie arbórea, barreras de piedras, presas filtrantes de piedra acomodada, tinas ciegas y adecuación de zanjas para la captación de agua en León y otros municipios del estado (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2020). Cabe decir que, si bien estas acciones no son de recarga subterránea, si advierten la adopción de uno paradigma de gestión sustentable del agua en el estado.

En lo que se refiere a las acciones reportadas en el Primer Informe de Gobierno del Ayuntamiento de León 2021 – 2024 (Ayuntamiento de León , 2022), como parte de la bandera Vivir Sano, y en atención a la red de Parques Urbanos y Áreas Naturales, resalta la reforestación de 9,100 árboles dentro del Área Natural Protegida Sierra de Lobos, concretamente en las comunidades de Barbosa, Sauz Seco, Coloradas, Mesa del Obispo, San Juan de Otates y Rincón Grande; con el objetivo de mejorar el entorno, prevenir la erosión, y sobre todo, para la conservación del suelo y la infiltración de agua para la recarga de los mantos acuíferos. Como parte de esta misma bandera, se reporta el arranque del Programa de Captación de Lluvia para uso doméstico en la zona norte del municipio, informándose el apoyo con 13 sistemas de captación en la comunidad de Cerro Alto, con una inversión conjunta entre municipio y beneficiario de 376,740 pesos, y un volumen de captación de agua de 5 mil litros cada una (Ayuntamiento de León, 2022). Respecto a estos sistemas de captación, nuevamente, no se trata de acciones cuyo objetivo sea la infiltración directa de agua al acuífero, pero sí de acciones adaptativas que suponen una fuente alternativa de abastecimiento, y que pueden incidir directamente en el volumen de agua que se extrae del acuífero.

Además de los avances publicados de manera oficial por instancias estatales y municipales en sus distintos informes, en Comunicados y Boletines Oficiales del Gobierno del Estado, así como en periódicos leoneses ha quedado en evidencia parte del avance en la implementación de estas acciones. En lo que respecta a los sistemas de captación de agua de lluvia, en el año 2017 un boletín oficial del Estado de Guanajuato (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2017) reportó que el Gobierno del Estado a través de la Comisión Estatal del Agua, el COTAS de León y el municipio de León habían impulsado proyectos alternativos de abastecimiento de agua en viviendas en localidades sin redes de agua potable, entre las que se encontraba Mesa de Ibarra, Saucillo de Avalos, Sauz Seco, Media Luna, San José de Otates Sur, San

José de Otates Norte y Mesa de Medina; remitiéndonos prácticamente al proyecto de “Sistemas de Captación de Agua Pluvial en zonas de alta vulnerabilidad hídrica en comunidades de la Sierra de Lobos pertenecientes al Municipio de León (SISCAP)”, expuesto anteriormente. Cabe destacar también, que, ante la imposibilidad de solicitar directamente información al COTAS de León, se solicitó a SAPAL, al Ayuntamiento de León, y al Poder Ejecutivo del Estado de Guanajuato, a través de la Plataforma Nacional de Transparencia, información relativa a los proyectos emblemáticos del COTAS de León encaminados a la recarga hídrica, obteniendo en todos los casos una respuesta negativa, argumentado el desconocimiento de dicha información.

Más recientemente, el 31 de diciembre del 2022 el SMAOT publicó las reglas de operación del programa “Aprovechamiento de la lluvia para la adaptación climática” cuyo objetivo es instalar sistemas de captación de agua de lluvia en escuelas y viviendas de zonas urbanas y rurales con dificultades para acceder al agua. Con una inversión proyectada de 8 millones de pesos se otorgarán los apoyos en dos líneas, una para instalar sistemas de captación de agua de lluvia y su potabilización para escuelas y hogares, y la segunda para entrega de filtros potabilizadores externos (Estrada, 2023).

En el caso de las acciones enfocadas a la cosecha de agua que se reportan en los Informes Ambientales del Estado, las cuales incluyen la implementación de tinas ciegas, zanjas, barreras de piedras, presas filtrantes de piedra acomodada, y redensificación de superficie arbórea, se suma la implementación de acciones de bordería, las cuales además de cumplir la función de abrevadero, favorecen la humedad del suelo y la infiltración a los mantos acuíferos.

Esto lo demuestra un boletín emitido en el año 2020 por el Gobierno del Estado de Guanajuato, en el que se informó que como parte del programa “Captemos agua” se realizarían obras de bordería para almacenamiento de agua. Concretamente se informaba la realización de 50 bordos para usos múltiples con el objetivo de atender y preservar las necesidades básicas del medio rural, mediante los cuales se beneficiaría a 21 comunidades no especificadas (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2020). Destacan también la realización de obras de desazolve y ampliación de bordos para 28 comunidades dentro de León, entre ellas Alfaro, Nuevo Valle Huizache, La Sandía y Santa Ana del Conde, con el objetivo de contribuir a la generación de microsistemas en las comunidades, a enfriar la temperatura de las zonas intervenidas, a la cría de peces, así como para utilizar el agua captada de lluvia como abrevadero para el ganado y finalmente, para contribuir con la infiltración de agua a los mantos

acuíferos que abastecen de agua a la ciudad de León (Figura 13) (Editorial Telediario, 2020) (Ayuntamiento de León, 2020).



Figura 13. Bordo en el municipio de León para usos múltiples e infiltración de agua en los mantos acuíferos. Recuperada de Ayuntamiento de León (2020).

En el año 2022, con el objetivo de captar agua de lluvia para el abastecimiento de actividades agrícolas, se reportó mediante un comunicado oficial emitido por el Ayuntamiento de la ciudad de León el arranque de un programa de bordería (Ayuntamiento de León, 2022) que en total beneficiará a 11 comunidades de la zona norte del municipio de León (El Heraldo de León, 2022), entre ellas Barbosa, Zona de Huizache, Mesa de Ibarrilla y Rincón Grande (Ayuntamiento de León, 2022), y el cual consistirá en la construcción, desazolve y conservación de bordos para usos múltiples, entre ellos como abrevadero y captación de lluvias, con la finalidad de atender y preservar las necesidades básicas del medio rural (El Heraldo de León, 2022), además de abonar a la alimentación de los mantos acuíferos (Ayuntamiento de León, 2022). Se proponía que, como parte de este programa de captación, para la última semana de junio de 2022 quedarían concluidos 90 bordos, sumándose con ello a los 1200 que en aquel momento ya se tenían en comunidades de León (Ayuntamiento de León, 2022; El Heraldo de León, 2022).

Para el año 2023, la Dirección General de Desarrollo Rural presentó su programa de inversión 2023 para el campo leonés, en el que se destinarían 4.3 millones de pesos para la captación de agua de lluvia a través de bordería y sistemas domésticos (Esqueda, 2023) como medida para captar agua en temporada de lluvias y apoyar al sector ganadero. Como parte de esta iniciativa, la Dirección de Desarrollo Rural de León en conjunto con la Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural inició la implementación de 22 obras más de bordería, sobre todo en la zona norte del

municipio, en comunidades como Pueblo de Huizache y Valle de Moreno. Además de estos bordos se contempla también la instalación de cisternas de cinco mil litros para que funcionen como captadores de agua (Pérez, 2023).

Finalmente, SDAyR indica que como parte de su Programa de Desarrollo Territorial Sustentable, en el ejercicio 2022, destinó una inversión total de \$1,399,930 MXN para la realización de 25 obras de bordería (Figura 14) para beneficio de 65 familias de nueve comunidades en el León: Canelas, El Huizache, La Estrella del Mirador (Mesa de Ibarrilla), Rincón Grande, San José de Otates Sur (Piedras de Coche), Llano Grande, San Rafael Cerro Verde, Nuevo Valle de Moreno y Barbosa (Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural, 2023). Adicionalmente informa que con dichas obras se restituye la capacidad de almacenamiento de 58,061 m³ de agua superficial, se propicia el desarrollo económico pecuario y piscícola de las comunidades, y se pretende además disminuir la extracción de agua subterránea y contribuir a la recuperación de los acuíferos. Por otro lado, se especifica que para el ejercicio 2023, se programó la inversión de \$1,200,000 MXN para realizar 22 acciones más en 6 comunidades: El Huizache, La Estrella del Mirador (Mesa de Ibarrilla), San José de Otates Sur (Piedras de Coche), San Juan de Otates, Buenos Aires, y Barbosa (Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural, 2023).

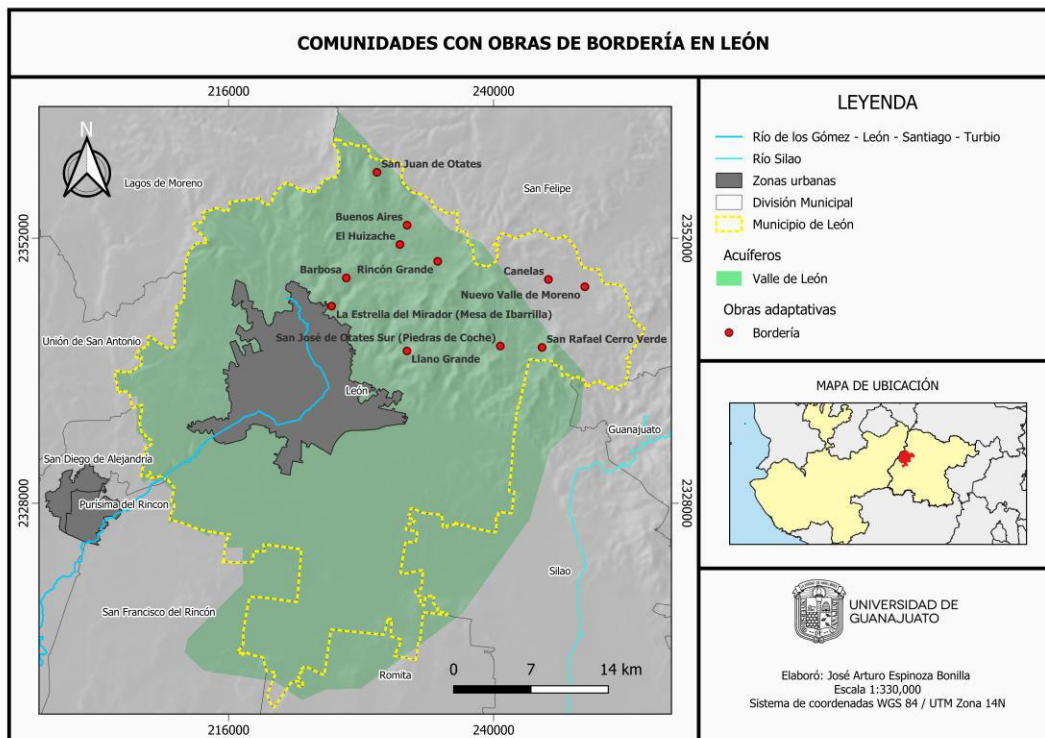


Figura 14. Comunidades en León en las que se han implementado obras de bordería. Elaboración propia.

4.7 Conclusión

Para conocer el verdadero lugar que ocupa este modelo de gestión hídrica como alternativa para atender la crisis del agua en la ciudad de León, particularmente en lo referente a la sobreexplotación del AVL, se estudiaron los principales planes y programas de desarrollo, ordenamiento territorial y cambio climático del estado de Guanajuato y el municipio de León. Entre ellos se consideran el Plan Estatal de Desarrollo Guanajuato Visión 2025, Visión 2030, Visión 2035 y Visión 2040; el PEDUOET 2040; el PECCG; el Programa de Gobierno del Estado de Guanajuato 2018–2024; el PMCC; el PMD 2045; y el Programa de Gobierno Municipal de León 2021–2024, además de algunos proyectos emblemáticos impulsados por la iniciativa civil.

Tras este análisis, se identificó un aparente respaldo por parte de las autoridades gubernamentales, especialmente desde inicios del siglo XXI, hacia las obras adaptativas de gestión sustentable del agua enfocadas en la captación y recarga. Estas acciones se han incorporado dentro de la política hídrica actual como un intento por reducir la presión sobre los cuerpos de agua subterráneos de la ciudad y del estado de Guanajuato, lo que sugiere su fomento y adopción, tanto por parte del gobierno como de organizaciones no gubernamentales, de este nuevo paradigma de gestión hídrica.

Algunas evidencias de ello son el incremento, durante la última década, en la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia, sobre todo en zonas rurales del estado, así como el aumento en el número de hectáreas atendidas mediante obras de restauración de suelos, reforestación, infiltración al subsuelo y apoyo a actividades pecuarias y agrícolas, a través de acciones como bordos, zanjas y tinas ciegas. Sin embargo, también se identificaron aspectos deficientes en los planes y programas, los cuales pueden afectar el éxito y la posible aplicación o replicación de las acciones propuestas. Entre estos aspectos destaca la falta de información disponible para consulta pública sobre el estado de las acciones, los sitios específicos de intervención y los responsables de su ejecución, evaluación y seguimiento. Aún más preocupante es la dificultad para acceder a dicha información, incluso al solicitarla directamente a las instituciones responsables, las cuales en muchos casos canalizan la petición a otros supuestos encargados ante el desconocimiento del proyecto. Lo que hace de las labores de seguimiento y la elaboración de un inventario de acciones una tarea prácticamente imposible, reduciendo substancialmente así la validez y el verdadero valor de estos planes y programas en apariencia tan robustos.

También se observó la dificultad para establecer la relación entre las acciones reportadas en los distintos informes y boletines y las estrategias propuestas en los planes y programas, pues en la mayoría de los casos no se especifica claramente a qué proyecto responde cada acción, o si siquiera mantienen alguna relación. Asimismo, los informes suelen limitarse a mencionar el número de acciones realizadas, sin detallar su seguimiento, estado actual o nivel de éxito.

En cuanto al panorama actual de las obras adaptativas de gestión hídrica dentro de la política del agua del estado de Guanajuato y del municipio de León, este se muestra en general favorable a corto y mediano plazo. No obstante, si realmente se busca avanzar hacia este nuevo paradigma de gestión hídrica, es necesario fortalecer los instrumentos para el inventario, seguimiento y evaluación de las obras. Asimismo, se debe mejorar el acceso a la información, de modo que académicos, especialistas y la sociedad en general puedan conocer el estado actual de las acciones y sus resultados. Todo esto permitirá realizar mejoras en las zonas ya intervenidas y, sobre todo, replicar las experiencias exitosas en otras regiones vulnerables del municipio de León y del estado de Guanajuato, bajo un enfoque participativo y transdisciplinario.

5. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA PARA EL AVL

5.1 Introducción

Aunque la utilización de técnicas como la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en estudios de gestión de agua subterránea son relativamente nuevos (Singh, Panda, Kumar, y Shekmar, 2013), éstos han sido empleados con éxito en distintas investigaciones alrededor del mundo. Mediante el estudio de estos trabajos se advierte que un importante número de ellos atiende principalmente alguno de los siguientes dos objetivos: 1) determinar e identificar aquellas regiones con mayor potencial para que se lleve a cabo la recarga al acuífero y por lo tanto para albergar acciones de recarga (v.g. Singh et al 2013; Jena et al, 2020; Ibrahim y Shatnawi 2022); y, 2) simular la implementación de dichas acciones para intentar anticipar el efecto hidrológico que tendría su implementación real (v.g. Hunik et al., 2013; Ben Khelifa et al., 2017; López-Ballesteros et al., 2019).

Con la finalidad de atender el primer objetivo, y transitando de la dimensión político-social hacia un enfoque técnico, en el presente capítulo se llevará a cabo la identificación y delimitación de las zonas potenciales de recarga subterránea para el AVL. Para ello, se comenzará por exponer de manera amplia la metodología empleada en distintas investigaciones orientadas a la identificación de zonas de recarga y de sitios óptimos para la implementación de acciones de recarga, para posteriormente, a partir de dichas aproximaciones, proponer una metodología específica para el área de estudio. Se ha buscado que las investigaciones fueran desarrolladas en regiones con similitud a las características geográficas y climáticas presentes en la región delimitada por el AVL. Cabe señalar que si bien en algunos de los artículos identificados, los autores también incluyen la determinación de parámetros como la recarga al acuífero (Boughariou et al., 2015) o la capacidad de almacenamiento subsuperficial (Kumar, Kant, y Jhariya, 2016), se ha juzgado pertinente recuperar y

exponer únicamente la metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga.

Como parte del capítulo se brindará también un encuadre geográfico del AVL, presentando distintas características del área de estudio, entre las que se incluyen la geomorfología, geología, hidrografía, hidrogeología y clima. Posteriormente se presenta el apartado de metodología, el que se expone la metodología propuesta que se seguirá para la identificación y delimitación de las zonas de recarga en el área de estudio. En el apartado de resultados se muestra como principal producto el mapa de zonas potenciales de recarga subterránea del AVL, así como los polígonos con alta viabilidad para albergar acciones de recarga. Con los resultados del presente capítulo se busca identificar aquellos sitios más viables dadas sus características biofísicas para la implementación de acciones de captación e infiltración de agua de lluvia en el AVL.

Cabe destacar que la metodología propuesta y los principales resultados del presente capítulo constituyen el artículo titulado “Identificación de zonas potenciales de recarga y priorización de técnicas de infiltración mediante análisis multicriterio: caso del acuífero Valle de León, México”, cuya publicación en la revista *Tecnología y Ciencias del Agua* está programada para el volumen 18, número 1, correspondiente al periodo enero-febrero de 2027.

5.2 Metodologías para la identificación de zonas potenciales de recarga

Un conjunto de factores que incluyen el rápido crecimiento poblacional, cambio climático, deforestación, urbanización y políticas de gestión de agua inadecuadas, han contribuido a un grave agotamiento de cuerpos de agua subterráneos (Alam et al., 2022). Como parte de la respuesta a la creciente presión sobre un importante número de acuíferos en regiones principalmente áridas y semiáridas alrededor del planeta, durante los últimos 25 años se han venido desarrollado distintos estudios dirigidos a determinar zonas de recarga de acuíferos y de sitios adecuados para la implementación de proyectos MAR, que contribuyan a mitigar el problema (v.g. Saraf y Choudhury, 1998; Anbazhagan, Ramsamy, y Gupta, 2005; Chowdhury, Jha, y Chowdary, 2010; Sabokbar et al., 2012; Azizur et al., 2013).

De acuerdo con Hani et al. (2023), al momento de contemplar la implementación de sistemas MAR así como de otras acciones adaptativas de recarga de acuíferos, habrá de considerar distintos factores que tendrán una fuerte influencia en la viabilidad de su implementación en locaciones específicas; de ello que la mayoría de las guías y manuales encaminados a la implementación de estas tecnologías hagan particular énfasis en la relevancia de desarrollar una planificación adecuada para asegurar la sostenibilidad de los sistemas que se busca implementar. Entre los principales factores que habrá de considerar al momento de la implementación de alguna acción de recarga se incluyen: la fuente de agua de recarga y su calidad; los usos que tiene el agua del acuífero que se busca recargar; los costos de implementación de las tecnologías MAR (Dillon et al., 2014); la disponibilidad de agua de recarga; la identificación de sitios con potencial de recarga; los diferentes métodos y tecnologías de recarga; el diseño de las estructuras; el diseño de planes de monitoreo, mantenimiento y reparación (Salameh, Abdallat, y van der Valk, 2019); o la regulación propia del sitio en el que se busque implementar el proyecto (Yuan, Van Dyke, y Huck, 2016). Sin embargo, de entre todos ellos, la selección de sitios de recarga adecuados se considera uno de los pasos más importantes, pues este influirá no solo en la selección de las técnicas MAR apropiadas, sino que regirá también, su proceso de implementación y subsecuente éxito (Hani, Nour El Din, Khalifa, y Elalfy, 2023).

Tanto la delimitación de las zonas de recarga, como la determinación de aquellas ubicaciones con las características físicas óptimas para la implementación de las acciones MAR, han sido ampliamente identificadas mediante la utilización de sensores remotos y tecnología SIG (Jena et al., 2020); pudiéndose atribuir en buena medida a la capacidad de los sensores remotos de proveer distintos conjuntos de datos sobre enormes áreas de estudio que pueden ser fácilmente manejados y analizados en un ambiente SIG (Chowdhury, Jha, y Chowdary, 2010), y cuyo resultado decisivo radica en poseer la capacidad de analizar un conjunto de datos de manera multidisciplinaria (Biswajit y Subodh, 2019). Así mismo, dentro de las distintas técnicas y herramientas utilizadas en investigaciones afines al estudio de las aguas subterráneas y a la distribución de zonas potenciales de recarga, destacan los modelos de regresión logística, modelos de frecuencia de ratio, modelos de decisión multicriterio, modelos matemáticos y otras técnicas geoestadísticas y geoespaciales, (Biswajit y Subodh 2019; Ibrahim y Shatnawl 2022), siendo el Análisis de Decisión Multicriterio (del inglés, *Multicriteria Decision Analysis*, MCDA), conocido también como Evaluación Multi-Criterio (EMC), uno de los utilizados con mayor frecuencia para delimitar zonas con potencial de recarga de agua subterránea (Biswajit y Subodh, 2019).

En distintos estudios se han empleado de manera conjunta la utilización de sensores remotos, SIG y MCDA para la determinación de zonas de recarga y sitios viables para la implementación de acciones de recarga. Los autores Azizur et al. (2013) determinaron zonas de recarga natural en el norte de la ciudad de Gaza, Palestina, a partir de un Análisis de Decisión Espacial Multicriterio (del inglés, *Spatial Multicriteria Decision Analysis*, SMCD), el cual incluyó el desarrollo de mapas de idoneidad mediante la estandarización de sus clases, la ponderación de criterios como pendiente, infiltración, espesor del acuífero, distancia a lagos, costo de transporte de efluente, zonas con flujo de agua subterránea, profundidad del nivel freático y calidad del agua subterránea, mediante un Proceso Analítico Jerárquico (AHP); y finalmente, la superposición de dichos criterios mediante una combinación lineal ponderada (del inglés, *Weighted Linear Combination*, WLC). Alam et al. (2022) por su parte, identificaron sitios potenciales para la recarga natural subterránea en Islamabad, Pakistán, utilizando también los procesos AHP, WLC, y Lógica Difusa, y analizando los criterios de suelo, pendiente, nivel freático, densidad de población, uso de suelo y cobertura vegetal, densidad de drenaje, y elevación.

Un ejemplo en México fue desarrollado para el acuífero Cuauhtémoc, en el estado de Chihuahua (Bravo et al., 2015). Los autores realizaron la zonificación de las áreas potenciales de recarga al acuífero a través de una Evaluación Multi-Criterio (EMC), a partir de la construcción, ponderación y superposición de las capas de geología, densidad de fracturas y lineamientos, edafología, uso del suelo y cobertura vegetal, y grado de desarrollo de la red superficial de drenaje en el área que alimenta al acuífero. Además de los estudios presentados, en la literatura es posible identificar numerosas investigaciones en las que se han aplicado metodologías similares para la identificación de zonas de recarga y la selección de sitios óptimos para la implementación de acciones de recarga, desarrolladas principalmente durante los últimos 25 años (tabla 5).

Tabla 5. Estado del arte sobre la identificación de zonas potenciales de recarga mediante metodologías de análisis multicriterio. Elaboración propia.

Estudio	Area de estudio	Referencia	Metodología
Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques.	Cuenca del río Subarnarekha, India.	Chowdhury, Jha, y Chowdary (2010).	Integración de percepción remota, SIG y análisis multicriterio (MCDA-AHP) para ponderar variables hidrogeológicas, delimitar zonas potenciales de recarga e identificar sitios adecuados para obras de recarga artificial.

Artificial Groundwater Recharge Zones Mapping Using Remote Sensing and GIS: A Case Study in Indian Punjab	Cuenca Bist Doab, India.	Singh, Panda, Kumar, y Shekmar (2013).	Análisis multicriterio basado en AHP y SIG para integrar variables hidrogeológicas, edáficas y de uso del suelo, clasificando el territorio según su potencial de recarga artificial.
Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México	Porción centro-sur de la provincia fisiográfica Mesa Central, México.	Peñuela y Carrillo (2013).	Aplicación de la teoría de los sistemas de flujo mediante superposición de mapas temáticos en SIG para delimitar zonas de recarga y descarga de agua subterránea.
Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique	Cuenca Vaigai, India.	Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh (2013).	Integración de imágenes Landsat ETM+, cartografía topográfica y datos auxiliares mediante AHP para ponderar variables físicas y delimitar zonas potenciales de recarga artificial.
Mapping recharge potential zones and natural recharge calculation: study case in Sfax region	Región de Sfax, Túnez.	Boughariou et al. (2015).	Delimitación de zonas potenciales de recarga mediante variables fisiográficas y estimación de la recarga pluvial utilizando los modelos empíricos como ERAS, Schoeller, Fersi y coeficientes DGRE.
Multi-criteria decision analysis for planning and management of groundwater resources in Balod District, India	Chhattisgarh, India.	Kumar, Kant, y Jhariya (2016).	Integración de percepción remota, SIG, AHP y juicio de expertos para delimitar zonas potenciales e identificar sitios adecuados para la implementación de estructuras de recarga artificial.
Assessment of groundwater recharge and its potential zone identification in groundwater-stressed Goghat-I block of Hugli District, West Bengal, India	Bengala Occidental, India.	Biswajit y Subodh (2019).	Delimitación de zonas potenciales de recarga mediante superposición ponderada en SIG y AHP, complementada con la cuantificación de la recarga real mediante el método de fluctuación del nivel freático.
Mapping of Groundwater Recharge Potential Zones and Identification of Suitable Site-Specific Recharge Mechanisms in a Tropical River Basin	Cuenca del río Kerala, India.	Achu, Reghunath, y Thomas (2019).	Delimitación de zonas potenciales de recarga mediante SIG, percepción remota y técnica de factores de influencia múltiple, con selección de estructuras de recarga mediante un enfoque basado en reglas.

Delineation of groundwater storage and recharge potential zones using RS-GIS-AHP: Application in arable land expansion	Odisha, India.	Jena, Kumar, Ramadas, Prasad, y Kishore (2020).	Delimitación conjunta de zonas potenciales de almacenamiento y recarga mediante SIG, percepción remota y AHP, con estimación del rendimiento seguro a partir de su intersección.
Using Analytical Hierarchy Process and Multi-Influencing Factors to Map Groundwater Recharge Zones in a Semi-Arid Mediterranean Coastal Aquifer	Acuífero Korba, Túnez.	Zghibi et al. (2020).	Delimitación de zonas potenciales de recarga mediante SIG y dos enfoques multicriterio (AHP y MIF), evaluando su desempeño mediante validación con datos de pozos.
Delineating potential sites for artificial groundwater recharge using a mathematical approach to remote sensing and GIS techniques	Cuenca Al-Sarhan, Jordania.	Ibrahim y Shatnawi (2022).	Aplicación de SIG y combinación lineal ponderada para identificar zonas potenciales de recarga, considerando variables geoambientales y verificando su correspondencia con la distribución de pozos.
GIS-based identification of potential watershed recharge zones using analytic hierarchy process in Sikkim Himalayan region	Sikkim, India.	Zimik et al. (2022).	Integración de SIG mediante superposición ponderada y AHP para delimitar zonas potenciales de recarga en una región montañosa y seleccionar sitios para obras de conservación hídrica.
Development of suitability map for managed aquifer recharge: Case study, West Delta, Egypt	Delta Occidental del Nilo, Egipto.	Hani, Nour El Din, Khalifa, y Elalfy (2023).	Desarrollo de un modelo de aptitud para acciones de recarga mediante SIG y evaluación multicriterio, integrando variables hidrogeológicas, socioeconómicas y criterios específicos para cuencas de infiltración.

De acuerdo con Azizur et al. (2013), a partir de una extensa revisión de la literatura desarrollada por Rahman et al. (2012), se ha postulado que, en general, el proceso para identificar zonas idóneas para la implementación de acciones MAR se compone fundamentalmente de la selección de áreas factibles, clasificación de capas temáticas, estandarización de los mapas, ponderación de los criterios, y finalmente, superposición de los mapas. Dicho proceso se demuestra también, a través de la metodología aplicada en los distintas investigaciones que aquí se presentan; en las que queda en evidencia que, si bien existen algunas variaciones entre ellas, en general presentan las siguientes etapas: 1) identificación de criterios que determinan la

recarga hídrica, 2) desarrollo de capas temáticas para los criterios identificados, 3) reclasificación de las capas temáticas de acuerdo con su aptitud para la recarga, 4) ponderación de los criterios para definir su importancia en el proceso de recarga, y 5) superposición de las capas temáticas reclasificadas considerando su ponderación para determinar las zonas de recarga. Para conocer a mayor detalle la metodología, a continuación, se describirán las distintas etapas.

Identificación de criterios

La recarga de agua subterránea depende de distintos factores como la geología, topografía, tipo de suelo, uso de suelo y cobertura vegetal (Biswajit y Subodh, 2019); sin embargo, resulta importante mencionar que los factores o criterios, su número, y su dominancia, variará de una región a otra (Biswajit y Subodh, 2019), haciendo necesario definirlos para cada caso de estudio en particular y buscando que los criterios seleccionados sean mínimos y no redundantes (Hani, Nour El Din, Khalifa, y Elalfy, 2023).

En la literatura es posible identificar distintos criterios que son evaluados con frecuencia para delimitar zonas de recarga hídrica. Por ejemplo, Singh, Panda, Kumar, y Shekmar (2013) han determinado con éxito zonas de recarga considerando los criterios de geomorfología, geología, uso de suelo y cobertura vegetal, densidad de drenaje, pendiente, textura del suelo, transmisividad del acuífero y rendimiento específico del acuífero. De manera muy similar Biswajit y Subodh (2019) consideraron los factores de geología, geomorfología, pendiente, textura del suelo, uso de suelo y cobertura vegetal; sin embargo, para esta investigación, los autores consideraron también la frecuencia de estanques, al ser acciones implementadas en el área de estudio y que juegan un papel importante en la capacidad de recarga de la zona. Zimik et al. (2022) han llevado a cabo también la identificación de zonas de recarga a partir de la evaluación de factores como pendiente del terreno, uso de suelo y cobertura vegetal, tipo de suelo, geomorfología, geología o densidad de drenaje; aunque para su investigación han considerado también los factores de precipitación y densidad de lineamientos. Otros criterios que han sido considerados con frecuencia, además de los ya mencionados, son: las estructuras litológicas y espesor del acuífero (Jena, Kumar, Ramadas, Prasad, y Kishore, 2020); número de infiltración (Bravo et al., 2015); permeabilidad y espesor del suelo (Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh, 2013); profundidad del nivel freático, elevación del terreno y densidad de población (Alam et al., 2022); y porcentaje de arena en el suelo (Achu, Reghunath, y Thomas, 2019).

Por su parte, Kazakis (2018) ha desarrollado una amplia revisión a distintas investigaciones encaminadas a determinar los sitios específicos para la implementación de acciones MAR, las cuales se fundamentan sobre todo en la determinación de zonas de recarga hídrica. A partir del análisis de veintinueve investigaciones por parte del autor es posible identificar que algunos de los parámetros que más frecuentemente se incluyen dentro de los análisis son: las unidades geomorfológicas, densidad de drenaje, material del acuífero, nivel del agua subterránea, geología, pendiente, lineamientos, calidad del agua, transmisividad del acuífero, uso del suelo y cobertura vegetal, densidad de drenaje, textura del suelo, porosidad efectiva, precipitación, presas existentes, y distancia a otros cuerpos de agua.

Además de la identificación de aquellos factores que en general han sido considerados y utilizados con mayor frecuencia y éxito en los análisis para identificar zonas potenciales de recarga hídrica y, por consiguiente, de sitios óptimos para la implementación de acciones de recarga hídrica; también es posible reconocer que en la mayoría de los estudios estos factores han sido definidos a partir de la experiencia de los investigadores o retomando aquellos considerados por otros autores en trabajos previos; sin embargo, es necesario hacer hincapié en que los criterios y el número de ellos que se vayan a considerar no siempre serán los mismos, sino que deberán seleccionarse en función del objetivo del análisis, por ejemplo, la identificación de zonas de recarga natural, la selección de sitios para la implementación de acciones de recarga, la estimación del potencial de recarga o la priorización de áreas para conservación, así como de las características geográficas y climáticas particulares de la zona de estudio.

Generación de capas temáticas

En esta etapa será común y sumamente útil la utilización de manera conjunta de información obtenida a través de sensores remotos y SIG; los cuales posibilitarán la generación de cartografía a partir de datos geográficos conocidos que ingresamos al software, o mediante la utilización de las distintas herramientas de geoprocésamiento integradas en los propios SIG. Como es posible de reconocer en distintas investigaciones, la mayoría de las capas temáticas son construidas a partir de los procesos de fotointerpretación, así como de escaneo, georectificación, digitalización o extracción de capas a partir de mapas preexistentes; ya que muchos de estos mapas son publicados por diferentes organizaciones gubernamentales y son de fácil acceso.

Estos procesos han sido utilizados sobre todo para la obtención de capas de geomorfología, geología/litología, lineamientos, edafología, transmisividad del acuífero, uso de suelo, y cobertura vegetal (v.g. Chowdhury, Jha, y Chowdary 2010; Singh et al. 2013; Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh 2013; Bravo et al. 2015; Kumar, Kant, y Jhariya 2016; Biswajit y Subodh, 2019; Ibrahim y Shatnawi 2022; Zimik et al. 2022).

Respecto a las capas de elevación topográfica (Alam et al., 2022) y pendiente del terreno, en la mayoría de los trabajos han sido generadas a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) (Singh et al. 2013; Bravo et al. 2015; Boughariou et al. 2015; Biswajit y Subodh 2019; Zghibi et al. 2020; Alam et al. 2022; Ibrahim y Shatnawi 2022; Zimik et al. 2022; Hani et al. 2023); también se han identificado trabajos donde la pendiente ha sido generada a partir un mapa topográfico (Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh, 2013). Para la construcción de la capa de drenajes, el proceso habitual implica la digitalización y/o actualización de la red de drenaje del área de estudio a partir de mapas preexistentes (Chowdhury, Jha, y Chowdary, 2010), o en caso de no contar con dicho mapa, se recurre al desarrollo de la capa a partir de un MDE y las herramientas hidrológicas incorporadas en el SIG (Singh et al. 2013; Ibrahim y Shatnawi 2022; Zghibi et al. 2020; Alam et al. 2022; Zimik et al. 2022). En el caso de que se busque construir una capa temática de densidad de drenajes, se procede a dividir la capa de drenajes en unidades de análisis más pequeñas con el fin de determinar así la densidad en cada una, expresada en términos de longitud total de los canales por unidad de área (km/km^2) (Chowdhury, Jha, y Chowdary 2010; Bravo et al. 2015).

El procedimiento más empleado para desarrollar la capa temática de lineamientos se basa en la fotointerpretación y digitalización de una imagen satelital (Chowdhury, Jha, y Chowdary 2010; Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh 2013; Bravo et al. 2015; Zghibi et al. 2020; Zimik et al. 2022), mientras que la capa de densidad de lineamientos será construida de manera similar a la de densidad de drenajes (Bravo et al., 2015). En los estudios en los que se ha considerado la profundidad de nivel freático, la capa temática se ha desarrollado a partir de la información obtenida a partir de pozos de monitoreo (Kumar, Kant, y Jhariya 2016; Alam et al. 2022; Hani et al. 2023) y la aplicación de técnicas de interpolación (Kumar, Kant, y Jhariya, 2016). Mediante un proceso similar, la capa de precipitación es preparada en un SIG a partir de información climática recuperada de estaciones climáticas o departamentos meteorológicos (Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh 2013; Kumar, Kant, y Jhariya 2016; Zghibi et al. 2020) y construida a partir de la aplicación de técnicas de interpolación (Kumar, Kant, y Jhariya, 2016; Zghibi et al. 2020).

Reclasificación de las capas temáticas

Esta etapa podrá ser identificada también como estandarización (Hani et al., 2023), categorización (Jena et al., 2020) o reclasificación de capas temáticas (Bravo et al. 2015; Biswajit y Subodh 2019; Ibrahim y Shatnawi 2022), dentro de las distintas metodologías; y su objetivo será establecer una escala unificada cuyos valores serán asignados a las diferentes clases que componen las capas, posibilitando así la comparación entre capas (Hani et al., 2023). Ya que en este caso la finalidad del análisis es delimitar las zonas potenciales de recarga hídrica a partir del análisis conjunto de distintas capas temáticas, en la literatura se encontrará que la reclasificación de dichas capas se llevará a cabo asignando una escala que represente la aptitud/idoneidad de las distintas clases para la recarga hídrica (v.g. Singh et al. 2013; Biswajit y Subodh 2019; Ibrahim y Shatnawi, 2022; Hani et al. 2023).

Para la asignación de los valores de aptitud para la recarga hídrica de las diferentes clases que integran las capas, de manera generalizada, el proceso de reclasificación se realizará estableciendo la escala en común y asignando directamente los valores de aptitud para la recarga a cada clase tomando en consideración trabajos previos y la propia experiencia de los investigadores (Matus, Faustino, y Jiménez 2009; Boughariou et al. 2015; Bravo et al. 2015; Achu, Reghunath, y Thomas 2019; Zghibi et al. 2020; Alam et al. 2022; Zimik et al. 2022; Hani et al. 2023), aunque también se ha llevado a cabo con frecuencia la reclasificación adicional mediante la normalización de la escala mediante alguna técnica de toma de decisión multicriterio (del inglés *Multi-Criteria Decision Making*, MCDM) (Chowdhury, Jha, y Chowdary 2010; Singh et al. 2013; Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh 2013; Kumar, Kant, y Jhariya 2016; Biswajit y Subodh 2019; Jena et al. 2020; Ibrahim y Shatnawi 2022).

Respecto a la reclasificación de las distintas clases en la literatura se han empleado escalas de estandarización de entre 1 y 10 (Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh, 2013); entre 1 y 9 (Chowdhury, Jha, y Chowdary 2010; Singh, Panda, Kumar, y Shekmar 2013; Jena et al. 2020; Ibrahim y Shatnawi 2022; Zimik et al. 2022); entre 1 y 5 (Matus, Faustino, y Jiménez 2009; Bravo et al. 2015; Kumar, Kant, y Jhariya 2016; Biswajit y Subodh 2019; Zghibi et al. 2020; Alam et al. 2022); y entre 1 y 3 (Boughariou et al., 2015). En todos los casos, el valor de 1 se ha asignado a aquellas clases con menor aptitud/idoneidad para la recarga hídrica mientras que el valor más alto de la escala (10, 9, 5 o 3, según sea la escala utilizada) se ha asignado a las clases con mayor aptitud. Sea cual sea la escala utilizada, lo indispensable será que la reclasificación de todas las capas temáticas se realice bajo la misma escala de aptitud, así mismo será recomendable en esta misma etapa, que las capas temáticas ya reclasificadas sean

transformadas a formato raster (Zimik et al., 2022), lo cual resultara útil y necesario para llevar a cabo la superposición de las capas.

Ponderación de los criterios

La técnica AHP, por sus siglas en inglés de *Analytic Hierarchy Process*, desarrollado por Saaty (1980), es una técnica utilizada como método de apoyo para asignar pesos a los diversos temas y sus características dentro de los análisis destinados a delimitar zonas de recarga hídrica subterránea (Singh et al., 2013). Este método presenta ventajas significativas, por un lado, permite al usuario evaluar el peso relativo de múltiples criterios de manera intuitiva y hacer posible la toma de decisiones en grupo, donde los miembros del grupo pueden utilizar su experiencia, valores y conocimientos para desglosar un problema en jerarquías y luego resolverlo mediante los pasos del proceso AHP (Singh et al., 2013), y por otro, tiene la ventaja de poder comprobar la consistencia de las ponderaciones mediante un índice y relación de consistencia (Biswajit y Subodh, 2019). La técnica AHP se fundamenta, por lo tanto, en el contraste de los factores de control mediante una matriz de comparación por pares (Biswajit y Subodh, 2019); determinando los pesos de las distintas capas temáticas mediante un análisis de comparación por pares dependiendo de su importancia relativa en el proceso de recarga de agua subterránea (Jena et al., 2020).

A partir de la metodología propuesta por Saaty (1980) y retomada en distintos trabajos (v.g. Kumar, Kant, y Jhariya, 2016; Zghibi et al. 2020; Alam et al. 2022; Zimik et al. 2022), el proceso de la aplicación de la técnica AHP se compone fundamentalmente de nueve pasos (Velmerugan, Selvamuthukumar, y Manavalan, 2011): 1) definición del problema; 2) desarrollo de un modelo jerárquico; 3) construcción de una matriz de comparación por pares; 4) desarrollo de los juicios de comparación por pares; 5) sintetización de la comparación por pares; 6) verificación de la consistencia; 7) desarrollo de los pasos (3-6) para todos los niveles de jerarquía; 8) desarrollo del ranking general de prioridad y, 9) selección de la mejor alternativa. Bajo el objetivo que nos ocupa, el problema a resolver estaría definido como la identificación de las zonas potenciales de recarga hídrica subterránea; por lo tanto, el modelo jerárquico estaría conformado únicamente de dos niveles: el objetivo del análisis, que es la determinación de las zonas potenciales de recarga hídrica; y por los factores (capas temáticas) que influyen en la recarga hídrica.

La matriz de comparación por pares se lleva a cabo, por lo tanto, con los factores que determinan la recarga hídrica, usando la escala de importancia 1-9 propuesta por

Saaty (1980) (Tabla 6), asignando los pesos basados en la respuesta de los factores o capas temáticas a la recarga de agua subterránea a partir de la opinión de los investigadores y expertos que participen en el análisis (Chowdhury et al. 2009; Kumar, Kant, y Jhariya, 2016). Esta escala describirá, la influencia relativa de los parámetros, donde 1 denota igual influencia entre los parámetros, y 9, una extrema influencia de un parámetro sobre otro en el proceso de recarga subterránea (Zghibi et al., 2020).

Tabla 6. Escala de importancia 1-9 propuesta por Thomas Saaty. Recuperada de Alam et al. (2022).

Escala	Valor inverso	Valor decimal	Descripción de las preferencias
1	1/1	1.000	Igual importancia
2	1/2	0.500	Igual a moderada importancia
3	1/3	0.333	Moderada importancia
4	1/4	0.250	Moderada a fuerte importancia
5	1/5	0.200	Fuerte importancia
6	1/6	0.167	Fuerte a muy fuerte importancia
7	1/7	0.143	Muy fuerte importancia
8	1/8	0.125	Muy fuerte a extrema importancia
9	1/9	0.111	Extrema importancia

La comparación por pares se realizará mediante la siguiente matriz (Zghibi et al., 2020):

$$A = \begin{bmatrix} K & A_i & . & . & . & A_n \\ A_i & 1 & a_i & . & . & a_n \\ . & 1/a_i & 1 & . & . & . \\ . & . & . & 1 & . & . \\ . & . & . & . & 1 & . \\ A_n & 1/a_n & . & . & . & 1 \end{bmatrix}$$

Donde A : matriz de comparación por pares de A_i ; i : 1, 2, 3.... n para criterios K ; n : número de criterios de evaluación.

Una vez desarrollada la matriz por pares esta deberá de ser normalizada con el objetivo de calcular su eigenvector o vector de prioridades, el cual nos indicará el peso relativo de las capas temáticas. De acuerdo con Saaty (1980), la normalización de la matriz se lleva a cabo dividiendo los valores de las columnas entre la suma de la propia columna, y finalmente el eigenvector se obtendrá promediando los valores de cada fila de la matriz normalizada (Zimik et al., 2022). La normalización de la matriz está dada por la ecuación 1 (Zghibi et al., 2020).

$$X_{ij} = \frac{C_{ij}}{L_{ij}} \quad (1)$$

Donde X_{ij} es el valor normalizado de la matriz de comparación por pares en la fila i_{th} y la columna j_{th} , C_{ij} es el valor asignado a cada criterio en la fila i_{th} y la columna j_{th} , y L_{ij} es la suma total de la columna de la matriz de comparación por pares.

Ya que las comparaciones llevadas a cabo durante la construcción de la matriz de comparación por pares se ejecutan a través de juicios personales y subjetivos, es necesario verificar que dichos juicios sean consistentes. Para ello será preciso llevar a cabo una operación de verificación de consistencia para estimar el ratio de consistencia (CR) mediante los siguientes pasos (Velmerugan, Selvamuthukumar, y Manavalan, 2011): 1) cálculo del eigenvalor principal ($\lambda_{\max}$); 2) cálculo del índice de consistencia (CI); y 3) cálculo del ratio de consistencia (CR). Para calcular el eigenvalor ($\lambda_{\max}$) se utilizará la matriz de comparación por pares no normalizada; en un primer paso se multiplicará cada valor en las columnas por el peso del criterio de esa columna, a continuación, se sumarán los valores obtenidos por fila para obtener un nuevo vector el cual será dividido a su vez por su respectivo elemento del vector de prioridades; por último, se promediarán los nuevos valores obtenidos para obtener $\lambda_{\max}$ (Velmerugan, Selvamuthukumar, y Manavalan, 2011). De acuerdo con Saaty (1980), el valor del eigenvalor principal ($\lambda_{\max}$) deberá de ser mayor o igual al número de parámetros considerados (n), de lo contrario será necesario desarrollar una nueva matriz de comparación (Zimik et al., 2022).

Una vez determinada la consistencia del eigenvalor principal ($\lambda_{\max}$), ésta será verificada mediante el índice de consistencia (CI) y el ratio de consistencia (CR), los cuales están dados por las ecuaciones 2 y 3 (Velmerugan, Selvamuthukumar, y Manavalan 2011; Zghibi et al. 2020; Alam et al. 2022; Zimik et al. 2022).

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Donde, CI : índice de consistencia, λ_{max} : eigenvalor principal de la matriz, n : número de variables (capas temáticas), CR : ratio de consistencia, y RI : valor de índice aleatorio de acuerdo con el número de variables, el cual se obtiene a partir de la tabla 7.

Tabla 7. Índice de inconsistencia aleatorio. Recuperada de Zghibi et al. (2020).

n	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.49

De acuerdo con Saaty (1990) para que las decisiones sean consistentes el valor de CI es 0; sin embargo, esta consistencia podría ser tolerable mientras $CR < 0.1$. Así mismo, el valor aceptable de CR cambiará con base a las dimensiones de la matriz, siendo de $CR < 0.05$ para matrices 3x3; $CR < 0.09$ para matrices 4x4; y de $CR < 0.1$ para matrices mayores (Saaty, 1980). Por lo tanto, si el valor CR es mayor que 0.1, los juicios de comparación por pares deberán de evaluarse nuevamente (Zghibi et al., 2020).

Superposición de las capas temáticas reclasificadas

Una vez determinados los pesos de las capas temáticas, el último paso para delimitar las zonas de recarga hídrica implica la integración (superposición) de las capas temáticas reclasificadas usando el método de superposición ponderada (Chowdhury, Jha, y Chowdary 2010; Singh et al. 2013; Bravo et al. 2015; Kumar, Kant, y Jhariya 2016; Achu, Reghunath, y Thomas 2019; Biswajit y Subodh 2019; Jena et al. 2020; Zghibi et al. 2020; Alam et al. 2022; Zimik et al. 2022) en un ambiente SIG (v.g Chowdhury, Jha, y Chowdary 2010; Singh et al. 2013; Jena et al. 2020), utilizando el módulo de calculadora ráster (Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh 2013; Boughariou et al., 2015). Esta técnica espacial multicriterio se fundamenta en una sumatoria lineal ponderada que integra y depende de los pesos de cada factor, y está dada por la ecuación 4 (Alam et al., 2022).

$$SI = \sum W_i S_i \quad (4)$$

Donde SI : índice de aptitud para la recarga hídrica, W_i : peso del factor, y S_i : valor de aptitud para la recarga del factor. Como resultado de la aplicación de este proceso se obtendrá finalmente un mapa en formato ráster, el cual mostrará la aptitud para la recarga hídrica en distintas zonas del área de estudio de acuerdo con la escala de aptitud con la que fueron reclasificadas las capas temáticas.

5.3 Descripción del área de estudio: el AVL

Localización

El AVL, definido con la clave 1113 por la CONAGUA, se localiza en el centro de la República Mexicana, concretamente en el extremo occidental del estado de Guanajuato, entre los paralelos 20°52' y 21°21' latitud norte y los meridianos 101°25' y 101°50' de longitud oeste (CONAGUA, 2023), cubriendo una superficie de 1,336 km², aproximadamente (SMAOT, 2023). El acuífero limita al oeste con los municipios de Lagos de Moreno y Unión de San Antonio, en el estado de Jalisco; así como con los acuíferos Ocampo y Cuenca Alta del Río Laja, por el norte; Silao – Romita, por el este; y Río Turbio y La Muralla, por el sur (Figura 15). Geopolíticamente, el AVL comprende casi en su totalidad el municipio de León, porciones menores de Silao, Romita, y San Francisco del Rincón, así como áreas exiguas de San Felipe, Guanajuato, y Purísima del Rincón.

Por su parte, los límites naturales que colindan con el área de estudio son al noreste el flanco suroeste de la SG, al noroeste la depresión de Lagos de Moreno, al sureste los valles de Silao y Romita, y al suroeste el Valle del Río Turbio (Hernández-Laloth, 1991). Así mismo el AVL se ubica en el noroccidente y suroccidente de las provincias fisiográficas Eje Neovolcánico y Mesa del Centro, respectivamente (Hernández-Laloth, 1991). A continuación, se desarrollará una descripción más detallada de distintos parámetros que componen al sistema AVL, como clima, hidrología, litología, geomorfología, entre otros.

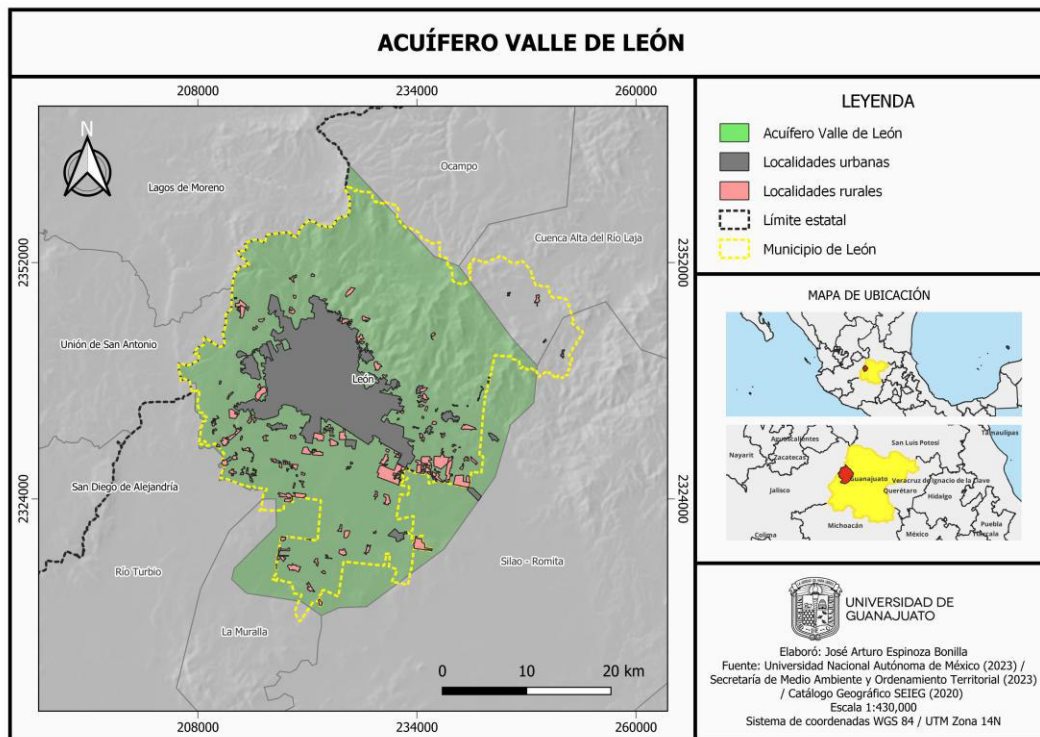


Figura 15. Acuífero Valle de León. Elaboración propia.

Fisiografía

El AVL se ubica en el noroccidente de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico y en el suroccidente de la Provincia Fisiográfica Mesa del Centro (Hernández-Laloth, 1991), también denominada Mesa Central (CONAGUA, 2023), ubicándose casi en su totalidad en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico. Con respecto a las subprovincias fisiográficas en el área de estudio, en la porción correspondiente a la Provincia Eje Neovolcánico, se han identificados dos: la subprovincia Bajío Guanajuatense, correspondiente a llanuras de aluviones profundos y lomeríos asociados a mesetas, y la cual ocupa la mayor parte del área; y en la subprovincia Altos de Jalisco, definida por un sistema de mesetas lávicas, y que solo ocupa una pequeña porción en la región noroccidental del acuífero (Hernández-Laloth 1991; CONAGUA 2023). Por otro lado, en la porción de la provincia Mesa Central, se presenta únicamente la subprovincia Discontinuidad Sierra de Guanajuato,

caracterizada por la forma convexa de sus valles, separados entre sí por áreas planas en sus partes altas (Hernández-Laloth 1991; CONAGUA 2023).

Hidrografía

Como resultado de su geomorfología diversa, el territorio mexicano se ha dividido naturalmente en 1,471 cuencas hidrográficas que, con propósitos administrativos, la CONAGUA ha reunido en 757 cuencas hidrológicas, conformando a su vez 37 regiones hidrológicas agrupadas en 13 regiones hidrológico-administrativas (CONAGUA, 2019). El AVL se ubica en la Región hidrológico-administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico, dentro de la subcuenca Presa Palote – Río Turbio o Cuenca Alta del Río Turbio, y la subcuenca Río Guanajuato (Figura 16), cuyas corrientes principales son el río de Los Gómez – Río Turbio, el río Guanajuato y el río Silao. Respecto al AVL, su corriente principal es el río de Los Gómez – Río Turbio (CONAGUA, 2023), el cual nace en la cuenca alta del río Turbio y escurre en dirección N-S hasta desembocar en las inmediaciones de la localidad “El Tecolote”; siendo un afluente importante del sistema fluvial río Lerma-lago de Chapala-río Santiago.

De acuerdo con la CEAG (2007), el río Turbio tiene como afluente principal al río de los Gómez, cuya descarga principal la recibe de la presa El Palote (estructura hidráulica más importante de la zona) a través del río Hacienda de Arriba y del arroyo Los Castillos, y la cual es alimentada principalmente de las corrientes provenientes de las inmediaciones de la Mesa Santiago (CEAG, 2007), el arroyo La Patiña (CEAG, 2007), así como por las corrientes intermitentes que descienden de la sierra (CONAGUA, 2023). El Río de los Gómez atraviesa la ciudad de León en dirección NO-SE y en su recorrido se le unen los arroyos El Muerto, Ojo de Agua de los Reyes, El Hueso, Alfaro y La Tinaja por la margen izquierda, y el arroyo Mariches por la margen derecha (CEAG, 2007). El río cambia de rumbo hacia el SO en el cruce con el Boulevard Francisco González Bocanegra en dirección a San Francisco del Rincón, pasando aguas abajo de la cortina de la presa El Maestranzo (Presa Blanca), donde se le unen varios arroyos, entre ellos el Hondo, el Verde y La Mora (CEAG, 2007). Más adelante atraviesa el bordo La Trinidad y la Presa San Germán, donde finalmente cambia de nombre a río León (CEAG, 2007) y sale de los límites del AVL para continuar en dirección SO hacia San Francisco del Rincón.

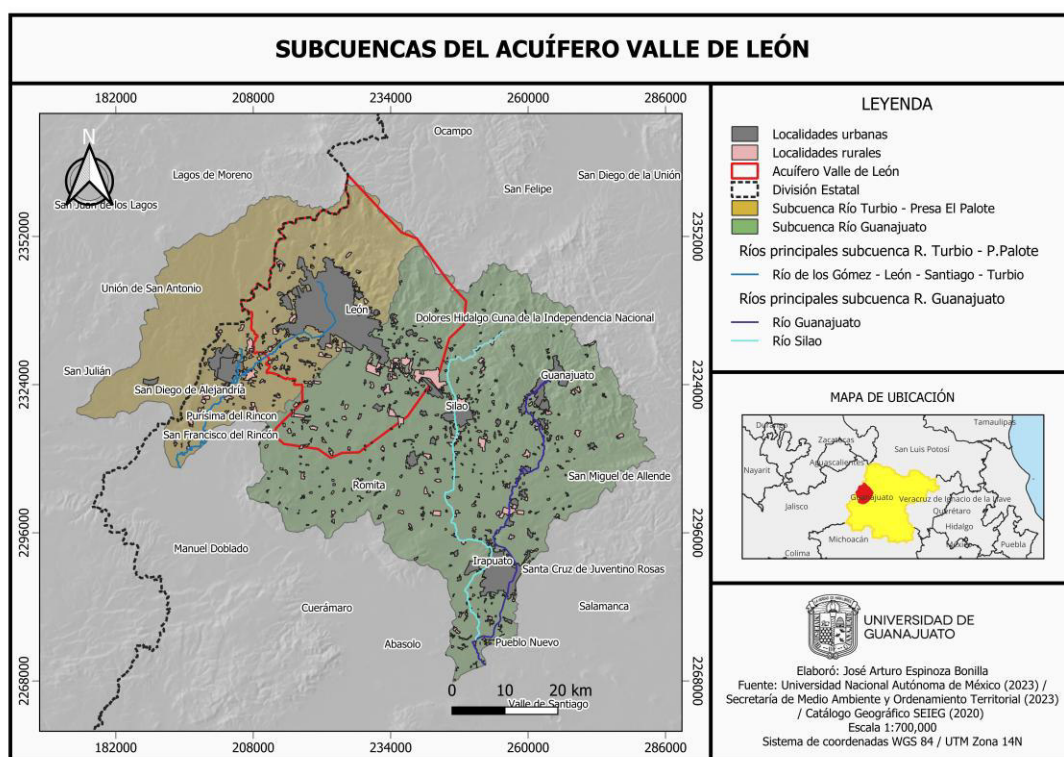


Figura 16. Subcuencas dentro del área comprendida por el AVL. Elaboración propia.

Clima

De acuerdo con la última actualización de la disponibilidad de agua en el AVL publicada por la CONAGUA (2023), en el área del acuífero se han identificado cinco tipos de climas según la clasificación de Köppen. Cabe mencionar que se han empleado estos datos climáticos, incluida la precipitación, para la descripción del área de estudio, ya que, a partir del estudio desarrollado por Ramos, Ortega, Martínez, y Ramírez (2017), se identifica que la temperatura media anual, así como la lluvia acumulada en el área comprendida por la Zona Metropolitana de León para los periodos 1971-2000 y 1981-2010, muestra una variación despreciable.

El tipo de clima BS1kw(w) semiseco semicálido se presenta en la porción central del área y se caracteriza porque la evaporación excede a la precipitación. Aquí la precipitación media anual oscila entre 600 y 700 mm, siendo su máxima incidencia durante el mes de agosto, con un rango de 150 a 160 mm, y su incidencia mínima en mayo, con un índice menor de 10 mm. La temperatura media anual es de 19°C, con

un registro máximo de 24°C en el mes de mayo y un mínimo de 15°C en los meses de enero y diciembre.

En la porción inferior del área del acuífero y en las estribaciones topográficamente bajas del flanco suroccidental de la SG se presenta un clima semicálido subhúmedo (menor humedad) (A)C(w0)(w). En estas regiones la precipitación anual varía de 700 a 800 mm, siendo el mes de agosto el de máxima precipitación (160-170 mm) y febrero el de menor incidencia pluvial (menos de 5 mm). Respecto a la temperatura, la media anual es de 19°C, registrándose la mayor en el mes de mayo (24°C) y la menor en enero (15°C) (CONAGUA, 2023). Pasando a las partes más altas del área, en el flanco suroccidental de la Sierra de Guanajuato, se presenta un clima templado subhúmedo C(w0), con una precipitación media anual que fluctúa entre 700 y 800 mm, con la mayor incidencia de lluvias en el mes de agosto (170-180 mm) y la menor en febrero (5 mm), y una temperatura media anual de 17°C, con máxima en mayo (22°C) y mínima en el mes de enero (13°C) (CONAGUA, 2023).

El clima templado subhúmedo C(w1)(w) (intermedio en cuanto humedad) se presenta más al norte del área de estudio, con una precipitación media anual entre 700 y 800 mm y una temperatura media anual entre 16 y 18°C, con valores máximos de precipitación en el mes de julio (120 a 130 mm) y mínimos en febrero (menos de 10 mm), mientras que la temperatura máxima se registra en el mes de mayo (21 a 22°C) y la mínima en enero (11 a 12°C) (CONAGUA, 2023). Por último, el clima templado subhúmedo C(w2)(w) (humedad alta), se presenta en la región septentrional del acuífero, con una temperatura promedio de 12 a 18°C. En esta zona la precipitación anual es de 1,092 mm, siendo febrero el mes más seco y julio el más húmedo, con 228 mm de precipitación (CONAGUA, 2023). Respecto a los valores promedios anuales para toda la superficie del acuífero, estos son de 615 mm de precipitación, 18.2°C de temperatura y 615.6 mm de evaporación potencial (CONAGUA, 2023).

Uso de suelo y cobertura vegetal

Mediante el análisis de la capa temática de usos de suelo y vegetación para el año 2018 en el estado de Guanajuato (SMAOT, 2023), se identifica que de los aproximadamente 1,336 km² de superficie del acuífero se encuentran ocupados principalmente por 389.7 km² de agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes (29.17 %) y 293.03 km² (21.93 %) de asentamientos humanos, que incluye zonas urbanas, vialidades pavimentadas, industrias, e infraestructura mixta.

Otros usos de suelo y cobertura vegetal presentes en el área de estudio son: 174.64 km² de matorral subtropical (13.07 %); 151.47 km² de agricultura de riego (incluye riego eventual) (11.34 %); 105.82 km² de pastizal natural (incluye pastizal - huizachal) (7.92 %); 94.55 km² de pastizal inducido (7.08 %); 60.83 km² de bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea (bosque de encino perturbado) (4.55 %); 31.02 km² de matorral crasicaule con vegetación secundaria (matorral crasicaule perturbado) (2.32 %); 13.45 km² de cuerpos de agua (1 %); 11.13 km² sin vegetación aparente (0.83 %), que incluye sitios de disposición final de residuos sólidos, extracción de materiales pétreos, terracerías, y vegetación secundaria arbustiva herbácea; 4.51 km² de bosque de encino con vegetación primaria y secundaria arbórea (0.34 %); 4.21 km² de matorral crasicaule (0.32 %); 0.95 km² de mezquital (incluye huizachal) (0.07 %); y 0.68 km² de superficie sin vegetación, que corresponde a sitios de extracción (0.05 %) (SMAOT, 2023).

Edafología

A partir del análisis de la capa temática de edafología del estado de Guanajuato (SMAOT, 2023), se identifica que de los aproximadamente 1,336 km² de superficie del acuífero, los suelos predominantes son el Feozem háplico con 560.38 km² (41.94 %), el cual se caracteriza por presentar tonos oscuros y abundante materia orgánica en su capa superficial (INEGI, 1998); y Vertisol pélico, con una superficie de 478.27 km² (35.80 %), componiéndose de arcillas con tonalidades negras o grises (INEGI, 1998).

Otros suelos presentes en el área son: 81.924 km² de regosol éutrico (6.13 %); 64.00 km² de Planosol éutrico (4.79 %); 52.18 km² de Litosol (3.90 %); 31.83 km² de Feozem lúvico (2.38 %); 25.72 km² de Castañozem cálcico (1.92 %); 19.84 km² de Luvisol órtico (1.49 %); 6.80 km² de Chernozem lúvico (0.51 %); 6.38 km² de Planosol mólico (0.48 %); 3.65 km² de Castañozem lúvico (0.27 %); 3.30 km² de Feozem calcárico (0.25 %); y 1.76 km² de Fluvisol éutrico (0.13 %) (SMAOT, 2023).

Geomorfología

De acuerdo con Hernández-Laloth (1991), los parámetros geomorfológicos son indicadores relevantes de la relación que existe entre el escurrimiento del agua meteórica y el proceso de infiltración, por lo que se consideran de gran ayuda en la caracterización hidrogeológica de las unidades litológicas aflorantes, las cuales se

definirán como posibles o no posibles zonas potenciales de recarga. De acuerdo con la capa temática de países geomorfológicos (SMAOT, 2023) la zona delimitada por el AVL está integrada por cinco unidades bien definidas: Flancos Guanajuatenses de los Altos de Jalisco, Sierra de Guanajuato, Planicies de Silao, Sierra Cuatralba, y La Muralla.

Según Hernández-Laloth (1991) y CONAGUA (2023) La Unidad Sierra de Guanajuato es la zona montañosa más prominente del área, la cual en conjunto es muy abrupta y favorable para que en condiciones de gran precipitación al agua forme torrentes violentos, lo cual implica un alto índice de escurrimiento y una infiltración restringida; como prueba de ello es la presencia de presas, bordos y captadores de escurrimientos en la desembocadura de los cauces principales hacia la planicie. Por su parte, la Unidad Altos de Jalisco, está representada por un conjunto de lomas y mesetas de mediana elevación con relación a la unidad Sierra de Guanajuato, que se distribuyen en toda la porción occidental del área y en las partes topográficamente más altas del sur del valle. La pendiente tiende a ser suave en la cima de estas mesetas y fuerte en las laderas de estas, lo que aunado al fracturamiento que las afecta, les confiere gran capacidad de infiltración referencias.

Por último, la Unidad Zona del Bajío se distingue en dos áreas bien diferenciadas: Franja de transición (pie de monte), la cual es una faja transitoria entre las estribaciones montañosas y la planicie acumulativa de nivel de base del Valle de León, que supone la vía de infiltración de los escurrimientos que alcanzan esta unidad litoestratigráfica, y la Planicie acumulativa de nivel de base, la cual es la de mayor extensión superficial dentro del área de estudio. Ésta se considera una zona, a excepción del Río de Los Gómez, sin prácticamente drenaje, con un terreno casi horizontal que tiende a 0 grados, y la cual capta el mayor volumen de agua de riego proveniente del acuífero y de las aguas negras distribuidas a través de los canales de conducción (Hernández-Laloth, 1991; CONAGUA, 2023).

Geología

Las unidades litoestratigráficas aflorantes en el AVL se han agrupado en tres grandes grupos con base en la relación entre la litología y los factores geomorfológicos dominantes (Hernández-Laloth, 1991): Unidad Sierra de Guanajuato, Unidad Altos de Jalisco, y Unidad Zona del Bajío. Respecto a la Unidad Sierra de Guanajuato, aunque en conjunto presenta un alto índice de escurrimiento, se ha identificado que buena parte de estos escurrimientos terminan por integrarse al sistema de flujo de agua

subterránea (Hernández-Laloth, 1991). Esta unidad la constituyen, al menos superficialmente, las siguientes unidades litoestratigráficas (Hernández-Laloth, 1991): Piroxenita San Juan de Otates; Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato (calizas y lutitas en su componente sedimentario, y lavas basálticas, andesíticas y dacíticas, en su componente volcánico); Conjunto Plutónico La Luz (granito, diorita y tonalita); Granito Comanja; Conglomerado Guanajuato; Ignimbrita Cuatralba (toba masiva e ignimbrita riolítica); Basalto el Cubilete (basalto y andesita); y Gabro Arperos.

Respecto a la Unidad Altos de Jalisco, es una unidad hidrogeomorfológica que está fuertemente condicionada por fracturas y fallas, por lo que una parte importante del volumen de agua precipitada llega a formar parte del sistema hidrológico subterráneo (Hernández-Laloth, 1991). Sus unidades litoestratigráficas aflorantes son: Andesita Bernalejo; Ignimbrita Cuatralba (toba masiva e ignimbrita riolítica); Basalto Dos Aguas; y Basalto el Cubilete (basalto y andesita) (Hernández-Laloth, 1991).

Finalmente, la Unidad Zona del Bajío se encuentra constituida principalmente por depósitos de material medianamente consolidado (terciario granular indiferenciado constituido por conglomerados, areniscas, limolitas, lutitas y calizas) y no consolidados (aluvión) que agrupa gravas, arenas, limos, arcillas y suelo residual que afloran en su mayoría en las partes topográficamente más bajas del valle, siendo este último el de mayor extensión superficial dentro del Valle de León (Hernández-Laloth, 1991).

En lo referente a las fallas, se presentan tres sistemas de fallamiento normal con rumbos NW-SE, NE-SW y N-S, formadas durante el Paleoceno tardío-Eoceno temprano, Oligoceno, Post-oligoceno y Plioceno; y las cuales determinan el actual tamaño y geometría del AVL, así como el desarrollo de su patrón de flujo de agua subterránea (Hernández-Laloth, 1991). Respecto a las fracturas, estas se presentan bien desarrolladas y bastantes densas en las porciones presentes de la SG y los Altos de Jalisco. Siendo las rocas ignimbríticas, basaltos y andesitas, las que presentan el mayor fracturamiento, y con ello mayor potencial de infiltración; sin embargo los grandes volúmenes de escurrimiento en la zona de la SG permiten suponer que en esta zona las fracturas no son lo suficientemente profundas como para permitir una infiltración considerable, a diferencia de los Altos de Jalisco, donde el fracturamiento si parece ocupar un papel relevante en la infiltración de agua meteórica (Hernández-Laloth, 1991).

Hidrogeología

De acuerdo con CONAGUA (2023), el AVL es un sistema-acuífero libre, de tipo granular-fracturado, con doble porosidad, heterogéneo, y anisotrópico de continuidad hidráulica regional entre las unidades volcánicas, piroclásticas, vulcanosedimentarias y depósitos terrígenos. Tradicionalmente se han considerado dos zonas acuíferas para el valle de León (INEGI, 1998), una zona superior conformada por un medio granular de varios centenares de metros de espesor, constituido por sedimentos aluviales, tobas semicompactas y rocas de baja a mediana compactación; y otra inferior, de gran espesor, fracturada, y conformada por rocas volcánicas de composición riolítica y menor proporción basáltica CONAGUA (2023).

El autor Hernández-Laloth (1991) ha agrupado por su parte, las unidades hidrogeológicas impermeables e impermeables que componen el AVL. Cómo unidades impermeables se presentan: Piroxenita San Juan de Otates, Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato, Conjunto Plutónico La Luz, Granito Comanja, Conglomerado Guanajuato y Gabro Arperos; siendo unidades expuestas principalmente en el flanco suroccidental de la Sierra de Guanajuato, y que presentan gran potencial de escurrimiento de agua meteórica, misma que logra infiltrar al entrar en contacto con rocas de mejor permeabilidad. Por su parte las unidades hidrogeológicas permeables son: Andesita Bernalejo, Ignimbrita Cuatralba, Granular Indiferenciado, Basalto Dos Aguas, Basalto El Cubilete y la unidad de Aluvión; siendo estas últimas tres las unidades permeables que funcionan principalmente como zonas potenciales de infiltración. Como valores de conductividad hidráulica, el mismo autor ha identificado 0.23×10^{-4} m/s para la Unidad Terciario Granular Indiferenciado, en tanto que para los componentes ignimbrito y tobáceo de la unidad Ignimbrita Cuatralba los valores están en el orden de los 0.10×10^{-4} m/s y 0.19×10^{-4} m/s, respectivamente. Por su parte, la CONAGUA (2023) ha determinado valores de transmisividad para el acuífero que varían en el rango comprendido entre 0.1 y 14.0×10^{-3} m²/s (8.6 y 1210.0 m²/d).

Profundidad y elevación del nivel estático

Para el año 2013 la profundidad del nivel estático del AVL presentó valores de 50 a 160 m, que de manera general se incrementan conforme se asciende topográficamente, modificándose esta tendencia en la zona agrícola al sur de la ciudad de León, debido a la concentración de la extracción de agua subterránea

(CONAGUA, 2023). Los valores más profundos del nivel estático (entre 120 y 160 m) se registran en la porción central del acuífero, y al norte, hacia las estribaciones de la Sierra de Guanajuato, mientras que los niveles más someros (entre 50 y 70 m) se presentan en la región suroccidental del acuífero, entre las localidades Plan de Ayala y San Francisco del Rincón; en lo que respecta a la zona urbana de León, la profundidad del agua subterránea se sitúa entre los 80 y 100 m (CONAGUA, 2023).

Al igual que su profundidad, la elevación del nivel estático tiende a incrementarse hacia las elevaciones topográficas que delimitan el valle, situándose entre los 1,780 y 1,600 msnm, mostrando además dirección preferencial del flujo subterráneo concéntrica al centro del valle (CONAGUA, 2023). Respecto a su evolución, en el año 1970 se indicaba una máxima depresión del orden de los 1,737 msnm, y para el año de 1982 de 1,690 msnm (INEGI, 1998); lo que indica un descenso constante desde entonces. De acuerdo con la CONAGUA (2023), para el periodo 2006-2013, los mayores abatimientos de 20 a 30 m se registran en la zona agrícola ubicada en la porción central del valle, en las inmediaciones de los poblados Plan de Ayala y San Cristóbal, así como al noreste de Santa Ana del Conde, mientras que en las zonas restantes los abatimientos disminuyen gradualmente hasta desaparecer hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas que delimitan el acuífero; respecto a la zona urbana de León, el abatimiento promedio presenta un ritmo anual de 0.6 m (CONAGUA, 2023).

5.4 Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en el AVL

En la región comprendida por los límites del AVL ya se han llevado a cabo con anterioridad estudios dirigidos a identificar zonas de recarga hídrica. Un ejemplo relevante se presenta en la tesis *“Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero del Valle de León, Guanajuato”* desarrollada por Hernández-Laloth (1991), quien, mediante el análisis de indicadores como litología, topografía, mediciones piezométricas, manantiales, pozos brotantes y flujo base construyó un exhaustivo modelo conceptual del funcionamiento del sistema AVL. En dicha investigación se identificó que el sistema acuífero del Valle de León, junto con todas las partes topográficamente más altas que rodean al Valle del Río Turbio, se consideran que representan casi totalmente áreas de recarga de los sistemas

acuíferos del Valle de León y Valle del Río Turbio (Hernández-Laloth, 1991); siendo la región ubicada al noroeste del AVL, la que corresponde a los Altos de Jalisco, la de mayor potencial de recarga hídrica, esto por su litología condicionada por fracturas y fallas, así como la presencia de determinados rasgos indicadores propios de las zonas de recarga, como el movimiento descendente del agua subterránea, la relativa baja humedad por arriba de la zona saturada, las mínimas concentraciones de sólidos totales disueltos, la baja conductividad del agua subterránea, el nivel freático relativamente profundo, así como el incremento de los niveles estáticos conforme se incrementa la profundidad de los pozos (Hernández-Laloth, 1991). Ocurriendo la recarga principalmente a través de infiltración del agua meteórica hasta alcanzar la zona saturada (Hernández-Laloth, 1991).

Otro antecedente importante es el mapa de zonas de recarga de acuíferos del estado de Guanajuato desarrollado en el año 2018 por la CEAG (2018), en el que se definieron zonas de alta, media, y baja potencialidad de recarga a partir del análisis de los factores físicos de pendiente, textura del suelo, conductividad hidráulica, litología y densidad de drenaje (figura 17). Identificándose zonas poco extensas con alto potencial de recarga al suroeste del municipio de León, en los márgenes del río Turbio; una potencialidad media en el occidente, hacia la región de los Altos de Jalisco; y finalmente una potencialidad baja en el noreste, sur, y oriente del municipio. O también el *Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de León, Gto.* (Guysa, 1998); cuyas conclusiones son fundamentalmente las mismas que las propuestas por Hernández-Laloth (1991).

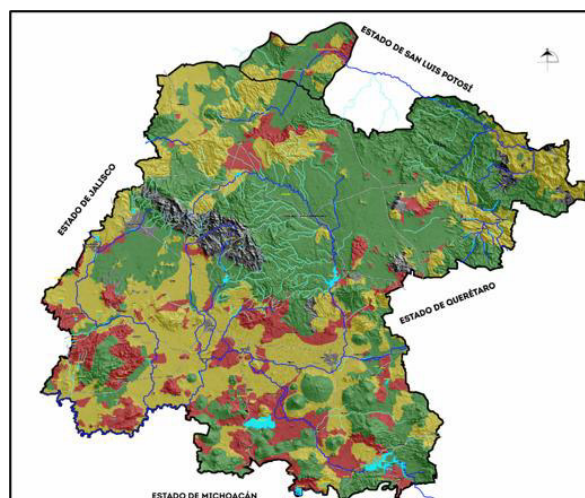


Figura 17. Zonas de recarga de acuíferos del estado de Guanajuato, en color rojo zonas con alta potencialidad, amarillo zonas con media potencialidad y verde zonas con baja potencialidad.

Recuperada de CEAG (2018).

Si bien estas investigaciones suponen un antecedente importante, a partir de tres consideraciones se ha juzgado pertinente conducir un nuevo análisis para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica para el AVL: 1) la diferencia de resultados obtenidos en el trabajo desarrollado por Hernández-Laloth (1991) y el mapa de recarga de acuíferos del estado de Guanajuato elaborado por la CEAG, en el que se identifican zonas de recarga al sur del AVL; 2) la escala del mapa elaborado por la CEAG, haciendo necesaria la elaboración de cartografía con mayor detalle al considerarse su utilización sobre todo para la implementación de pequeñas acciones de recarga hídrica en el AVL; y 3) la necesidad de considerar en un nuevo análisis otros factores que podrían resultar igualmente importantes para el proceso de infiltración hídrica en el área de estudio, como los rasgos geomorfológicos, la cobertura vegetal, uso de suelo o precipitación.

La delimitación de las zonas de recarga en el área de estudio se llevará a cabo de acuerdo con la metodología descrita ampliamente en el subcapítulo 5.2. Pues si bien existe evidencia de otras etapas y métodos que han sido consideradas por distintos investigadores, las etapas descritas han sido utilizadas exitosamente en un importante número de investigaciones encaminadas a la zonificación de áreas de recarga. Por lo tanto, la metodología propuesta para la identificación de zonas de recarga en el AVL se compone de las siguientes etapas.

1. Identificación de los criterios que determinan la recarga al AVL.
2. Elaboración de las capas temáticas de aquellos criterios que determinan la recarga al AVL.
3. Reclasificación de las capas temáticas de acuerdo con su aptitud para la recarga.
4. Ponderación de los criterios de acuerdo con importancia en el proceso de recarga.
5. Superposición ponderada de las capas temáticas reclasificadas para obtener un mapa de zonas potenciales de recarga hídrica para el AVL.

5.4.1 Criterios que determinan la recarga al AVL.

En el análisis de los factores biofísicos para identificar zonas de recarga del AVL, se determinó que los criterios más relevantes son:

- Pendiente del terreno. Debido a su gran variabilidad, desde zonas planas en el valle hasta áreas escarpadas al norte de León (Sierra de Lobos), lo que influye en el drenaje y la esorrentía.
- Tipo de suelo. Considerado relevante dada la diversidad de suelos en la zona de estudio, los cuales presentan distintas características hidrológicas.
- Litología. Factor determinante por la geología compleja y los sistemas de fallas y fracturas al norte del acuífero, que inciden en la infiltración.
- Geomorfología. Al presentarse tres grandes rasgos geomorfológicos que pueden condicionar la recarga: la Zona de los Altos de Jalisco, con alto grado de fracturamiento; la Sierra de Guanajuato, caracterizada por un elevado escurrimiento; y la Zona del Valle de León, con pendientes planas favorables a la infiltración.
- Densidad de drenaje. Que relaciona la longitud total de cauces con la superficie de la cuenca (González, 2004) y actúa como función inversa de la permeabilidad, indicando la idoneidad para la recarga (Singh, Panda, Kumar, y Shekmar, 2013).
- Uso de suelo y cobertura vegetal. Factor clave que controla la recarga natural (Alam et al., 2022), dada la diversidad de zonas urbanas, agrícolas, boscosas y sin cobertura en el municipio de León.
- Precipitación. Factor determinante por la extensión del acuífero (1,336 km²), donde se presentan cinco tipos de climas y cuatro zonas con distinta precipitación media anual.
- Densidad de lineamientos. Asociada a fallas y fracturas principalmente en los Altos de Jalisco y la SG (Hernández-Laloth, 1991), que influyen directamente en la recarga hídrica.

Algunos factores que fueron considerados inicialmente para el análisis, pero que han sido descartados son la *profundidad del nivel freático*, pues si bien en una cuenca con condiciones naturales poco alteradas este sería un importante indicador de zonas de recarga hídrica, el AVL ha experimentado durante años una intensa extracción mediante pozos y norias que ha generado un gran cono de abatimiento en la parte central del valle (Hernández-Laloth 1991), disminuyendo la relevancia de este criterio como indicador fiable; y la *transmisividad del acuífero*, que es la cantidad de agua subterránea que puede fluir a través de una unidad de área del acuífero en una unidad de tiempo (Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh, 2013); pues si bien puede ser considerado un indicador fundamental de la capacidad de recarga subterránea, para el caso concreto de la zona de estudio, la escasa información disponible sobre los parámetros hidráulicos en esta zona dificulta la incorporación de dicha capa temática al análisis multicriterio.

5.4.2 Generación de capas temáticas

Las capas temáticas serán construidas a partir de los procesos de fotointerpretación, así como de escaneo, georectificación, digitalización o extracción de capas a partir mapas preexistentes; ya que muchos de estos mapas son publicados por diferentes organizaciones gubernamentales y son de fácil acceso. Será sumamente útil también la utilización de manera conjunta de información obtenida a través de sensores remotos y SIG; los cuales posibilitarán la generación de cartografía a partir de datos geográficos conocidos que ingresamos al software, o mediante la utilización de las distintas herramientas de geoprocesamiento integradas en los propios SIG.

Para el AVL, los mapas de uso de suelo y cobertura vegetal, tipo de suelo, geomorfología y precipitación se elaboraron a partir de las capas temáticas correspondientes publicadas en el Subsistema de Información Geográfica, Medio Ambiente, Ordenamiento Territorial y Urbano [SIGMAOT] (SMAOT, 2023). La capa de uso de suelo y cobertura vegetal es representativa del año 2018, mientras que la información de precipitación corresponde a las isoyetas de las normales climatológicas 1990–2020 de la CONAGUA. La capa de pendientes fue generada a partir del mosaico elaborado con el MDE de INEGI (resolución de 5 metros). El mapa de litología se elaboró a partir de las cartas geológicas F14-7 y F14-10 del Servicio Geológico Mexicano [SGM] (2024). Mientras que las capas de densidad de drenaje y densidad de lineamientos se generaron en ArcGIS 10.4.1 utilizando el MDE y aplicando la herramienta *Line Density*.

Pendiente del terreno

Se ha utilizado el MDE y la herramienta de geoprocesamiento *Slope* incorporada en el SIG ArcGIS 10.4.1, obteniéndose la capa en grados, y reclasificándola en 10 clases de acuerdo con las clases de gradiente de la pendiente propuestas por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Tabla 8) en su guía para la descripción de suelos (FAO, 2009). Identificándose pendientes más escarpadas al norte del acuífero y pendientes más suaves en la región de las planicies aluviales (Figura 18).

Tabla 8. Clases de gradiente de la pendiente. Elaborada a partir de FAO (2009).

Clases	Descripción	%	°
01	Plano	0 - 0.2	0 - 0.11
02	Nivel	0.2 - 0.5	0.11 - 0.29
03	Cercano al nivel	0.5 - 1.0	0.29 - 0.57
04	Muy ligeramente inclinado	1.0 - 2.0	0.57 - 1.15
05	Ligeramente inclinado	2 - 5	1.15 - 2.86
06	Inclinado	5 - 10	2.86 - 5.71
07	Fuertemente inclinado	10 - 15	5.71 - 8.53
08	Moderadamente escarpado	15 - 30	8.53 - 16.70
09	Escarpado	30 - 60	16.70 - 30.96
10	Muy escarpado	> 60	> 30.96

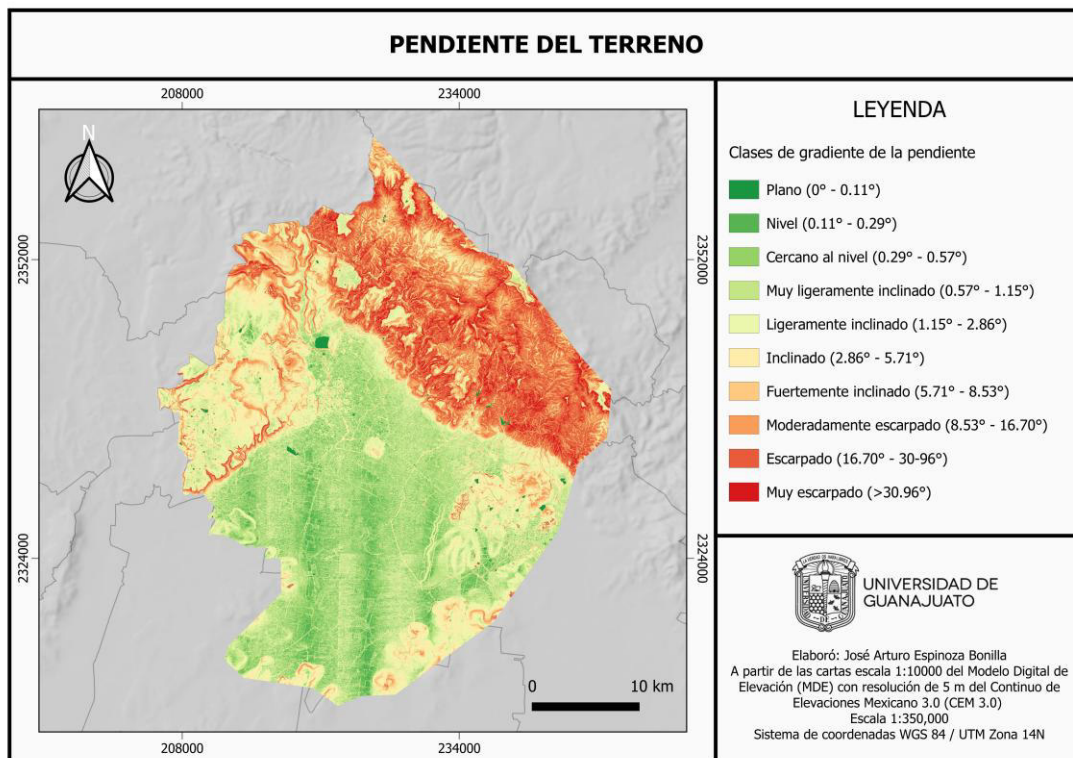


Figura 18. Capa temática de pendiente del terreno del AVL. Elaboración propia.

Tipo de suelo

Se identifican como suelos dominantes el Feozem háplico (41.94 %), con textura franca a franco-arcillosa y alto contenido de materia orgánica (INEGI, 1998), y el Vertisol pélico (35.80 %), caracterizado por arcillas expansivas que dificultan la infiltración. En menor proporción se encuentran Regosol éutrico (6.13 %), Planosol éutrico (4.79 %); Litosol (3.90 %); Feozem lúvico (2.38 %); Castañozem cálcico (1.92 %); Luvisol órtico (1.49 %); Chernozem lúvico (0.51 %); Planosol mólico (0.48 %); Castañozem lúvico (0.27 %); Feozem calcárico (0.25 %); y Fluvisol éutrico (0.13 %) (Figura 19).

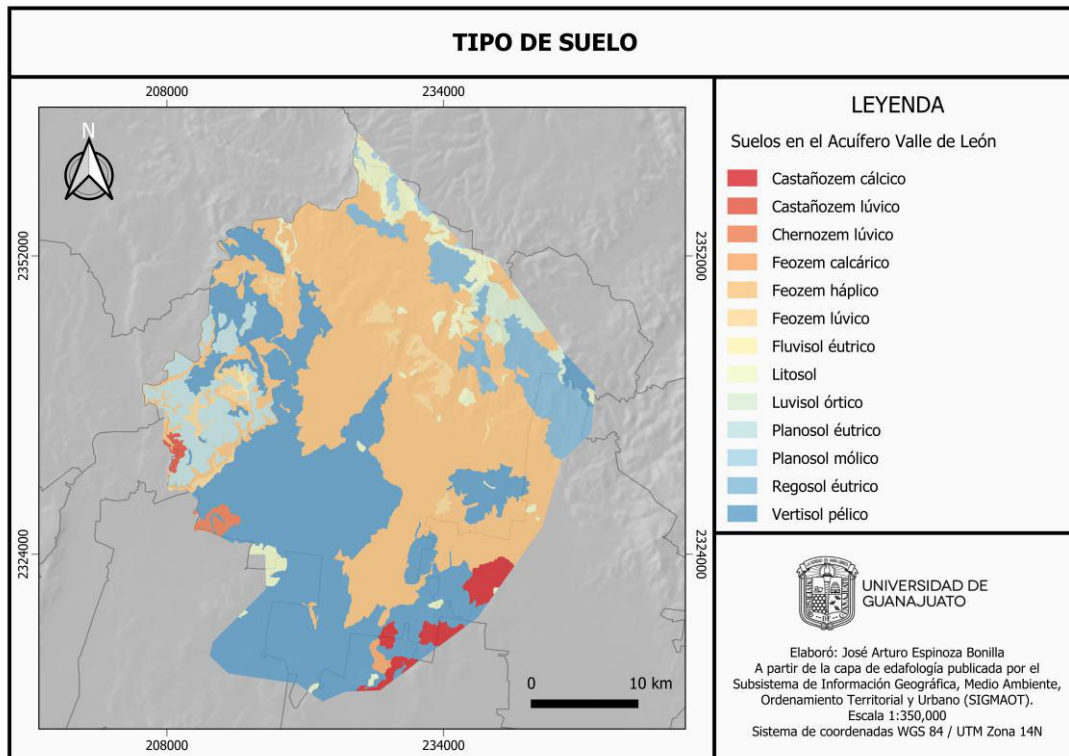


Figura 19. Capa temática de tipo de suelo del AVL. Elaboración propia.

Litología

Destaca la unidad Basalto Dos Aguas, afloramiento extenso y continuo de basalto de olivino al noroccidente de la ciudad de León, y la unidad Basaltos el Cubilete, afloramientos en forma concordante en el Cerro Gordo, al noroeste de la ciudad de León; ambos en la región de los Altos de Jalisco, al oeste y noroeste del acuífero, los cuales presentan fracturas bien desarrolladas y bastantes densas que parecen ocupar un papel relevante en la infiltración de agua meteórica (Figura 20).

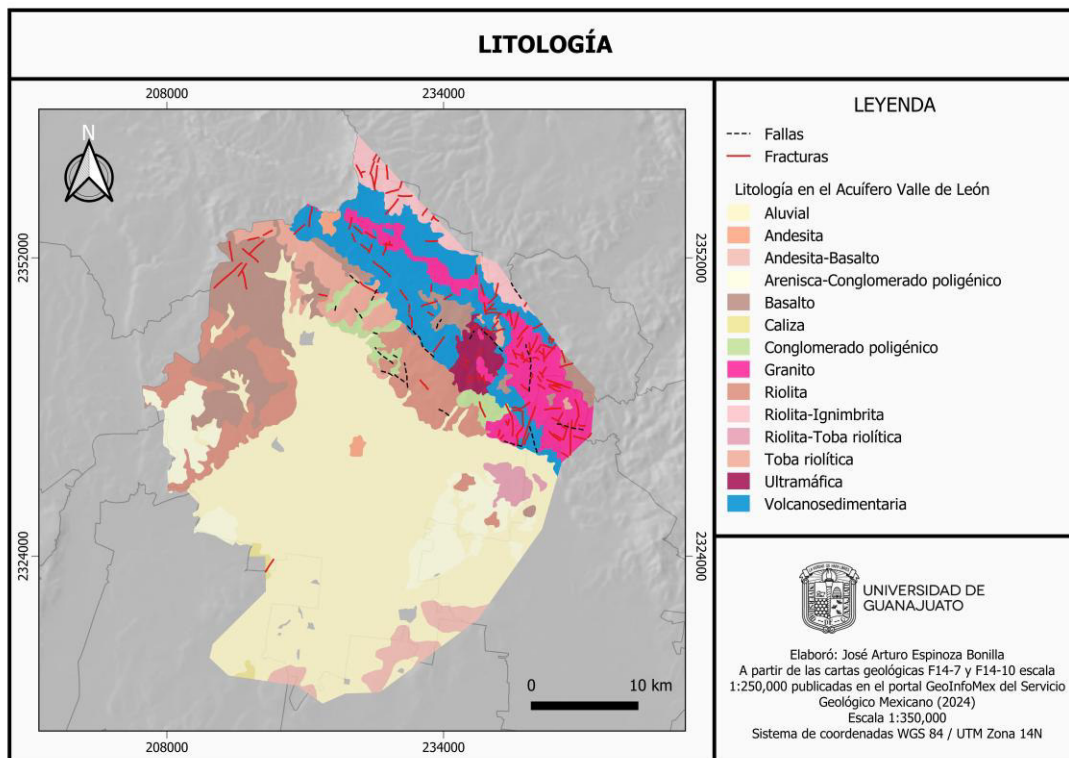


Figura 20. Capa temática de litología del AVL. Elaboración propia.

Geomorfología

Se identifican tres paisajes geomorfológicos predominantes (Figura 21): la Unidad Sierra de Guanajuato, muy abrupta, con alto índice de escurrimiento, y una infiltración restringida; la Unidad Altos de Jalisco, representada por un conjunto de lomas y mesetas de mediana elevación cuya pendiente tiende a ser suave en sus cima y fuerte en las laderas, lo que aunado al fracturamiento que las afecta, les confiere gran capacidad de infiltración; y finalmente la Unidad Zona del Bajío o Planicies de Silao, en la que se identifica una faja transitoria entre las estribaciones montañosas y la planicie acumulativa de nivel de base del Valle de León, que supone la vía de infiltración de los escurrimientos que alcanzan esta unidad litoestratigráfica (Hernández-Laloth, 1991; CONAGUA, 2023).

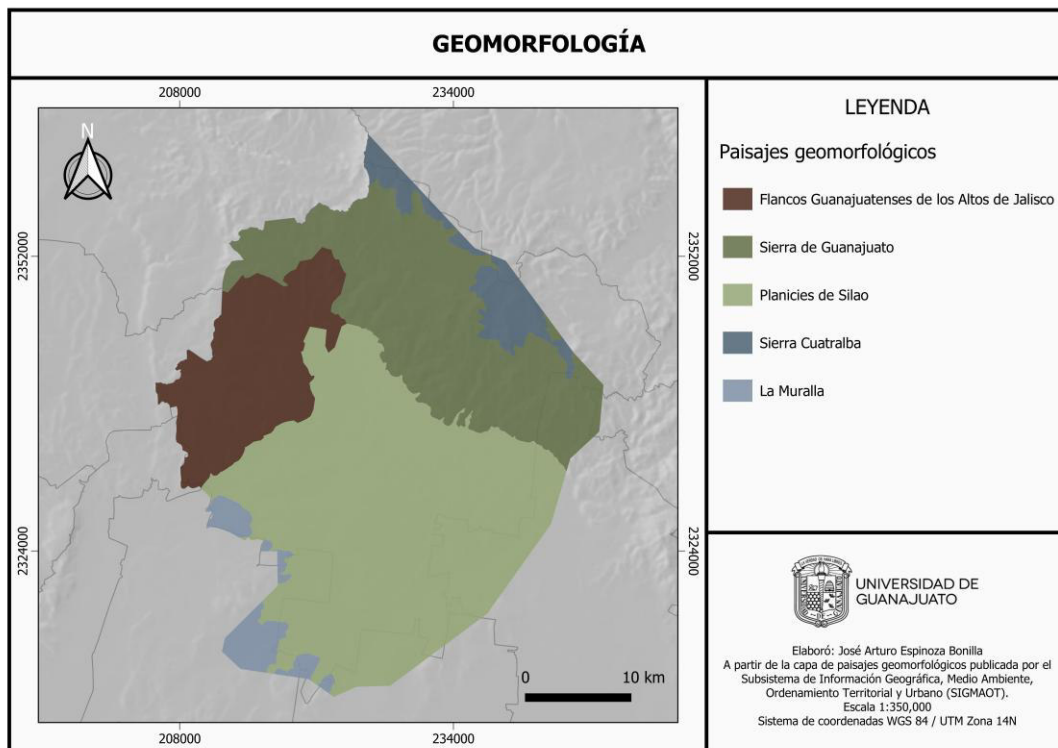


Figura 21. Capa temática de geomorfología del AVL. Elaboración propia.

Densidad de drenaje

Capa generada mediante la herramienta Line Density en ArcGIS10.4.1, identificándose una red hidrográfica de 2,124 km de longitud sobre 1,336 km² de superficie, lo que arroja una densidad media de 1.59 km/km². Las zonas de menor densidad (0–1 km/km²) corresponden al Valle de León, mientras que valores intermedios (1–2 km/km²) se ubican en los Altos de Jalisco y la franja de transición hacia la SG (Figura 22).

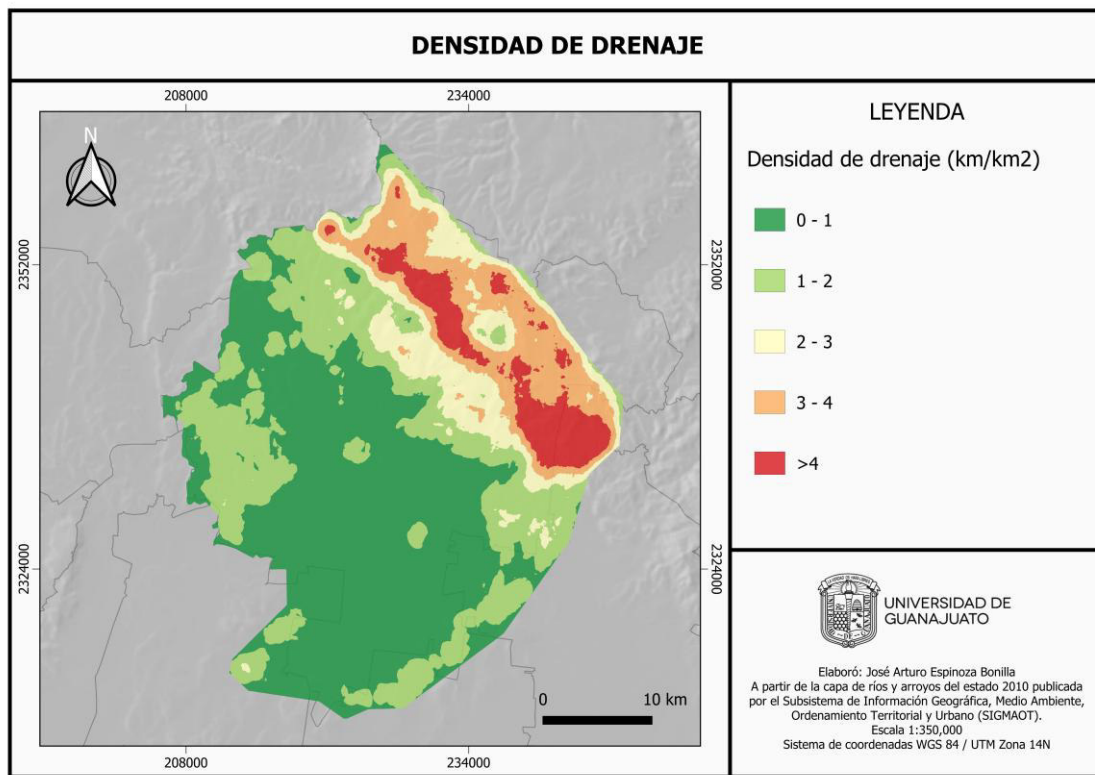


Figura 22. Capa temática de densidad de drenaje del AVL. Elaboración propia.

Uso de suelo y cobertura vegetal

Predomina la agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes (389.7 km²) y los asentamientos humanos (293.03 km²). Los otros usos de suelo o cobertura vegetal presentes son el matorral subtropical (174.64 km²); agricultura de riego (151.47 km²); pastizal natural (incluye pastizal - huizachal) (105.82 km²); pastizal inducido (94.55 km²); bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea (bosque de encino perturbado) (60.83 km²); matorral crasicaule con vegetación secundaria (matorral crasicaule perturbado) (31.02 km²); cuerpos de agua (13.45 km²); sin vegetación aparente que incluye sitios de disposición final de residuos sólidos, extracción de materiales pétreos, terracerías, y vegetación secundaria arbustiva herbácea (11.13 km²); bosque de encino con vegetación primaria y secundaria arbórea (4.51 km²); matorral crasicaule (4.21 km²); mezquital (incluye huizachal) (0.95 km²); y superficie sin vegetación que corresponde a sitios de extracción (0.68 km²) (Figura 23).

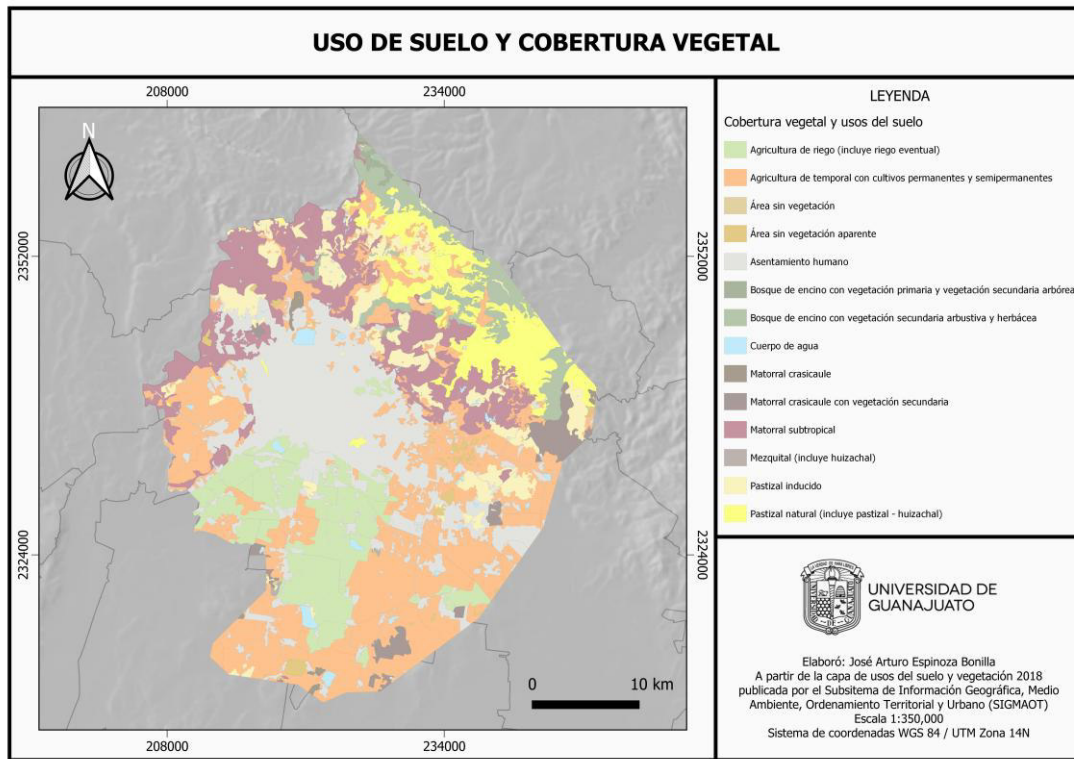


Figura 23. Capa temática de uso de suelo y cobertura vegetal del AVL. Elaboración propia.

Precipitación

Los valores de precipitación medial anual para el AVL son >800 mm en la Sierra de Guanajuato, ~800 mm en la franja de transición y zona sur (La Muralla), y 700 mm en el valle central (Figura 24).

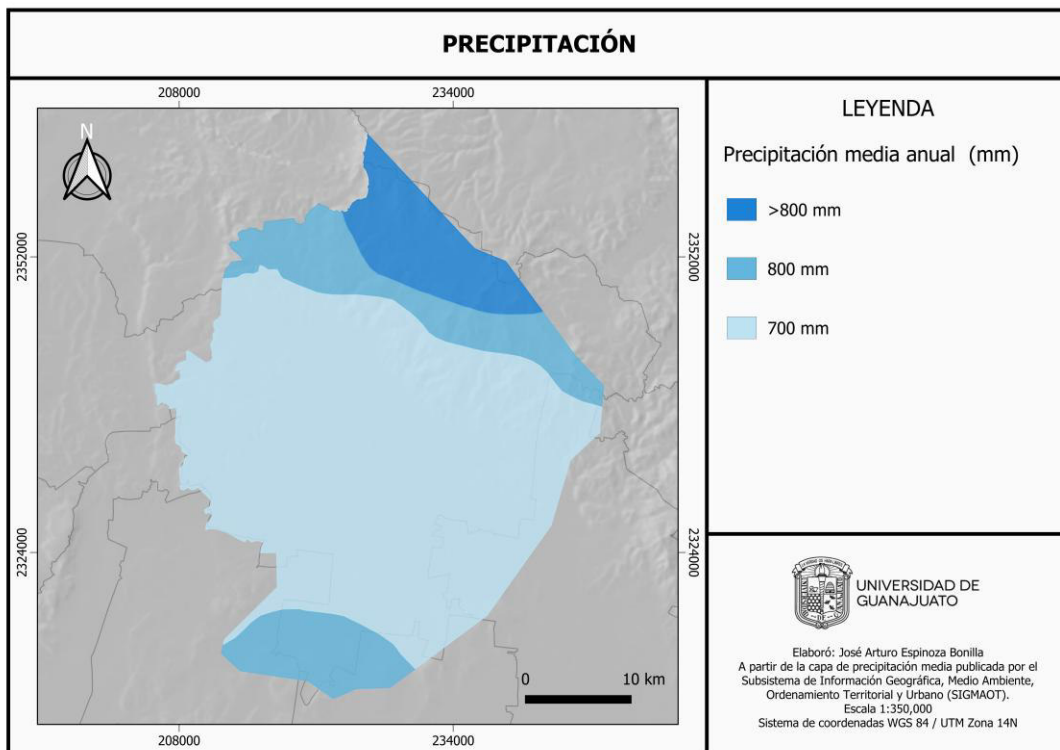


Figura 24. Capa temática de uso de suelo y cobertura vegetal del AVL. Elaboración propia.

Densidad de lineamientos

Generada mediante la herramienta Line Density en ArcGIS10.4.1, se identifican 187 km de lineamientos, con una densidad media de 140 m/km². La mayor concentración se presenta en la SG y Altos de Jalisco, mientras que el Valle de León carece de ellos (Figura 25).

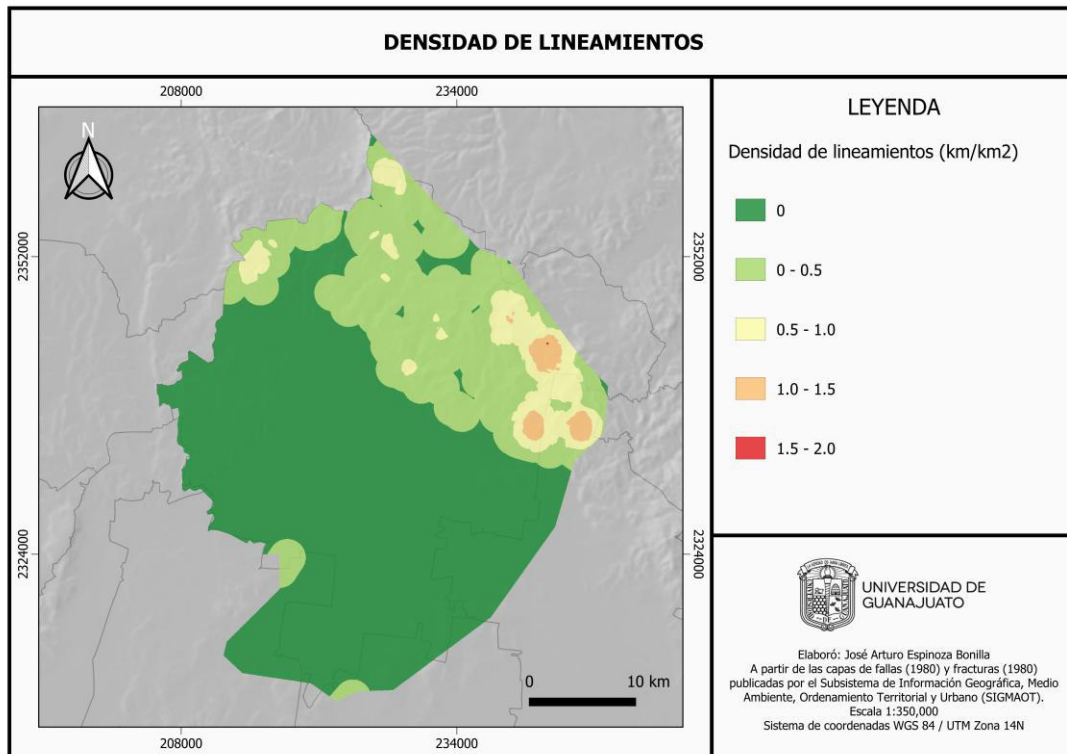


Figura 25. Capa temática de densidad de lineamientos del AVL. Elaboración propia.

5.4.3 Reclasificación de las capas temáticas

Las capas temáticas han sido normalizadas tomando en consideración las propias características biofísicas del AVL, así como los rangos y criterios utilizados satisfactoriamente en la literatura para reclasificar dichas capas de acuerdo con su aptitud para permitir la recarga de agua subterránea (Chowdhury et al., 2010; Singh et al., 2013; Peñuela et al., 2013; Kaliraj, Chandrasekar, y Magesh, 2013; Boughariou et al., 2015; Bravo et al., 2015; Kumar et al., 2016; Biswajit et al., 2019; Achu et al., 2019; Jena et al., 2020; Zghibi et al., 2020; Ibrahim et al., 2022; Alam et al., 2022; Zimik et al., 2022).

En concordancia con lo anterior y con el objetivo de normalizar los mapas, se ha optado por mantener una reclasificación a cinco clases, al ser una clasificación utilizada exitosamente por distintos autores (Matus et al., 2009; Bravo et al., 2015; Kumar et al., 2016; Biswajit et al., 2019; Zghibi et al., 2020; Alam et al., 2022). Las

clases propuestas oscilan de 1 a 5 o de menor capacidad para permitir la recarga a mayor capacidad para permitir la recarga, siendo estas: 1) Muy baja; 2) Baja; 3) Moderada; 4) Alta; y 5) Muy alta aptitud para la recarga hídrica.

En la pendiente, las superficies entre 0 y 2.86° recibieron la máxima calificación por favorecer la infiltración, mientras que las pendientes mayores a 11.31° obtuvieron la menor al propiciar el escurrimiento superficial. En el tipo de suelo, los Feozem háplico, Regosol éutrico, Chernozem lúvico y Fluvisol éutrico fueron considerados los más favorables por sus características de permeabilidad, mientras que los Planosoles, Castañozems y Litosoles recibieron la menor aptitud debido a sus limitaciones para la infiltración.

En la litología, el basalto obtuvo la mayor calificación por su elevado fracturamiento y permeabilidad secundaria, seguido de las unidades aluviales, andesíticas e ignimbríticas, mientras que las unidades graníticas, ultramáficas, conglomerados y volcanosedimentarias recibieron valores menores por su reducida capacidad de infiltración. Respecto al paisaje geomorfológico, los Altos de Jalisco fueron considerados la unidad más favorable por sus lomas fracturadas, seguidos por las Planicies de Silao, mientras que la Sierra de Guanajuato obtuvo la menor aptitud debido a sus fuertes pendientes y predominio del escurrimiento superficial.

Para la densidad de drenaje, las zonas con 0–1 km/km² recibieron la mayor calificación al favorecer la infiltración, mientras que densidades superiores a 4 km/km² se asociaron con una mayor evacuación superficial del agua. En el uso del suelo y cobertura vegetal, los bosques de encino obtuvieron la máxima aptitud por favorecer la infiltración y proteger el suelo; los matorrales y pastizales recibieron valores intermedios-altos; la agricultura una aptitud media; y los asentamientos humanos y cuerpos de agua la menor calificación por limitar la infiltración directa en el área de análisis. Finalmente, las zonas con precipitación superior a 800 mm anuales y con densidades de lineamientos entre 1.5 y 2.0 km/km² recibieron las mayores calificaciones al representar una mayor disponibilidad de agua y una mayor permeabilidad secundaria, respectivamente.

En la tabla 9 se muestran los distintos factores y sus clases para la reclasificación, mientras que en la figura 26 se presentan las distintas capas temáticas ya reclasificadas.

Tabla 9. Criterios reclasificados de acuerdo con su aptitud para la recarga hídrica. Elaboración propia.

Rango de la pendiente (°)	Aptitud para la recarga
0 - 2.86	5
2.86 - 5.71	4
5.71 - 8.53	3
8.53 - 11.31	2
>11.31	1
Tipo de suelo	Aptitud para la recarga
Feozem háplico, Regosol éutrico, Chernozem lúvico, Fluvisol éutrico.	4
Feozem lúvico, Feozem calcárico, Luvisol órtico.	3
Vertisol pélico.	2
Planosol éutrico, Planosol mólico, Castañozem cálcico, Castañozem lúvico, Litosol.	1
Litología	Aptitud para la recarga
Basalto.	5
Aluvial, Andesita, Arenisca-Conglomerado, Riolita, Riolita-Ignimbrita, Toba riolítica, No aplicable.	4
Caliza, Riolita-Toba riolítica.	3
Andesita-Basalto, Conglomerado poligénico, Granito, Ultramáfica, Volcanosedimentarias.	2
Paisaje geomorfológico	Aptitud para la recarga
Altos de Jalisco.	5
Planicies de Silao (Zona del Bajío).	4
Sierra Cuatralba, La Muralla.	2
Sierra de Guanajuato.	1
Densidad de drenaje (km/km²)	Aptitud para la recarga
0-1	5
1 - 2	4
2 - 3	3
3 - 4	2
> 4	1
Uso de suelo y cobertura vegetal	Aptitud para la recarga
Bosque de encino con vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea; Bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea.	5
Matorral crasicaule; Matorral crasicaule con vegetación secundaria; Matorral subtropical; Pastizal natural; Pastizal inducido.	4

Agricultura de riego; Agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes.	3
Área sin vegetación; Área sin vegetación aparente; Mezquital.	2
Asentamiento humano; cuerpo de agua.	1
Precipitación	Aptitud para la recarga
>800	5
700-800	4
Densidad de lineamientos (km/km2)	Aptitud para la recarga
1.5 - 2.0	5
1.0 - 1.5	4
0.5 - 1.0	3
0 - 0.5	2
0	1

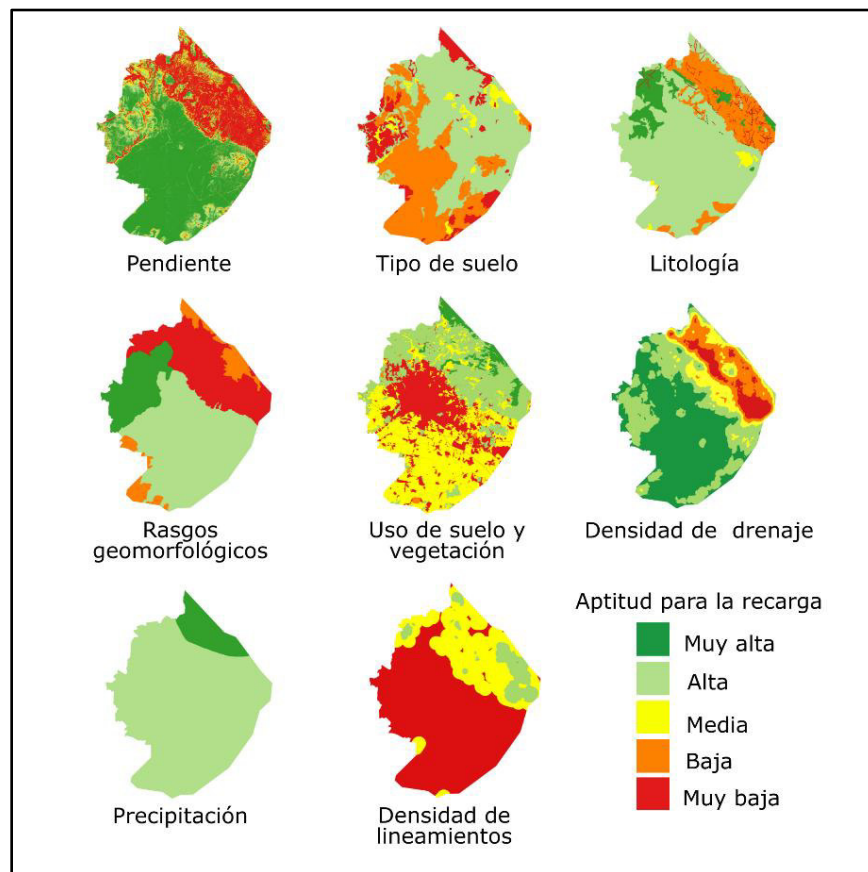


Figura 26. Capas temáticas reclasificadas de acuerdo con su aptitud para la recarga hídrica.
Elaboración propia.

5.4.4 Ponderación de los criterios

La ponderación de los ocho criterios ha sido llevada a cabo mediante la aplicación del proceso AHP desarrollado por Saaty (1980). Con el objetivo de optimizar esta etapa, se ha utilizado el software AHP-OS desarrollado por Goepel (2018); ya que entre sus funciones se encuentra la generación automática de la matriz de comparación por pares, la normalización de la matriz, la verificación de la consistencia, y el desarrollo del ranking general de prioridad (Goepel, 2018), además de ser un software accesible, fácil de usar y utilizado exitosamente en trabajos relevantes de priorización de indicadores (Chan et al., 2019).

La comparación de los criterios se llevó a cabo por seis académicos de la Universidad de Guanajuato expertos en hidrología, geología y gestión integral del agua familiarizados con el área de estudio. La importancia relativa de los distintos criterios (promedio de las seis ponderaciones) se muestra en la figura 27.

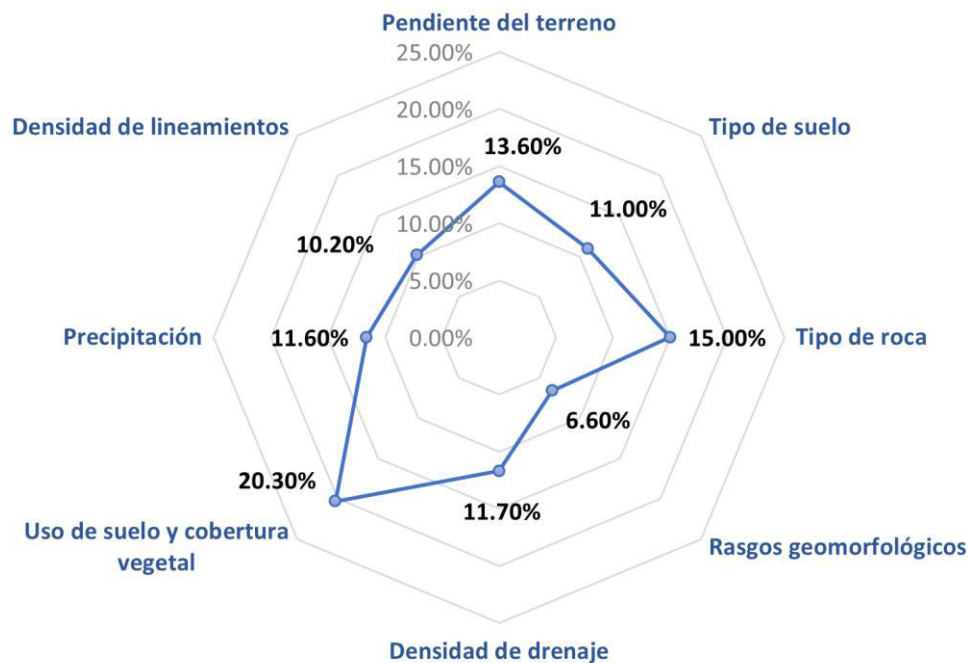


Figura 27. Peso relativo de los ocho criterios biofísicos en el proceso de recarga al AVL. Elaboración propia.

Las ponderaciones obtenidas en el presente estudio muestran una alta congruencia con las reportadas en distintas investigaciones. Destacan, por ejemplo, las correspondientes a la pendiente, con valores de 13 % (Singh et al., 2013), 12 % (Zimik et al., 2022) y 13 % (Jena et al., 2020); la densidad de drenaje, con 11 % (Singh et al., 2013), 10 % (Zimik et al., 2022), 10 % (Jena et al., 2020) y 9.6 % (Kaliraj, Chandrasekar y Magesh, 2013); la litología, con 18 % (Singh et al., 2013), 19 % (Zimik et al., 2022), 12 % (Jena et al., 2020) y 10.9 % (Kaliraj, Chandrasekar y Magesh, 2013); el uso del suelo, con 22 % (Jena et al., 2020); y la densidad de lineamientos, con 8 % (Zimik et al., 2022), 12 % (Jena et al., 2020) y 13.9 % (Kaliraj, Chandrasekar y Magesh, 2013).

En contraste, el estudio de Biswajit y Subodh (2019) es uno de los que presenta menores coincidencias con las ponderaciones obtenidas en esta investigación, al asignar valores de 6.8 %, 23 %, 7.8 %, 32 % y 11.11 % a la pendiente, tipo de suelo, litología, geomorfología y uso del suelo, respectivamente. Estas diferencias pueden atribuirse a las características particulares del área de estudio de dichos autores, la cual presenta una menor variabilidad de pendientes, la escasa diversidad de tipos de suelo, predominando aquellos con alta aptitud para la infiltración, o el predominio de rasgos geomorfológicos especialmente favorables para la recarga.

No obstante, en el presente análisis se optó por no considerar las ponderaciones, por sí mismas, como válidas o inválidas, ya que estas dependen de las condiciones específicas de cada área de estudio y de los objetivos de la investigación. En consecuencia, la atención se centró en verificar la consistencia de las comparaciones por pares empleadas para su obtención, la cual se evaluó mediante el ratio de consistencia (CR). En todos los casos se obtuvieron valores inferiores a 0.1 para cada participante e inferiores a 0.015 para la matriz grupal, lo que confirma la consistencia de los juicios emitidos y, por tanto, la confiabilidad de las ponderaciones obtenidas.

5.4.5 Superposición ponderada de las capas temáticas reclasificadas

Determinados los pesos de las capas temáticas, es momento de delimitar las zonas de recarga hídrica. Lo cual implica la integración de las capas temáticas reclasificadas usando el método de superposición ponderada (Chowdhury, Jha, y Chowdary 2010; Singh et al. 2013; Bravo et al. 2015; Kumar, Kant, y Jhariya 2016; Achu, Reghunath, y Thomas 2019; Biswajit y Subodh 2019; Jena et al. 2020; Zghibi et al. 2020; Alam et al. 2022; Zimik et al. 2022), el cual consiste en una sumatoria lineal ponderada que integra y depende de los pesos de cada factor, y está dada por la ecuación 5.

$$SI = \sum W_i S_i \quad (5)$$

Donde SI: índice de aptitud para la recarga hídrica, W_i : peso del factor, y S_i : valor de aptitud para la recarga del factor.

Para llevar a cabo dicho proceso se ha utilizado el módulo de *superposición ponderada* incorporado en el Sistema de Información Geográfica *ArcGIS*; redondeando a la baja hasta el entero más cercano el valor de las influencias, ya que estas se expresan solo mediante valores enteros (Esri, 2024). Como resultado de la aplicación de este proceso se ha generado la capa en formato ráster de aptitud para la recarga hídrica, a partir del cual se ha construido su respectivo mapa (Figura 28), el cual muestra la aptitud para la recarga hídrica en distintas zonas del área de estudio de acuerdo con la escala de aptitud (1-5) con la que fueron reclasificadas las capas temáticas.

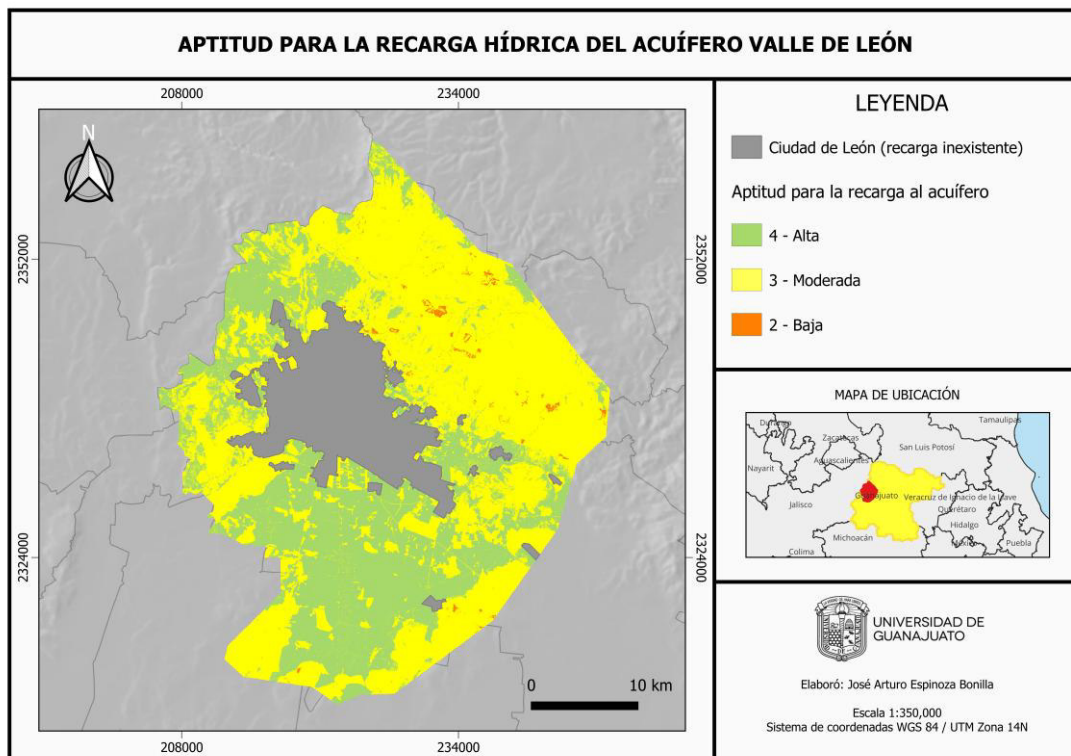


Figura 28. Mapa de aptitud para la recarga hídrica del AVL. Elaboración propia.

Como parte del análisis se ha identificado que de los 1,336 km² de superficie del AVL, 195.42 km² (14.70 %) corresponden a la zona urbana de la ciudad de León, la cual no presenta capacidad de infiltrar agua hacia el acuífero. Por otra parte, 1,139.51 km² (85.30 %) de la superficie del acuífero si presenta las condiciones biofísicas para llevar a cabo el proceso de infiltración y percolación al acuífero. Expuesto lo anterior, cabe mencionar que, una vez construido el mapa de aptitud de recarga hídrica, se ha identificado la ausencia de zonas con muy alta y muy baja aptitud para la recarga hídrica al acuífero (Tabla 10). Identificándose la predominancia de una aptitud moderada en 679.53 km², que representa el 59.63 % de la superficie del acuífero con posibilidad de recarga; cuya mayor extensión se ubica en la Sierra de Guanajuato, con porciones importantes también, en el flanco occidental y el extremo sur del acuífero. Le sigue una aptitud alta en 453.01 km² (39.75 %), distribuida sobre todo en la zona noroeste del acuífero, en la región de Los Altos de Jalisco, así como en la mitad meridional del área de estudio, la cual corresponde a las planicies aluviales del Valle de León; y finalmente se identifican 6.98 km² (0.61 %) con aptitud baja para la recarga, esto en sitios aislados, muy escarpados y de extensión menor en la Sierra de Guanajuato.

Tabla 10. Superficie ocupada por nivel de aptitud para la recarga hídrica. Elaboración propia.

Nivel de aptitud	Área (km ²)	% (de la superficie con posibilidad de recarga)
Muy alta	0	0
Alta	453.01	39.75
Moderada	679.53	59.63
Baja	6.98	0.61
Muy baja	0	0

Además del mapa de aptitud para la recarga, se elaboró un mapa de zonas con potencial de recarga hídrica hacia el AVL, en el que se muestran únicamente las áreas con un alto potencial de infiltración (Figura 29). Estas regiones pueden considerarse aptas para implementar acciones orientadas a favorecer y aumentar la recarga de agua al AVL, con un nivel elevado de certidumbre sobre su eficacia.

Estos resultados son especialmente útiles para la toma de decisiones en materia de políticas públicas, ya que ofrecen una base técnica para priorizar inversiones en

infraestructura adaptativa de captación e infiltración, focalizar programas de manejo territorial, establecer criterios de conservación de suelos y regular los usos del suelo en zonas estratégicas para la sustentabilidad hídrica del acuífero. En conjunto, contribuyen a definir lineamientos de planificación que permitan maximizar la eficiencia de las acciones de recarga dentro del AVL.

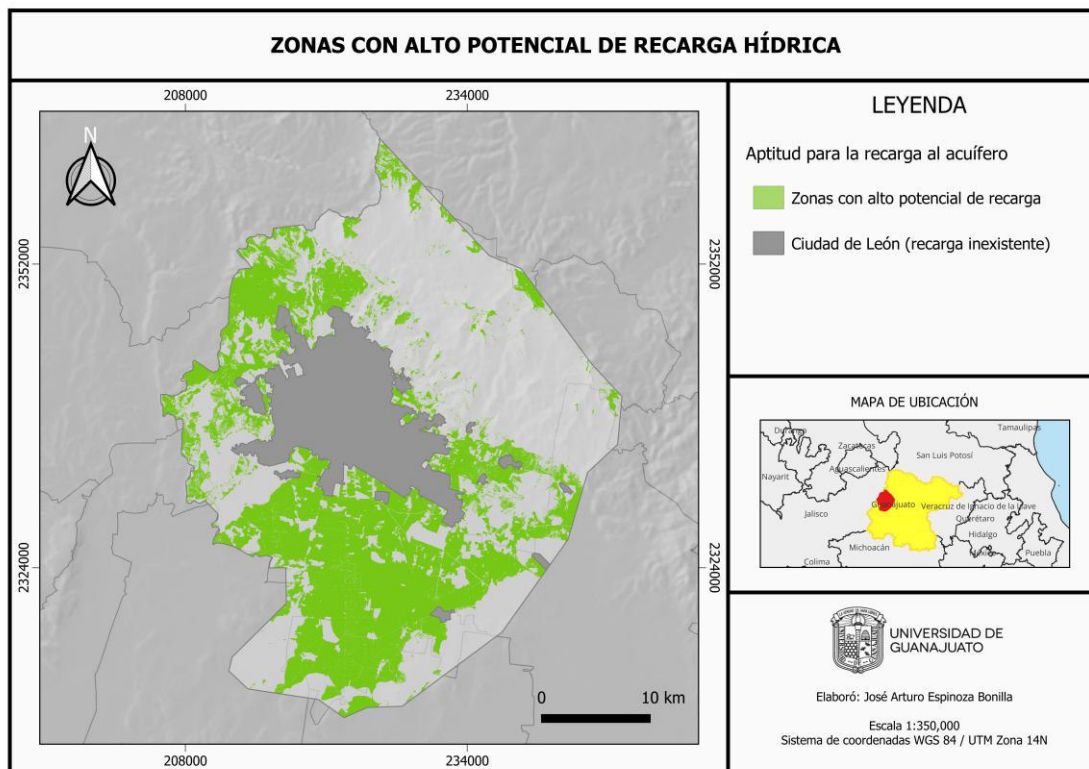


Figura 29. Zonas con alto potencial de recarga hídrica del AVL. Elaboración propia.

5.5 Sitios con alta viabilidad para albergar acciones de recarga

En el mapa de aptitud para la recarga hídrica del AVL, se han identificado 453.01 km² con alto potencial de recarga hídrica. Dentro de estas regiones, se han delimitado y propuesto cinco polígonos con superficies mayores a 10 km² y alta densidad de zonas con alta aptitud para la recarga hídrica, lo que los convierte en sitio de interés y

particularmente viables para la implementación a gran escala de acciones encaminadas a captar e infiltrar agua de lluvia para la mitigación en la sobreexplotación del AVL (Figura 30).

Los factores que se describen, además de la pendiente del terreno, es el tipo de suelo, la vegetación existente y el uso del suelo, los cuales son fundamentales para asegurar la sostenibilidad de las acciones propuestas.

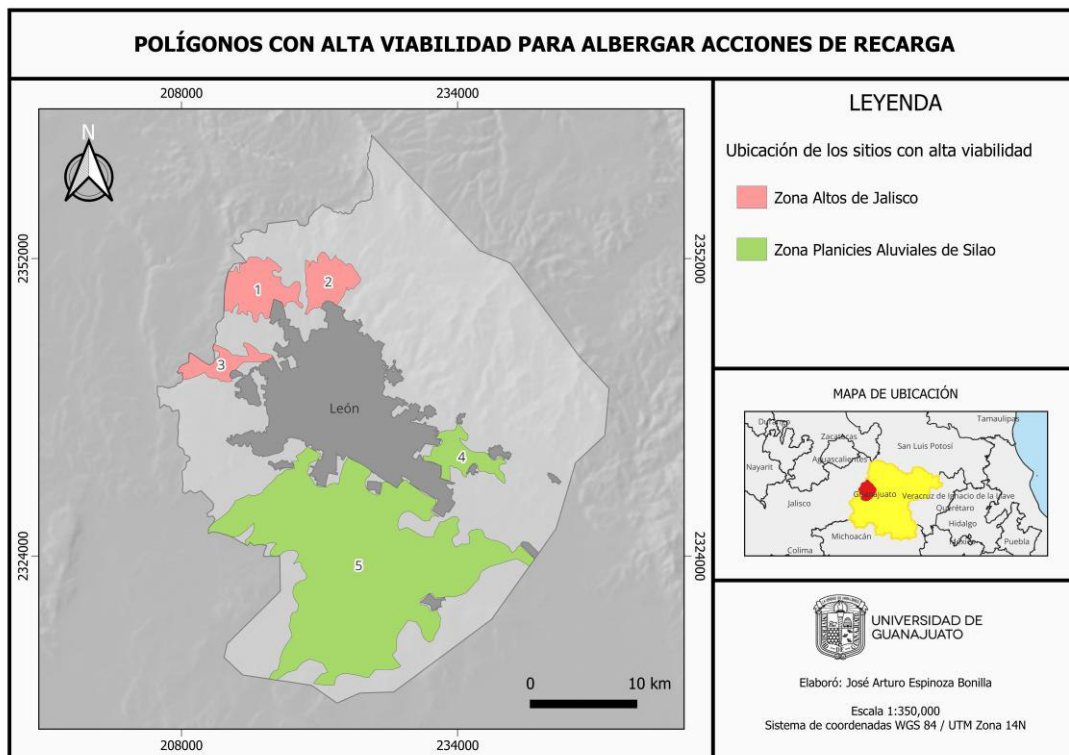


Figura 30. Polígonos con alta viabilidad para albergar acciones de recarga hídrica al AVL. Elaboración propia.

En la región de los Altos de Jalisco, al noroeste del acuífero, se identifican tres polígonos con una superficie conjunta de 58.71 km². En estos se presenta predominantemente una topografía suave, con pendientes que en su mayoría no superan los 10°, a excepción de zonas escarpadas de menor extensión en donde la pendiente puede alcanzar los 60°. La litología aflorante está conformada por basalto, riolita, toba riolítica y aluvial; siendo una zona donde las fallas y fracturas juegan un papel relevante que condicionan en buena parte la alta capacidad de recarga de esta

zona. Los suelos presentes son el Feozem háplico, Vertisol pélico, Feozem lúvico y Planosol éutrico. Con respecto al uso de suelo predomina el matorral subtropical, pastizal inducido, bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea, agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes, matorral crasicaule, y en extensión menor, asentamientos urbanos y zonas sin vegetación aparente asociadas a sitios de extracción de materiales pétreos.

En la porción oriental del AVL dentro de la unidad Planicies de Silao se ha delimitado un polígono de 17.34 km². Este polígono se caracteriza por un terreno de topografía suave, en el que predominan las pendientes menores a 1°, con algunos sitios de extensión menor con pendientes más inclinadas, entre 2° y 10°. Los suelos presentes son Feozem háplico y Vertisol pélico; mientras que la litología aflorante se compone en su totalidad por material aluvial. Relativo al uso de suelo y cobertura vegetal, predomina la agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes, aunque se identifican extensiones menores de asentamientos urbanos y zonas sin vegetación aparente asociadas a sitios de extracción de materiales pétreos.

El quinto y último polígono tiene una extensión de 294.17 km², y se encuentra ubicado también en la unidad Planicies de Silao. Presenta una topografía muy plana, con valores que rara vez superan 1° de pendiente. Dada su extensión, el suelo y demás parámetros biofísicos son diversos. Aunque los suelos predominantes son el Vertisol pélico y Feozem háplico, también se identifica la presencia de Chernozem lúvico, Feozem calcárico, Castañozem cálcico y Litosol. La litología se caracteriza por afloramientos de aluvial y arenisca-conglomerado. Mientras que la cobertura vegetal y uso de suelo se caracteriza por la existencia de zonas agrícolas de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes, así como de agricultura de riego; con extensiones menores correspondientes a asentamientos urbanos y cuerpos de agua.

5.6 Conclusión

Se ha llevado a cabo la identificación de las zonas potenciales de recarga hídrica para el AVL, quedando demostrada la utilidad de la información obtenida a través de sensores remotos, la utilización de SIG, así como el Análisis de Decisión Multicriterio como herramientas para la determinación de zonas de recarga y sitios viables para la implementación de acciones de captación y recarga hídrica. A partir del análisis de distintas investigaciones enfocadas a este objetivo, se ha identificado la metodología

que se ha utilizado con mayor éxito, la cual se compone fundamentalmente de cinco etapas: 1) identificación de criterios que determinan la recarga hídrica, 2) desarrollo de capas temáticas para los criterios identificados, 3) reclasificación de las capas temáticas de acuerdo con su aptitud para la recarga, 4) ponderación de los criterios para definir su importancia en el proceso de recarga, y 5) superposición de las capas temáticas reclasificadas considerando su ponderación para determinar las zonas de recarga.

Para el caso de estudio del AVL, los criterios identificados como de mayor relevancia en el proceso de recarga hídrica son: pendiente del terreno, tipo de suelo, litología, geomorfología, densidad de drenaje, uso de suelo y cobertura vegetal, precipitación, y densidad de lineamientos. Los cuales fueron jerarquizados mediante la aplicación de la técnica AHP a través del software AHP-OS, con la ayuda de seis expertos en gestión hídrica e hidrología familiarizados con el AVL. Los resultados del análisis AHP demostraron que el parámetro de mayor relevancia en el proceso de recarga al AVL es el uso de suelo y cobertura vegetal (20.3 %), seguido del tipo de roca (15.0 %), pendiente del terreno (13.6 %), densidad de drenaje (11.7 %), precipitación (11.6 %), tipo de suelo (11.0 %), densidad de lineamientos (10.2 %), y, por último, rasgos geomorfológicos (6.6 %).

El mapa de aptitud para la recarga hídrica al AVL muestra la existencia de 453.01 km² (39.75 % del área total con posibilidad de recarga) de superficie con alto potencial de recarga hídrica, ubicada en su mayoría en la zona noroeste del acuífero, en la región de Los Altos de Jalisco, así como en la mitad meridional del acuífero, la cual corresponde a las planicies aluviales del Valle de León; una región con escasa pendiente, con suelo de uso predominantemente agrícola, y constituido por material poco consolidado y de buen drenaje. De esta manera se han identificado los sitios en los que se podrían instrumentar acciones de recarga con un alto grado de eficacia. Además de estas regiones con alto potencial, destaca la identificación de 679.53 km² (59.63 %) con posibilidad moderada de recarga, sobre todo en la Sierra de Guanajuato, con porciones importantes también, en el flanco occidental y el extremo sur del acuífero; siendo regiones cuyas condiciones biofísicas actuales no son muy más aptas para la recarga, pero que sin embargo, no deberían de ser plenamente descartas para dicho fin, pudiéndose contemplar su remediación mediante acciones de recuperación o conservación de suelo y/o cobertura vegetal, las cuales permitirían mejorar las condiciones actuales, y en consecuencia, la aptitud para permitir la recarga natural al acuífero.

Destaca también la delimitación, a partir del mapa de zonas con alto potencial de recarga hídrica, de los polígonos con alta viabilidad para la albergar acciones de

captación y recarga hídrica al AVL. Se han identificado cinco polígonos con un superficie combinada de 370.22 km², tres de ellos en la zona de los Altos de Jalisco y dos en lo que corresponde a la unidad Planicies de Silao. Algunos parámetros biofísicos característicos de los polígonos ubicados en la zona de los Altos de Jalisco son las pendientes suaves que rara vez sobrepasan los 10°; la presencia de suelos Feozem háplico, Vertisol pélico y Feozem lúvico; el afloramiento de toba riolítica, basalto y riolita, con presencia de fallas y fracturas; así como un uso de suelo en el que predomina el matorral subtropical y el pastizal inducido, con extensiones menores de agricultura de temporal, asentamientos urbanos y zonas sin vegetación aparente. Mientras que en los polígonos de la zona de las Planicies de Silao se identifican terrenos con topografía más suave que rara vez sobrepasan 1° de pendiente; los suelos predominantes son el Vertisol pélico, Feozem háplico y Chernozem lúvico; la litología característica es el aluvial y la arenisca-conglomerado; y el uso de suelo es predominantemente para agricultura de temporal y agricultura de riego, con extensiones menores de asentamientos urbanos, cuerpos de agua y zonas sin vegetación aparente asociadas a sitios de extracción de materiales pétreos.

Destaca que los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con la zonificación de las áreas de recarga propuesta por Hernández-Laloth (1991), quien identifica las principales zonas de recarga del AVL al sur del acuífero y en la porción noroccidental, correspondiente a la región de Los Altos de Jalisco. No obstante, se observan discrepancias con el mapa elaborado por la CEAG (2018). Si bien ambos estudios coinciden en identificar un bajo potencial de recarga en la Sierra de Guanajuato, el mapa de la CEAG asigna una aptitud baja en la zona del valle de León, moderada a la región de Los Altos de Jalisco y alta a los márgenes del río Turbio en el extremo sur del acuífero. Aunque se conocen los parámetros considerados en dicha evaluación (pendiente, textura del suelo, conductividad hidráulica, litología y densidad de drenaje), no se dispone de información sobre la ponderación asignada a las distintas capas temáticas, lo que dificulta identificar el origen de estas diferencias.

Derivado de lo anterior, se considera pertinente que los estudios orientados específicamente a evaluar la viabilidad de implementar acciones locales y de pequeña escala para la recarga hídrica elaboren cartografía con un mayor nivel de detalle e incorporen en el análisis multicriterio la mayor cantidad posible de factores que intervienen en los procesos de infiltración, tales como los rasgos geomorfológicos, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la distribución espacial de la precipitación. Asimismo, resulta recomendable que se documenten y compartan las ponderaciones asignadas a cada uno de los criterios considerados en la evaluación multicriterio, con el fin de favorecer la reproducibilidad de los resultados y facilitar su comparación con estudios posteriores.

En conclusión, los resultados obtenidos en este capítulo aportan una base sólida para la planificación de estrategias de gestión hídrica en el AVL, al identificar con precisión las zonas con alto potencial para la recarga natural y aquellas que, aunque menos aptas, podrían mejorarse mediante acciones de restauración y conservación. La metodología aplicada, sustentada en investigaciones afines, herramientas tecnológicas avanzadas, y la experiencia de expertos en hidrología y gestión hídrica familiarizados con el área de estudio, proporciona un enfoque integral y replicable en otros sitios con problemáticas similares que facilita la toma de decisiones informadas para la conservación y recuperación del recurso hídrico. Este análisis representa, por lo tanto, un avance significativo hacia una gestión sustentable y eficiente del agua en la región, contribuyendo a disminuir la incertidumbre asociada a las acciones adaptativas de captación e infiltración hídrica, y manteniendo como objetivo final la seguridad hídrica y al bienestar de las comunidades dependientes del AVL.

6. SELECCIÓN Y PROPUESTA DE ACCIONES ADAPTATIVAS DE CAPTACIÓN E INFILTRACIÓN MAS VIABLES PARA MITIGAR LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL AVL

6.1 Introducción

Si bien en el capítulo 2 han sido expuestos distintos casos de éxito en la implementación de acciones adaptativas de captación e infiltración de agua de lluvia en México y el mundo; los cuales han demostrado la pertinencia de este nuevo paradigma de gestión hídrica; se plantea como objetivo del presente capítulo conducir un análisis a mayor profundidad para determinar aquellas acciones que, dadas las características físicas del área de estudio, así como las propias características técnicas requeridas para las distintas acciones, resultan particularmente viables de instrumentar en la región delimitada por el AVL, y más concretamente en las zonas con alto potencial de recarga. Contribuyendo así al objetivo de reducir la incertidumbre comúnmente asociada a la implementación de este tipo de acciones.

Con respecto a la estructura del presente capítulo, en el apartado 5.2 se aborda el termino MAR, siendo un término fundamental en el contexto de la GIRH y los Sistemas Adaptativos de Gestión del Agua, así mismo se exponen las categorías en las que la literatura especializada agrupa las principales tecnologías MAR. En el siguiente apartado se exploran los requerimientos esenciales para la implementación de acciones de recarga de acuíferos, realizándose la verificación para el AVL. En el subcapítulo 5.4 se conduce el análisis para identificar y proponer las acciones de recarga más viables y pertinentes para el área de estudio. Para ello se comienza por

llevar a cabo una descripción más profunda de las principales técnicas MAR, evaluándose la afinidad entre las características presentes en el área de estudio con las características sugeridas en la literatura para la implementación exitosa de dichas técnicas (e.g. tipo de suelo, pendiente del terreno, o cobertura vegetal); cómo también las características particulares de las distintas acciones (e.g. costo, dificultad para su construcción, o confiabilidad). Para realizar la elección definitiva de las acciones se propone la construcción de una “matriz de viabilidad”, en la que se evalúan cuantitativamente los parámetros examinados, asignándose una calificación entre 1 a 5 a cada parámetro de cada acción, de acuerdo con su afinidad con el área de estudio, o a su viabilidad de acuerdo con el grado en que dicha acción contribuya al cumplimiento del objetivo que se busca con su implementación.

Finalmente, una vez determinados los métodos de recarga más viables, el presente capítulo concluye con la identificación y propuesta de las locaciones exactas de implementación de estas acciones dentro de los polígonos con alto potencial de recarga hídrica propuestos en el capítulo 5, considerando exclusivamente los parámetros y rangos óptimos de implementación de estas acciones para los factores de pendiente del terreno, tipo de suelo y uso de suelo; al tratarse de factores determinantes para lograr una buena operabilidad de la gran mayoría de las técnicas MAR. Para dicho objetivo se ha empleado la herramienta de *superposición ponderada* en ArcGIS.

Cabe destacar que la metodología propuesta y los principales resultados del presente capítulo constituyen el artículo titulado “Identificación de zonas potenciales de recarga y priorización de técnicas de infiltración mediante análisis multicriterio: caso del acuífero Valle de León, México”, cuya publicación en la revista *Tecnología y Ciencias del Agua* está programada para el volumen 18, número 1, correspondiente al periodo enero-febrero de 2027.

6.2 Manejo de Recarga de Acuíferos

El termino MAR significa la introducción intencional de agua en los acuíferos para su subsecuente recuperación o para lograr un beneficio ambiental (Mendoza, 2017), por ello que este tipo de técnicas se implementen principalmente en zonas con déficit hídrico, pero también en sitios estratégicos para mejorar la calidad del agua contaminada por distintas fuentes, como la intrusión marina o la contaminación

inducida por el propio acuífero (Alam et al., 2021). Si bien el término MAR se utilizó por años como sinónimo del término “recarga artificial”, este último se limitaba a considerar como técnicas de recarga a la recarga artificial y recuperación (ARR), almacenamiento del agua en un acuífero y recuperación (ASR) y almacenamiento del agua en un acuífero, transferencia y recuperación (ASTR); mientras que el término MAR resulta más amplio, y toma en cuenta todas las técnicas de recarga de acuíferos (Mendoza, 2017). Además de esto, una posible connotación negativa del término “artificial” ha llevado a preferir el uso del término MAR (Dillon, 2005).

6.2.1 Principales técnicas MAR

De acuerdo con Gale (2005) las técnicas para aumentar la recarga del agua subterránea son tan variadas como el conocimiento de aquellos involucrados en su construcción y operación; sin embargo, la literatura general en tecnologías MAR agrupa las técnicas en cinco grandes categorías (Zhang, Xu, y Kanyere, 2020). Los autores Gale (2005), Mendoza (2017), y Zhang et al. (2020) describen brevemente estas categorías:

- **Métodos de dispersión:** También conocidos como de distribución (Gale, 2005; Mendoza, 2017), son los más comunes y económicos dentro de las técnicas MAR. Incluyen acciones como estanques y cuencas, tratamiento suelo-acuífero (TSA), inundación controlada, recarga por riego, entre otras. La recarga se logra por infiltración a través del material permeable de la superficie.
- **Modificaciones a canales:** Son técnicas que consisten en la modificación de ríos, arroyos y canales, para almacenar agua y aumentar la recarga vertical. Las modificaciones a canales consisten principalmente en la construcción de pequeñas presas, las cuales incluyen estanques de percolación, presas de arena para almacenamiento, presas subsuperficiales, entre otras.
- **Pozos y perforaciones:** Las técnicas de recarga con pozos están orientadas a infiltrar el agua a la zona saturada mediante perforaciones someras o profundas en regiones donde las capas superficiales tienen poca permeabilidad y los métodos de dispersión serían poco efectivos. Entre ellas se encuentra la técnica ASR y ASTR; la primera técnica implica la inyección y recuperación mediante el mismo pozo, mientras que, en la segunda, la inyección y recuperación se realizaría a través de pozos distintos.

- **Infiltración ribereña:** Esta categoría incluye infiltración ribereña e infiltración interdunar. La infiltración ribereña (RBF) consiste en extraer agua subterránea cerca de un río o lago para inducir la infiltración desde el cuerpo de agua superficial, y con ello mejorar la calidad del agua recuperada. En el caso de la filtración interdunar, es similar la infiltración ribereña, y se implementa en zonas costeras utilizando el valle que se forma entre las dunas, donde se acumulará y eventualmente infiltrará el agua.
- **Captación de agua de lluvia (cosecha):** Este grupo de tecnologías MAR es útil para restaurar el agua dentro del ciclo hidrológico en zonas urbanas, y consiste en interceptar el agua de lluvia, colectarla y almacenarla para posteriormente ser utilizada con diferentes propósitos. La recolección de agua de lluvia se realiza por lo general en techos de casas, desarrollos habitacionales, centros comerciales, edificios y áreas urbanas libres de contaminantes. En este grupo también se incluyen tecnologías como zanjas de infiltración, tinajas ciegas, surcos, anillos de agua, jagüeyes y terraplenes, los cuales son útiles en zonas abiertas y tienen como finalidad captar el agua de lluvia en la parte alta de la cuenca para infiltrarla, conducirla o almacenarla (Mendoza, 2017). En la tabla 11 se muestran las principales categorías y técnicas MAR.

Tabla 11. Principales técnicas MAR. Elaboración propia.

Categoría	Técnica MAR
Distribución	Cuencas y estanques de infiltración
	Tratamiento suelo-acuífero (TSA)
	Inundación controlada
	Riego
Modificaciones a canales	Estanques de percolación asociados a represas de control o represas de gaviones
	Presas de arena para almacenamiento
	Presas subsuperficiales (subterráneas)
	Liberación controlada de agua (represas perforadas)
Pozos y perforaciones	Pozos de recarga someros (pozos de absorción)
	ASR
	ASTR
Infiltración ribereña	Filtro de bancos de río (RBF)
	Filtración interdunar

Captación de agua de lluvia	Sistemas de captación de agua de lluvia
	Zanjas de infiltración, tinas ciegas, surcos, anillos de agua, jagüeyes, terraplenes, terrazas, etc.

6.3 Requerimientos esenciales para la implementación de acciones MAR

De acuerdo con Dillon et al (2022), los requerimientos esenciales para considerar la implementación de acciones de recarga de acuíferos son: 1) la existencia de la demanda suficiente del agua recuperada; 2) una fuente de agua adecuada para la recarga; 3) un acuífero adecuado para poder almacenar y eventualmente recuperar el agua; 4) el espacio de superficie suficiente para captar y tratar el agua, y 5) la capacidad de manejar el proyecto de manera efectiva.

Siguiendo la verificación de estos requerimientos para el AVL, ha quedado de manifiesto la existencia de las características hidrológicas necesarias para que exista el proceso de recarga hídrica sobre todo en la porción noroeste del acuífero, y la recuperación posterior de agua en las zonas de La Muralla y las Planicies de Silao; así como la demanda de agua suficiente para justificar firmemente la implementación de un proyecto MAR, considerando el déficit de 61,638,096 m³ que presentaba el acuífero en el año 2023, y el cual ha venido manteniendo una clara tendencia a aumentar (CONAGUA, 2023). Con respecto a la fuente de agua de recarga, se propone que las acciones de recarga utilicen como fuente de recarga el agua pluvial que naturalmente recarga al acuífero; pues ya que lo que se busca es únicamente favorecer la recarga natural y aumentar el volumen de agua infiltrada al AVL, se descarta inicialmente la utilización de agua tratada o recolectada en techos o azoteas, acciones que requerirían procesos de tratamiento adicionales, implicando un aumento en el tiempo, así como en el capital económico y humano necesario para su instrumentación; de ello que el agua pluvial que recarga naturalmente el acuífero suponga una fuente apropiada de agua de recarga.

Con relación al espacio disponible para la implementación de acciones de recarga para el AVL, destaca la identificación de 453.01 km² con las características biofísicas necesarias para que se presente una alta recarga hídrica al acuífero. Aunado a ello, en

el área delimitada por el AVL, el SMAOT ha definido zonas con Política Ambiental de Aprovechamiento Sustentable, Área Natural Protegida, Conservación, y Restauración (SMAOT, 2023) (Figura 31); siendo esta última, una política dirigida a zonas que han sufrido cambios estructurales en los ecosistemas y presentan un alto grado de fragmentación por la masificación de actividades antropogénicas o de cambio climático, y donde se promueve la aplicación de programas y actividades encaminados a recuperar o minimizar las afectaciones producidas que propicien la evolución y continuidad de los procesos naturales inherentes; por lo que resulta particularmente relevante para el estudio, pues refuerza la necesidad y pertinencia de incorporar acciones encaminadas a la recuperación ambiental de la zona, la cual, en conjunto con el mapa de zonas potenciales de recarga hídrica y el mapa de uso de suelo y cobertura vegetal, sugieren la existencia del espacio apto y necesario para captar e infiltrar el agua.

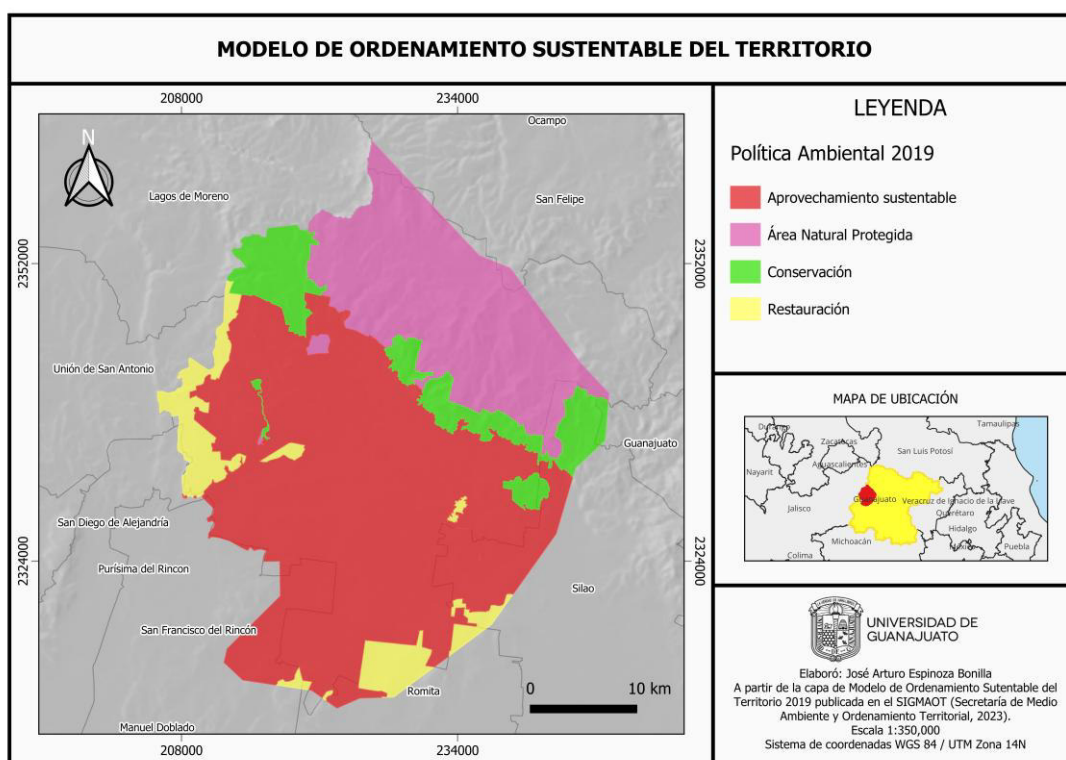


Figura 31. Modelo de Ordenamiento Sustentable del Territorio en el año 2019 para el AVL.
Elaboración propia.

En el capítulo 4.2 se ha descrito extensamente el papel que juegan las acciones adaptativas de captación e infiltración de agua de lluvia ante la sobreexplotación del AVL en la política hídrica del estado de Guanajuato y la ciudad de León; por lo que, en relación con la capacidad de manejar el proyecto de manera efectiva, a pesar de la escasa información, así como de la dificultad para conocer el grado de avance de las acciones propuestas de manera oficial, se advierte interés por parte de las autoridades estatales y municipales por migrar hacia un nuevo enfoque de gestión hídrica el cual incorpore acciones de esta naturaleza para mitigar la sobreexplotación del AVL; como demuestran las acciones propuestas en los Planes Estatales de Desarrollo Guanajuato, el Programa de Gobierno del Estado de Guanajuato 2018-2024, el PEDUOET 2040, el PMCC, o el Programa de Gobierno Municipal de León 2021-2024. De esto que, dada la relevancia y prioridad de la problemática que se busca atender, se considere pertinente, necesario y prácticamente innegable el respaldo institucional y económico por parte de las autoridades responsables de la gestión hídrica a nivel estatal y municipal para manejar un proyecto a gran escala de captación y recarga hídrica de manera efectiva, desde la etapa de diseño, hasta las etapas de implementación, adopción y mantenimiento.

6.4 Selección de métodos de recarga para el AVL

De acuerdo con Dillon (2005), el hecho de que una tecnología MAR cumpla su potencial como fuente alternativa de agua dependerá de la comprensión que se tenga sobre las capacidades y limitaciones de distintas técnicas MAR dentro de la cuenca y el sistema acuífero en relación con las necesidades de la zona de estudio, la infraestructura hidráulica existente, el espacio para la captación de agua, la legislación social y ambiental, y la destreza del propio personal alrededor del proyecto. Así mismo, la selección los de sitios aptos para la implementación de las técnicas MAR y la elección de las técnicas mismas dependerá de factores tales como la hidrología, topografía, hidrología, uso del suelo (Dillon et al., 2022), o inclusive los beneficios secundarios que la implementación de las acciones de recarga pudieran generar (Alam et al., 2021).

Por lo anterior es que será común encontrar técnicas MAR similares dentro de una misma área o región, gracias a los atributos físicos de la zona (Dillon et al., 2022).

Resulta relevante mencionar también que de acuerdo con lo estipulado en las directrices australianas para el reciclaje de agua (NRMMC, EPHC, NHMRC, 2009), la elección en la configuración y el tamaño de las acciones de recarga dependerá de parámetros como el espesor de la capa de baja permeabilidad, la tasa de infiltración requerida, la disponibilidad de tierra y su costo, la compatibilidad con otros usos de suelo, la facilidad de las rutas de acceso, la necesidad de evitar plagas de insectos o la atracción de aves, así como las características geomorfológicas requeridas por algunas acciones MAR.

En la literatura, se ofrecen algunas consideraciones aplicables a la gran mayoría de las acciones MAR para su implementación, por ejemplo, que los pozos de recarga son más comunes en zonas urbanas donde la tierra no está disponible para incorporar métodos de dispersión, así como en aquellas áreas, inclusive rurales, donde los acuíferos confinados suponen una mejor alternativa para almacenar agua que los acuíferos libres (Zheng, Ross, Villholth, y Dillon, 2021). Si bien consideraciones de este tipo suponen una guía útil en una primera búsqueda de las alternativas de recarga más pertinentes, resulta necesario considerar en la mayor de las posibilidades, las características biofísicas más relevantes presentes en la zona de estudio, así como los distintos parámetros sugeridos en la literatura para la elección óptima de las acciones (Dillon, 2005; NRMMC, EPHC, NHMRC, 2009).

Con el objetivo de identificar la opción más viable entre distintas acciones, Dillon (2005) y Dillon et al. (2009) emplearon un modelo subjetivo–cualitativo basado en la asignación de calificaciones a cada alternativa dentro de un portafolio de proyectos potenciales de abastecimiento de agua, entre los cuales se incluyen proyectos MAR. La evaluación de cada alternativa se realiza de acuerdo con el grado en que esta contribuye al cumplimiento de determinados objetivos sociales, ambientales o técnicos, tales como los costos de investigación, el nivel de conocimiento técnico requerido, la reducción de la demanda sobre fuentes de agua existentes, la mejora en la seguridad del abastecimiento o el volumen potencial de agua recuperada. A partir de esta valoración comparativa, se seleccionan las alternativas consideradas más convenientes. De manera similar, investigaciones desarrolladas por IGRAC–UNESCO (2007) y Espinoza (2022) llevaron a cabo procesos de evaluación y priorización de acciones de recarga hídrica mediante la asignación de calificaciones a las características más relevantes de las distintas opciones MAR consideradas. Estas calificaciones se otorgan en función de criterios como la viabilidad técnica, la pertinencia respecto al área de estudio, los costos de implementación, el conocimiento técnico requerido y la complejidad de operación y mantenimiento. Posteriormente, las alternativas con mayor puntuación media son consideradas como las más viables para su implementación.

Cabe destacar que el propósito principal de esta metodología es evidenciar que múltiples objetivos pueden y deben ser considerados simultáneamente dentro del proceso de evaluación. No obstante, también se reconoce que la asignación de puntuaciones posee un componente inherentemente subjetivo, ya que depende en gran medida del criterio técnico y la experiencia de la persona o grupo encargado de conducir el análisis. En consecuencia, las calificaciones asignadas pueden variar según el evaluador, el nivel de información disponible y el contexto específico del estudio. Sin embargo, se reconoce que esta metodología permite sustituir estas valoraciones cualitativas por métricas cuantitativas más específicas cuando se requiere un análisis de mayor profundidad, lo que le confiere flexibilidad para adaptarse a distintos niveles de información y detalle.

Por lo tanto, recuperando y adaptando esta herramienta, que ha demostrado ser útil y práctica para identificar la pertinencia y viabilidad de distintas acciones adaptativas de gestión hídrica, se ha propuesto conducir un análisis afín para la identificación y selección de las acciones adaptativas de recarga que se propondrá implementar en el AVL. Asimismo, se considera que esta metodología representa una alternativa conveniente debido a la relativa facilidad, rapidez y bajo costo con que puede llevarse a cabo, permitiendo eficientizar el proceso de evaluación y selección de acciones potenciales, particularmente en contextos donde la disponibilidad de información técnica, temporal o financiera es limitada. Como ya se ha mencionado anteriormente, las técnicas para aumentar la recarga del agua subterránea son tan variadas como el conocimiento mismo de aquellos involucrados en la construcción y operación de las acciones (Gale, 2005); y ya que el abanico de posibilidades respecto a las distintas técnicas y sus variantes es tan extenso, se propone llevar a cabo el análisis considerando únicamente las principales categorías y técnicas MAR.

6.4.1 Acciones de recarga hídrica: características y requerimientos

Las zonas con alto potencial de recarga del AVL se caracterizan por pendientes predominantemente suaves, generalmente menores a 10°, suelos de tipo Feozem háplico, Vertisol pélico y Feozem lúvico, así como una litología dominada por materiales aluviales, tobas riolíticas, basaltos y riolitas fracturadas. En cuanto al uso de suelo y cobertura vegetal, predominan los pastizales inducidos, bosques de encino con vegetación secundaria, matorrales subtropicales y crasicaule, así como áreas agrícolas de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes. Estas

condiciones favorecen principalmente la implementación de técnicas MAR basadas en infiltración superficial.

Dentro de la categoría de métodos de distribución, tecnologías como el tratamiento suelo-acuífero (TSA), la inundación controlada, el riego para recarga, las cuencas y los estanques de infiltración representan alternativas de interés debido a que constituyen algunas de las técnicas MAR más comunes y económicas, además de que permiten la infiltración del agua a través de materiales permeables superficiales (Casanova, Devau, y Pattenati, 2016). Estas acciones requieren generalmente superficies amplias con pendientes suaves, preferentemente entre 5 y 15 %, y no se recomienda su implementación en zonas urbanas densamente pobladas (United States Environmental Protection Agency, 2021; Alam et al., 2021; Tahoe Regional Planning Agency, 2014; California Department of Transportation, 2020).

Diversos estudios señalan que la mayoría de las experiencias MAR han sido implementadas en suelos moderadamente permeables, evitando tanto los materiales excesivamente impermeables como aquellos con infiltración excesivamente rápida que pudieran incrementar el riesgo de contaminación del acuífero (Alam et al., 2021; United States Environmental Protection Agency, 2021). Dentro de esta categoría destacan las cuencas y estanques de infiltración (figura 32), los cuales permiten almacenar temporalmente el agua en depresiones naturales o estructuras construidas para favorecer su infiltración hacia el acuífero (Mendoza, 2017). Su implementación se recomienda en terrenos con pendientes suaves y uniformes, aunque requieren mantenimiento periódico para prevenir problemas de colmatación derivados de la acumulación de sedimentos (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009; Government of India, 2007; FAO, 2025; United States Environmental Protection Agency, 2021).



Figura 32. Cuenca de infiltración. Recuperada de United States Environmental Protection Agency (2021).

Respecto a la recarga mediante riego, la amplia superficie agrícola existente en la porción meridional del AVL representa una oportunidad potencial para su aplicación. Aunque su capacidad de recarga suele ser menor que la de otras técnicas de distribución, el uso de infraestructura de irrigación ya existente puede reducir significativamente los costos de implementación (Alam et al., 2021). Sin embargo, aspectos relacionados con conflictos de uso de suelo, aceptación social y riesgos potenciales de contaminación limitan su pertinencia para el área de estudio (Technische Universität Dresden, 2018). Limitaciones similares presentan la inundación controlada y el tratamiento suelo-acuífero, este último con ventajas asociadas a la mejora de la calidad del agua durante el proceso de infiltración, aunque acompañado de mayores requerimientos de monitoreo y mantenimiento (Technische Universität Dresden, 2018; Casanova, Devau, y Pattenati, 2016).

La categoría MAR de modificaciones a canales comprende estructuras destinadas a interceptar o ralentizar los escurrimientos superficiales con el objetivo de favorecer la infiltración y la recarga de los acuíferos (Mendoza, 2017; Alam et al., 2021). Dentro de este grupo se incluyen las represas de control (figura 33), represas perforadas, presas de arena y presas subsuperficiales. Las represas de control y las represas perforadas promueven la infiltración en cauces efímeros o intermitentes al disminuir la velocidad del flujo superficial y reducir la erosión (Tahoe Regional Planning Agency, 2014; Page, Bekele, Vanderzalm, y Sidhu, 2018). Para su implementación se recomiendan terrenos con pendientes moderadas a fuertes, cauces con descarga natural y materiales permeables de textura gruesa (United States Environmental Protection Agency, 2021; Technische Universität Dresden, 2018; Alam et al., 2021).



Figura 33. Represas de control para recarga hídrica de distintas dimensiones. Recuperadas de Tahoe Regional Planning Agency (2014) y Lucas-Borja et al. (2021).

Aunque estas estructuras presentan costos relativamente bajos cuando se construyen bajo esquemas participativos (Mendoza-Cázares, Ramírez-León, y Puerto-Piedra, 2017), su efectividad depende del mantenimiento periódico, particularmente de la remoción de sedimentos y la reparación de elementos dañados (Tahoe Regional Planning Agency, 2014). Además, una posible falla estructural puede representar riesgos importantes aguas abajo, especialmente en obras permanentes o de gran tamaño (Technische Universität Dresden, 2018).

Las presas de arena constituyen otra alternativa dentro de esta categoría. Estas estructuras almacenan agua dentro de depósitos arenosos localizados en cauces de ríos o arroyos, reduciendo las pérdidas por evaporación y requiriendo relativamente poco mantenimiento (Mendoza, 2017; Maddrell y Neal, 2013; Technische Universität Dresden, 2018). Sin embargo, presentan limitaciones relacionadas con posibles conflictos de propiedad, contaminación y tasas de infiltración relativamente bajas (Technische Universität Dresden, 2018).

Por su parte, las presas subsuperficiales (figura 34) buscan elevar el nivel freático mediante barreras impermeables construidas bajo la superficie (Mendoza, 2017). Entre sus principales ventajas destacan la reducción de pérdidas por evaporación, la protección de la calidad del agua y la seguridad frente a posibles fallas estructurales (Ministry of the Environment, 2004; Vétérinaires Sans Frontières, 2006). No obstante, requieren condiciones hidrogeológicas muy específicas para su implementación, por lo que su aplicabilidad dentro del AVL se considera limitada (Ministry of the Environment, 2004; Technische Universität Dresden, 2018).



Figura 34. Construcción de una presa subsuperficial. Recuperada de Vétérinaires Sans Frontières (2006).

La categoría de pozos y perforaciones incluye las técnicas ASR y ASTR, así como los pozos de recarga someros. Estas tecnologías son particularmente útiles en zonas urbanas o donde la disponibilidad de terreno limita la implementación de métodos

de infiltración superficial (Zheng, Ross, Villholth, y Dillon, 2021). Las técnicas ASR y ASTR permiten inyectar agua al acuífero para su almacenamiento temporal y posterior recuperación, aunque requieren sistemas de pretratamiento, monitoreo intensivo de la calidad del agua y análisis hidrogeoquímicos que incrementan considerablemente su complejidad y costo (Dillon y Molloy, 2006; Ebrahim et al., 2017; Alam et al., 2021; Technische Universität Dresden, 2018).

Los pozos de recarga someros (figura 35) constituyen una alternativa menos compleja y permiten acelerar la infiltración cuando existen materiales permeables bajo capas superficiales poco permeables (Mendoza, 2017; Pi y Ashoor, 2014). Entre sus ventajas destacan la mejora de la calidad del agua y su adaptación a espacios reducidos, aunque presentan limitaciones asociadas a su capacidad de almacenamiento y susceptibilidad a la colmatación (Fernández y López, 2017; Edwards, Washburn, y Lock, 2017).



Figura 35. Pozo de absorción construido para captar agua de escorrentía. Recuperada de Ojeda-Olivares et al. (2017).

La infiltración ribereña comprende técnicas como los filtros de banco de ríos (RBF) y la infiltración interdunar. Ambas aprovechan procesos naturales de filtración para mejorar la calidad del agua durante su tránsito por el subsuelo (Page, Bekele, Vanderzalm, y Sidhu, 2018; Mendoza, 2017). Los filtros de banco de ríos permiten reducir organismos patógenos, sólidos suspendidos y turbiedad, aunque requieren condiciones hidrológicas específicas, monitoreo constante y elevados costos de implementación (Dobhal, Uniyal, Chandra, Grischek, y Sandhu, 2019; Technische Universität Dresden, 2018). De manera similar, la infiltración interdunar ofrece una elevada capacidad de almacenamiento y remoción de contaminantes, pero se limita principalmente a contextos costeros y presenta altos requerimientos de monitoreo (Gale, 2005; Technische Universität Dresden, 2018).

Finalmente, la categoría de captación o cosecha de agua de lluvia comprende un amplio conjunto de acciones destinadas a captar, almacenar temporalmente e infiltrar escurrimientos superficiales (Gale, 2005). Dentro de este grupo se incluyen sistemas de captación pluvial, zanjas de infiltración, tinas ciegas, surcos, anillos de agua, jagüeyes, bordos y distintas modalidades de terrazas (Page, Bekele, Vanderzalm, y Sidhu, 2018; Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009; Cardoza et al., 2008). Se trata de acciones descentralizadas, de menor escala, relativamente económicas y con una alta compatibilidad con los principios de la gestión adaptativa del agua.

Las tinas ciegas o zanjas trinchera (figura 36) consisten en excavaciones construidas siguiendo las curvas de nivel para interceptar escurrimientos, incrementar la infiltración y conservar humedad en el suelo (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009). Se recomiendan principalmente en laderas con suelos permeables y pendientes moderadas a fuertes, donde contribuyen a la retención de sedimentos, la restauración de la vegetación y la recarga hídrica (Weber et al., 2000; Cardoza et al., 2008). No obstante, requieren mantenimiento para evitar procesos de erosión y formación de cárcavas (Cotler, Cram, Almeida, Hoth, y Fernández, 2017).



Figura 36. Tinas ciegas (zanjas trincheras). Recuperada de Rubio et al. (2009).

Las zanjas de infiltración o zanjas-bordo (figura 37) cumplen una función similar al interceptar el flujo superficial y favorecer la infiltración del agua hacia el subsuelo. Son ampliamente utilizadas en regiones áridas y semiáridas debido a sus bajos costos de construcción y mantenimiento, además de su capacidad para incrementar la humedad del suelo y reducir la erosión (Cardoza et al., 2008; Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009; Pizarro, Flores, Sangüesa, Martínez, y García, 2004; Organización de las Naciones Unidas, 2022).



Figura 37. Zanjas de infiltración. Recuperada de CONAFOR (2021).

Por su parte, las terrazas individuales o cajeteos (figura 38) consisten en pequeñas estructuras construidas alrededor de especies vegetales para captar agua de lluvia, conservar humedad y reducir la erosión del suelo (Cardoza et al., 2008; Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009). Además de favorecer la infiltración, contribuyen al establecimiento de vegetación y a la restauración de áreas degradadas, por lo que representan una alternativa con beneficios hidrológicos y ecológicos simultáneos (Weber et al., 2000; Natural Resources Conservation Service, 2007).



Figura 38. Terrazas individuales. Recuperada de Cardoza et al. (2008).

En conjunto, las técnicas de captación de agua de lluvia y algunas acciones de infiltración superficial presentan la mayor afinidad con las características biofísicas identificadas en las zonas con alto potencial de recarga del AVL. Además de su relativa simplicidad técnica y costos moderados, estas acciones son congruentes con los principios de la gestión adaptativa del agua al tratarse de medidas descentralizadas, escalables y capaces de generar beneficios adicionales relacionados con la

conservación de suelo, restauración de la cobertura vegetal y fortalecimiento de la resiliencia hidrológica del territorio.

6.4.2 Selección de las acciones adaptativas de recarga para el AVL

Una vez discutidas las características y requerimientos de implementación de las principales acciones MAR, se procederá a su evaluación y calificación individual en un rango de 1 a 5 estrellas, de acuerdo con su viabilidad y afinidad con el área de estudio, así como con los objetivos esperados en el marco de la gestión integrada del agua y las acciones adaptativas de gestión hídrica. El propósito de esta evaluación es realizar un análisis cuantitativo que permita seleccionar de manera específica las acciones MAR más adecuadas, proponiéndose únicamente aquellas técnicas con mayor calificación entre las distintas opciones, es decir, las alternativas más viables y realistas para el área de estudio.

Los parámetros evaluados son: clima (incluye precipitación); suelo; uso de suelo y cobertura vegetal; geología (considerando la hidrología, el tipo de acuífero, las unidades litológicas y los lineamientos estructurales); topografía (pendiente del terreno y rasgos geomorfológicos); posibles conflictos sociales derivados de su implementación; dificultad técnica (grado de complejidad y conocimiento técnico requerido para su diseño, instrumentación y mantenimiento); costo-beneficio; rendimiento (incluyendo la fiabilidad de la acción); y calidad del agua recuperada. En cuanto a los parámetros biofísicos (v.g. clima, topografía o uso de suelo y cobertura vegetal), la calificación asignada representa el grado de afinidad entre las condiciones sugeridas en la literatura para la mejor operatividad de cada tecnología y las características biofísicas presentes en las zonas con alto potencial de recarga hídrica del AVL. De manera similar, para los criterios relacionados con las características propias de las acciones, como la dificultad técnica o el costo-beneficio, la calificación refleja su pertinencia o viabilidad bajo un enfoque de gestión integrada y adaptativa del agua.

Así, por ejemplo, una estrella en el parámetro de topografía indicaría que una acción determinada no es apta para implementarse en el área de estudio debido a la pendiente y las condiciones del terreno requeridas para su funcionamiento. Por el contrario, cinco estrellas en el parámetro de costo-beneficio señalarían que, considerando los costos de diseño, implementación y mantenimiento, así como los beneficios generados, la acción resulta altamente viable y plenamente justificada.

Acciones de captación y recarga hídrica viables para el AVL

En los polígonos con alta viabilidad para albergar acciones de recarga al AVL (Figura 30) se presentan tres tipos de clima: Cw0 (templado subhúmedo), (A)C(w0)(w) (semicálido subhúmedo) y BS1kw(w) (semiseco semicálido). Con una precipitación media anual entre 700 y 800 mm y una temperatura media anual de 17 a 19 °C, todas las acciones de captación y recarga hídrica resultan compatibles, excepto la técnica RBF, que requiere una mayor tasa de precipitación para mantener un flujo perenne (Dobhal, 2019), y la infiltración interdunar, propia de ambientes costeros.

La mayoría de las técnicas MAR se han implementado en suelos tipo HSG-C, compuestos por más del 50 % de arena y entre 20 % y 40 % de arcilla (Alam et al., 2021), lo que corresponde a suelos franco-arcillo-arenosos o franco-arenoso-arcillosos, según la proporción exacta de arcilla y limo. En el AVL predominan los suelos Feozem háplico y Vertisol pélico. El primero suele tener textura franca o franco-arcillosa, dependiendo del contenido de arena, limo y arcilla, por lo que podría presentar proporciones similares a las del tipo HSG-C. En cambio, el Vertisol pélico tiene un alto contenido de arcillas, lo cual lo aleja de los suelos francos. Bajo este criterio, todas las acciones MAR, excepto la infiltración interdunar y las presas de arena, podrían implementarse. Cabe mencionar que, para las técnicas ASR y ASTR, la textura del suelo y otras características superficiales no constituyen una limitante (Technische Universität Dresden, 2018).

Respecto a la cobertura vegetal y los usos de suelo, la mayoría de las acciones presentan buena afinidad, especialmente en zonas con matorral subtropical, pastizal inducido y bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea. Las técnicas TSA e inundación controlada obtienen calificaciones menores, particularmente en el norte del acuífero, ya que requieren grandes extensiones de terreno para operar eficientemente (Alam et al., 2021). Por su parte, las acciones RBF y filtración interdunar presentan la menor afinidad, debido a que la primera requiere flujos perennes (Dobhal et al., 2019), mientras que la segunda es propia de ambientes arenosos y costeros (Mendoza, 2017).

En cuanto a las características geológicas, el AVL es un acuífero libre, lo que lo hace especialmente apto para métodos de captación y distribución de agua de lluvia. Entre las técnicas más viables según la litología se encuentran el riego y la TSA, particularmente en la zona del Valle de León, donde predominan los materiales aluviales, así como las técnicas ASR y ASTR, que, al emplear pozos profundos, pueden alcanzar los estratos más permeables. También muestran buena afinidad las cuencas

y estanques de infiltración, represas de control/gaviones, liberación controlada, pozos de recarga someros y acciones como zanjas, terrazas y tinas, especialmente al norte del área de estudio, donde predominan basaltos y andesitas fracturados con buena permeabilidad. En contraste, presentan menor calificación las acciones que requieren condiciones litológicas muy específicas o cuya identificación incrementaría los costos y la complejidad técnica, como las presas de arena (Mendoza, 2017; Maddrell et al., 2013) y las presas subsuperficiales (Ministry of the Environment, 2004), así como la inundación controlada, RBF o filtración interdunar, debido a la ausencia de cuerpos de agua perennes requeridos para su implementación (Dobhal, 2019).

La topografía constituye la última característica física del terreno a evaluar. En las zonas viables para la infiltración, al noroeste del acuífero, las pendientes varían de 0° a más de 60°, predominando entre 2° y 10° (3.5–17.6 %), condiciones adecuadas para implementar cuencas y estanques de infiltración, represas de control/gaviones, presas subsuperficiales, liberación controlada, ASR/ASTR, pozos someros, RBF y acciones de captación de agua de lluvia (terrazas, zanjas y tinas). En las zonas con alta aptitud para la recarga al sur del acuífero, las pendientes son predominantemente planas o muy suaves, raramente superiores a 1°, lo que favorece la implementación de TSA, riego e inundación controlada (Tahoe Regional Planning Agency, 2014; California Department of Transportation, 2020; Alam et al., 2021). Las acciones menos aptas según este criterio son las presas de arena, que requieren topografías específicas, y la filtración interdunar, que, aunque puede aplicarse en dunas continentales, éstas no se encuentran presentes en el área del AVL.

El siguiente parámetro para determinar la viabilidad de las acciones MAR son los posibles conflictos sociales derivados de su implementación. Se han documentado graves conflictos asociados a grandes obras hidráulicas, como el desplazamiento de poblaciones o la afectación del patrimonio cultural e histórico, lo que resalta la pertinencia de los sistemas adaptativos de gestión hídrica como alternativa a los modelos tradicionales basados en megaproyectos. Aunque los sistemas adaptativos minimizan estos impactos, cualquier modificación a las condiciones naturales de una cuenca puede generar conflictos sociales en distinta medida. Por ello, deben considerarse factores como la propiedad de la tierra, los derechos de agua y el uso conjuntivo de las acciones de recarga (Gale, 2005) para reducir posibles tensiones. Entre las acciones con mayor potencial de generar conflictos se encuentran aquellas que requieren extensas superficies o grandes estructuras, como la inundación controlada, TSA, riego (Technische Universität Dresden, 2018), represas de control/gaviones de grandes dimensiones, presas de arena, presas subsuperficiales, ASR/ASTR, RBF y filtración interdunar. En cambio, las acciones menos propensas a

causar conflictos son las cuencas y estanques de infiltración, represas de control/gaviones de pequeñas dimensiones, pozos de recarga someros y acciones de captación de agua de lluvia, resultando así más viables para su implementación.

Las acciones con menor dificultad de diseño, implementación y mantenimiento son las de captación de agua de lluvia (terrazas, zanjas y tinas), seguidas de las cuencas y estanques de infiltración, represas de control/gaviones de pequeñas dimensiones, pozos de recarga someros, presas de arena y riego, esta última debido al aprovechamiento de infraestructura preexistente (Alam et al., 2021). Con dificultad moderada se ubican la inundación controlada, presas subsuperficiales y liberación controlada. En cambio, las acciones más complejas, que requieren control constante, estudios detallados y maquinaria especializada, son las represas de control/gaviones de grandes dimensiones, filtración interdunar, TSA, RBF y ASR/ASTR (Maddrell et al., 2013; Mendoza, 2017; Dobhal et al., 2019).

En cuanto al rendimiento, las acciones más eficientes son los pozos ASR/ASTR, seguidos por represas de control/gaviones de grandes dimensiones, cuencas y estanques de infiltración, RBF, infiltración interdunar, liberación controlada y TSA. Las de menor rendimiento son la inundación controlada, riego, represas de control/gaviones de pequeñas dimensiones, presas de arena, presas subsuperficiales, pozos de recarga someros y acciones de captación de agua de lluvia.

Respecto a la calidad del agua recuperada, la mayoría de las acciones presentan una calidad moderada, ya que muchas, como las cuencas y estanques, la inundación controlada, las represas de control/gaviones, la liberación controlada, los pozos someros y la captación de agua de lluvia, almacenan el agua temporalmente en superficie antes de la infiltración y percolación, lo que aumenta el riesgo de contaminación por patógenos, fauna o actividad antropogénica. En el caso de las técnicas ASR/ASTR, la calidad también se considera moderada, dado el riesgo de infiltrar agua contaminada directamente al acuífero (Alam et al., 2021), por lo que es indispensable tratar el agua previamente. En contraste, las acciones que mejoran la calidad del agua infiltrada son el tratamiento suelo-acuífero (TSA) (Casanova et al., 2016), RBF (Mendoza, 2017), filtración interdunar (Technische Universität Dresden, 2018) y las presas subsuperficiales (Ministry of the Environment, 2004).

Finalmente, el análisis costo-beneficio refleja una relación directa con la dificultad técnica y el rendimiento de cada acción. Las técnicas de alto rendimiento, pero con elevada complejidad técnica como TSA, represas de control/gaviones grandes, ASR/ASTR, RBF e infiltración interdunar presentan un costo-beneficio reducido. En cambio, las acciones con rendimiento más limitado, pero con menor complejidad y costos reducidos como el riego, las represas de control/gaviones pequeñas, las

cuencas y estanques de infiltración, las presas de arena, los pozos de recarga someros y las acciones de captación de agua de lluvia (terrazas, zanjas y tinas) muestran una valoración costo-beneficio más favorable.

A partir de la evaluación de todos los parámetros, se asignó una calificación de 1 a 5 para cada uno, según su viabilidad y afinidad con las condiciones físicas del área de estudio. Los resultados de dicha evaluación, junto con el promedio de las calificaciones por acción, se presentan en la tabla 12. Con base en ellos, la tabla 13 muestra, en orden descendente, las distintas acciones MAR según su viabilidad y prioridad para su implementación en el AVL.

Tabla 12. Viabilidad de distintas acciones MAR para implementarse en el AVL. Elaboración propia.

Tecnología	Clima	Suelo	Uso de suelo y cobertura vegetal	Geología / hidrología	Topografía	Posibles conflictos sociales	Dificultad técnica	Costo-beneficio	Rendimiento	Calidad del agua recuperada	Calificación (viabilidad)
Cuencas y estanques de infiltración	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★	★★★	4.1
TSA	★★★★★	★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★	★★	★★	★★★	★★★★	★★★★★	3.9
Inundación controlada	★★★★★	★★★★	★★★★	★★★	★★★★	★★	★★★	★★★	★★	★★★	3.3
Riego	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★	★★★★	★★★★★	★★	★★	3.9
Represas de control / gaviones (grandes dimensiones)	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★	★★	★★★	★★★★	★★★	3.7
Represas de control / gaviones (pequeñas dimensiones)	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★	★★★	4.0
Presas de arena	★★★★	★★	★★★★★	★★★	★★★	★★	★★★★	★★★★	★★	★★★	3.2
Presas subsuperficiales	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★	★★★★★	★★	★★★	★★	★★	★★★★	3.5
Liberación controlada	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★	★★★	★★★★	★★★★	★★★	4.0
ASR / ASTR	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★	★	★★	★★★★★	★★★	3.8
Pozos de recarga someros	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★	★★★	4.0

RBF	★★	★★★★	★★	★	★★★★★	★★	★	★★	★★★★	★★★★	2.7
Filtración interdunar	★★	★★	★★★	★★	★	★★	★★	★★★	★★★★	★★★★	2.5
Zanjas, tinas, terrazas, etc.	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★	★★	★★★	4.2

Se identifican cinco técnicas con una calificación de 4 o superior: acciones de captación de agua de lluvia (terrazas, zanjas y tinas), cuencas y estanques de infiltración, represas de control/gaviones de pequeñas dimensiones, liberación controlada y pozos de recarga someros. Siendo las acciones de captación de agua de lluvia las técnicas con mayor viabilidad para el área de estudio, al obtener una calificación de 4.2 sobre 5. Las acciones con una viabilidad moderada al obtener una calificación de entre 3 y 3.9 son el TSA, riego, ASR/ASTR, represas de control/gaviones de grandes dimensiones, presas subsuperficiales, inundación controlada, y presas de arena. Mientras que las acciones con menor viabilidad, al obtener una calificación entre 2 y 2.9, son la infiltración ribereña (RBF) y la filtración interdunar.

Tabla 13. Viabilidad y prioridad de distintas acciones MAR para implementarse en el AVL. Elaboración propia.

Tecnología	Calificación (viabilidad)	Prioridad
Zanjas, tinas, terrazas, etc.	4.2	1
Cuencas y estanques de infiltración	4.1	2
Represas de control / gaviones (pequeñas dimensiones)	4.0	3
Liberación controlada	4.0	3
Pozos de recarga someros	4.0	3
TSA	3.9	4
Riego	3.9	4
ASR / ASTR	3.8	5
Represas de control / gaviones (grandes dimensiones)	3.7	6

Presas subsuperficiales	3.5	7
Inundación controlada	3.3	8
Presas de arena	3.2	9
RBF	2.7	10
Filtración interdunar	2.5	11

A partir de la evaluación de la viabilidad y afinidad de las distintas acciones MAR con las características biofísicas del área de estudio y con los objetivos esperados con su implementación, bajo un enfoque de gestión integrada del agua y acciones adaptativas de gestión hídrica; se proponen las siguientes acciones de captación y recarga hídrica para el AVL, siguiendo el orden de viabilidad y prioridad propuesto:

- 1) Acciones de captación de agua de lluvia (terrazas, zanjas y tinas).
- 2) Cuencas y estanques de infiltración.
- 3) Pozos de recarga someros, represas de control/gaviones de pequeñas dimensiones, y liberación controlada.

6.4.3 Sitios propuestos para la implementación de zanjas, tinas, terrazas y estanques de infiltración

Identificadas las acciones de captación y recarga más viables para ser implementadas dentro del AVL, se propone llevar a cabo la identificación de los sitios óptimos para la construcción de zanjas, tinas, terrazas y estanques de infiltración. Para ello se consideran los parámetros de pendiente del terreno, tipo de suelo, y uso de suelo, delimitando únicamente aquellas zonas donde los tres factores presenten los parámetros óptimos y sugeridos para la implementación de las acciones. Para llevar a cabo dicho análisis se emplea la herramienta de superposición ponderada (*Weighted Overlay*) de ArcMap, utilizando como insumos las capas temáticas de pendiente del terreno, uso de suelo y cobertura vegetal, y tipo de suelo. Como pesos relativos de cada factor se ha asignado una ponderación de 40 % a la pendiente del terreno, 30 % al uso de suelo y cobertura vegetal, y 30 % al tipo de suelo.

Destaca que únicamente los polígonos 1-3 (Figura 30) presentan las condiciones óptimas de uso de suelo y cobertura vegetal, pendiente de terreno, y tipo de suelo, para la implementación de cuencas/estanques de infiltración y acciones de captación

de agua de lluvia (terrazas, zanjas y tinas). Aunque en los polígonos 4 y 5 también es posible encontrar sitios aislados y muy concretos que cumplen con las condiciones biofísicas para la implementación de estas acciones, se considera que la extensión despreciable de dichos sitios los vuelve poco viables para la implementación de un proyecto a gran escala que incluya estanques de infiltración, o acciones como terrazas, zanjas o tinas.

Los parámetros óptimos para estas acciones se presentan en la tabla 14, mientras que las ubicaciones óptimas para las acciones se muestran en las figuras 39-44.

Tabla 14. Parámetros óptimos para la implementación de zanjas, tinas, terrazas y estanques de infiltración en el AVL. Elaboración propia.

Acciones	Pendiente	Tipo de suelo	Uso de suelo y cobertura vegetal
Zanjas, tinas, terrazas	5 – 40 % (2.9 - 21.8°)	Feozem háplico	Matorral subtropical, pastizal inducido, matorral crasicaule, pastizal natural.
Estanques de infiltración	0.5 – 5 % (0.3 – 2.9°)	Feozem háplico	Matorral subtropical, pastizal inducido, matorral crasicaule, pastizal natural.

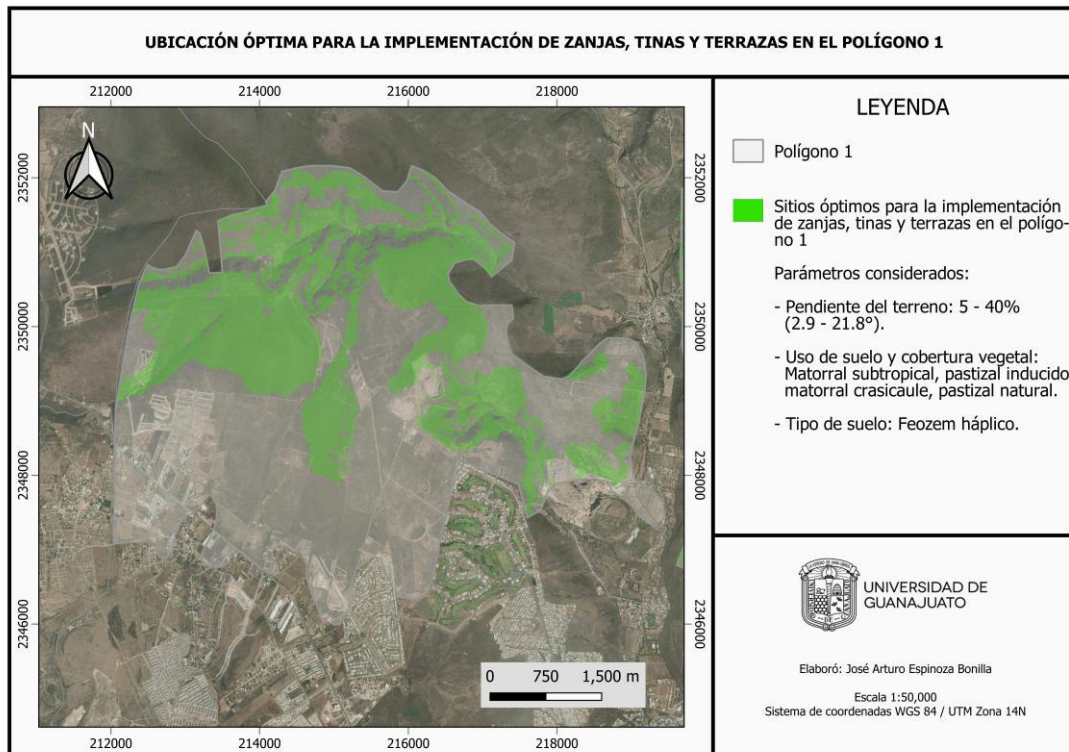


Figura 39. Ubicación óptima para la implementación de zanjas, tinajas y terrazas en el polígono 1.
Elaboración propia.

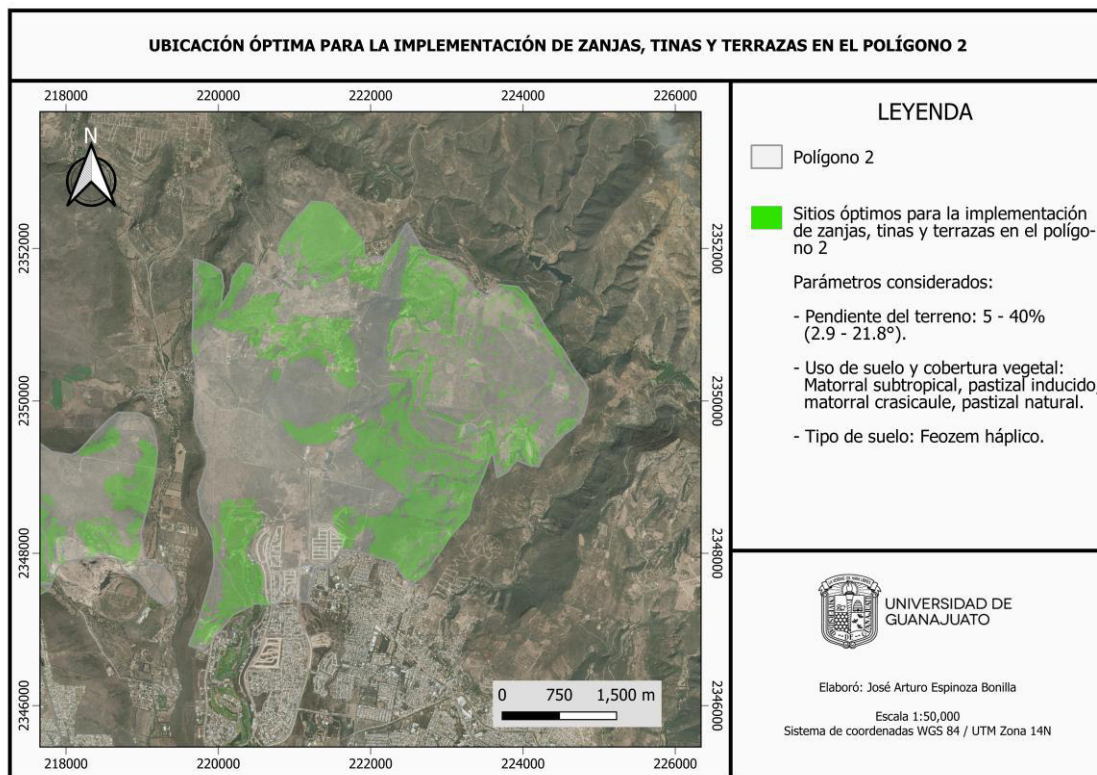


Figura 40. Ubicación óptima para la implementación de zanjás, tinas y terrazas en el polígono 2.
Elaboración propia.

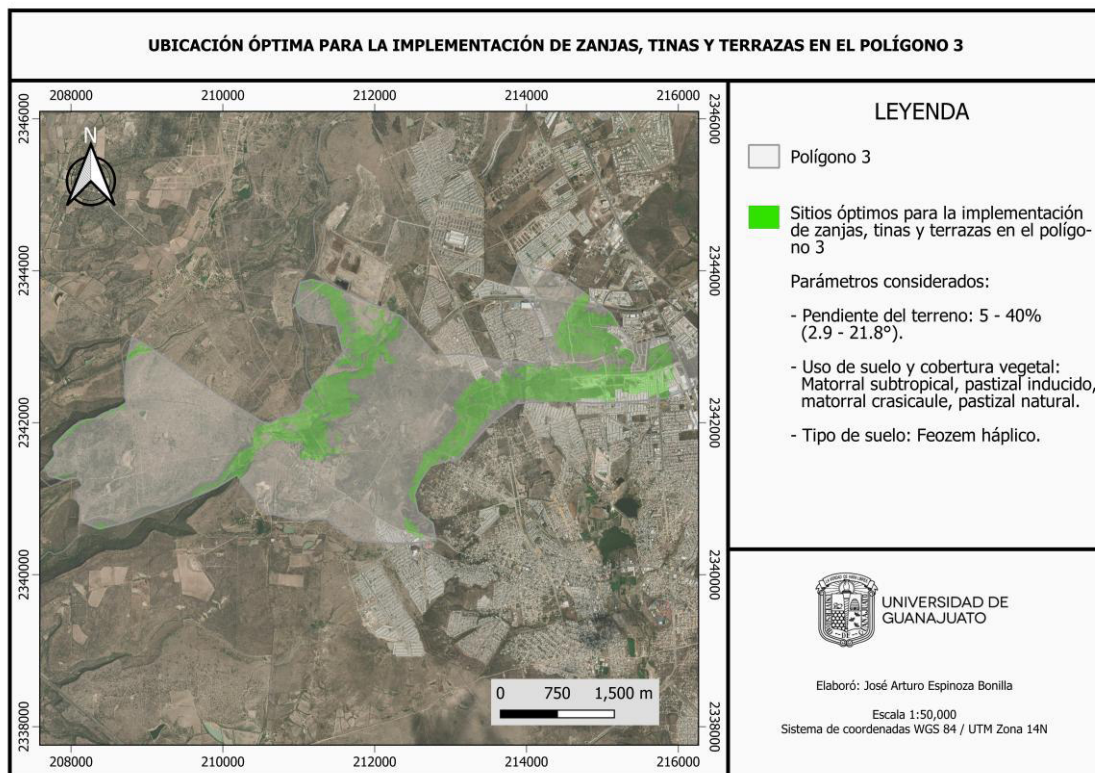


Figura 41. Ubicación óptima para la implementación de zanjas, tinas y terrazas en el polígono 3.
Elaboración propia.

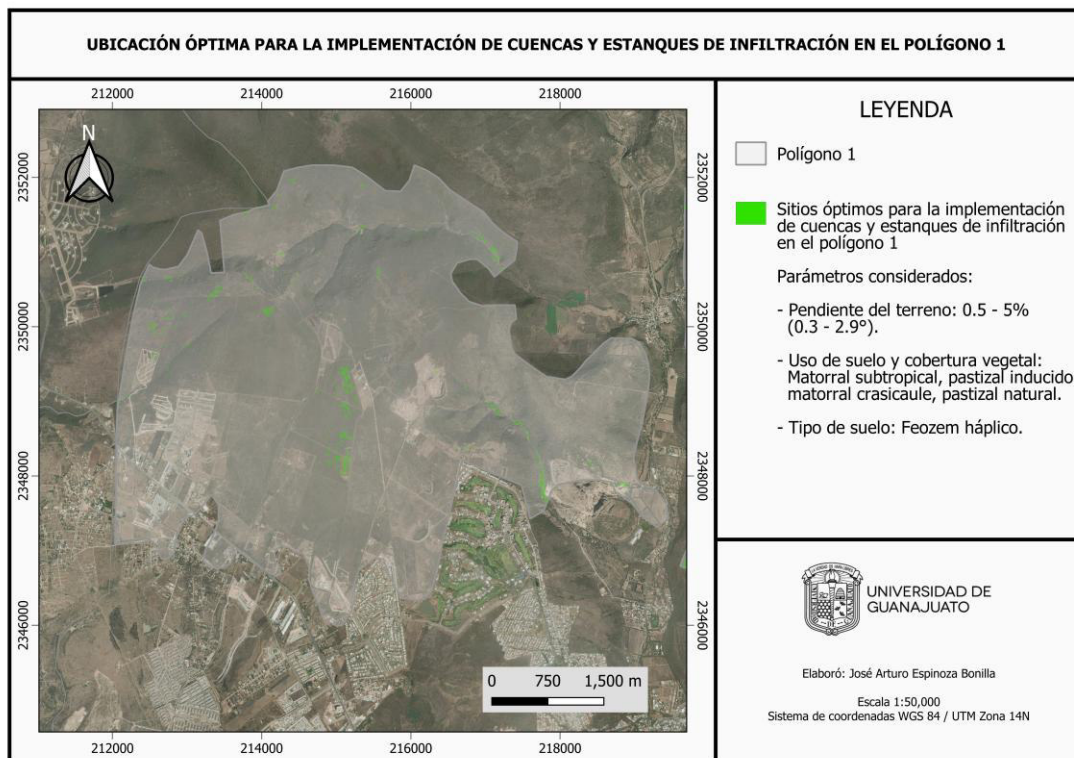


Figura 42. Ubicación óptima para la implementación de cuencas y estanques de infiltración en el polígono 1. Elaboración propia.

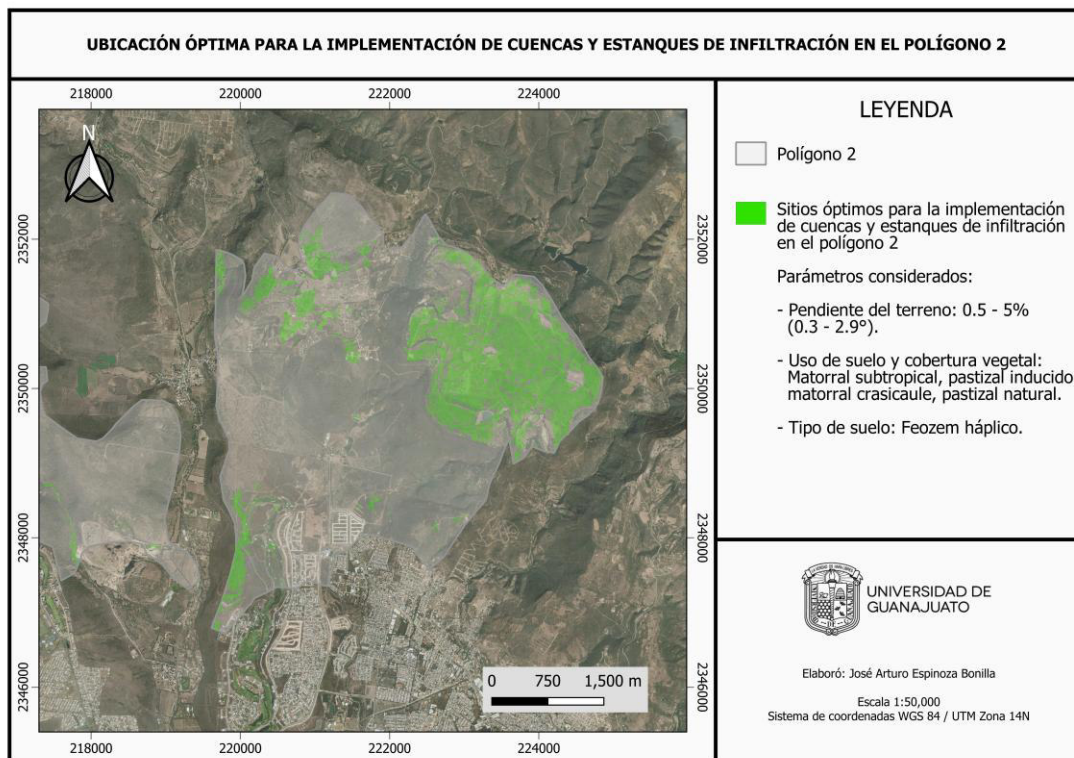


Figura 43. Ubicación óptima para la implementación de cuencas y estanques de infiltración en el polígono 2. Elaboración propia.

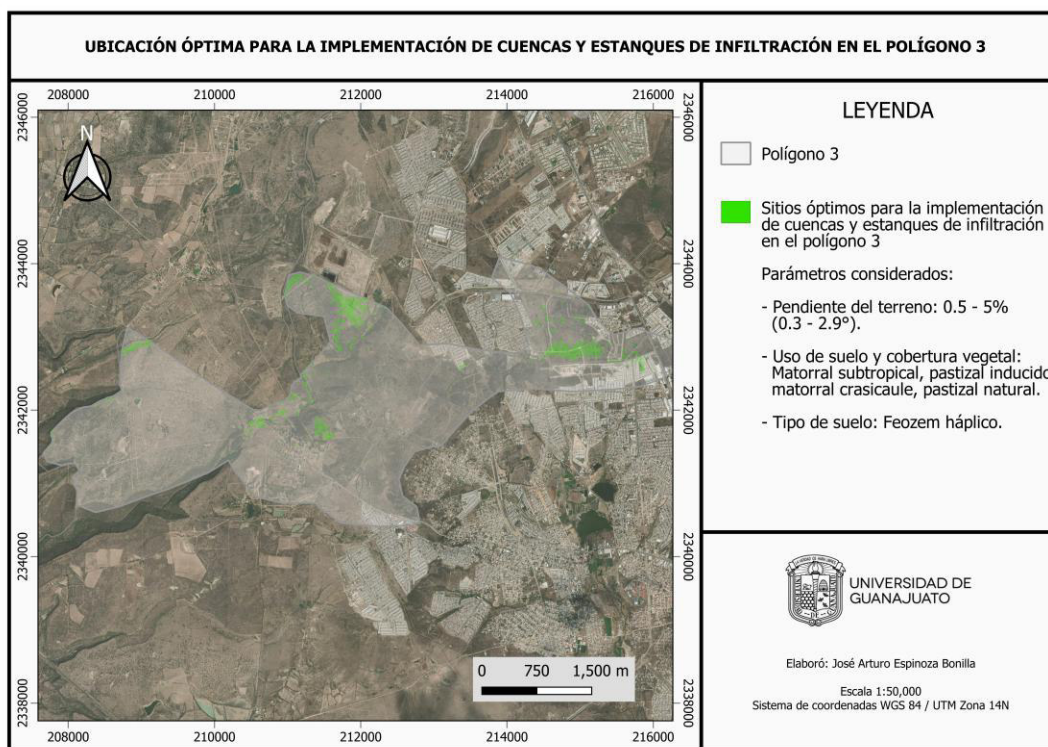


Figura 44. Ubicación óptima para la implementación de cuencas y estanques de infiltración en el polígono 3. Elaboración propia.

Como resultado de esta zonificación, se han identificado 0.25 km² en el polígono 1, 3.85 km² en el polígono 2, y 0.52 km² en el polígono 3 altamente viables para la implementación óptima de cuencas y estanques de infiltración; mientras que se han identificado 9.60 km² en el polígono 1, 6.52 km² en el polígono 2, y 3.2 km² en el polígono 3 para la implementación óptima de tinas, zanjas y terrazas.

Lo anterior representa una extensión acumulada, dentro de los límites del AVL, de 4.62 km² para la construcción de estanques de infiltración y 19.32 km² para la construcción de acciones de captación de agua de lluvia como tinas, zanjas y terrazas. Lo que implica la existencia de una superficie total de 23.94 km² del AVL, en la que se podrían implementar de manera extensiva acciones adaptativas de captación y recarga hídrica como zanjas, tinas, terrazas y estanques de infiltración, encaminadas a mitigar la sobreexplotación del acuífero, con un alto grado de certidumbre sobre su eficiencia en el proceso de infiltración y percolación al acuífero.

6.5 Conclusión

Comprobados los requerimientos esenciales para considerar la implementación de acciones de recarga para el AVL, como la existencia de la demanda suficiente del agua recuperada, una fuente de agua adecuada para la recarga, o el espacio de superficie suficiente para captar y tratar el agua; se ha conducido la descripción de quince técnicas de MAR con el objetivo de identificar aquellas que resultan afines a las zonas con alto potencial de recarga al AVL, buscando que estas acciones tuvieran además un enfoque adaptativo, es decir, descentralizadas, a pequeña escala, económicas y adaptables a cambios en el entorno. Como resultado de este análisis, y bajo estos criterios, se identificó que las acciones de captación de agua de lluvia (terrazas, zanjas y tinajas), y cuencas y estanques de infiltración, son las acciones más viables para ser implementadas como medidas para mitigar la sobreexplotación del AVL, seguido de las acciones de represas de control/gaviones de pequeñas dimensiones, liberación controlada y pozos de recarga someros.

Considerados los factores biofísicos sugeridos para la implementación de estas acciones, se identificó que, al norte del AVL, en la región de los Altos de Jalisco, es donde se presentan las condiciones más favorables para su construcción. Con la finalidad de delimitar los sitios específicos para la implementación eficaz de dichas acciones en esta región, se condujo la superposición ponderada de las capas temáticas de pendiente del terreno, uso de suelo y cobertura vegetal, y tipo de suelo; asignándoles una ponderación de 40 %, 30 % y 30 %, a cada capa respectivamente. Como resultado de este análisis se identificó que en los polígonos 1-3, dentro de los límites del AVL existen 4.62 km² con alta aptitud y viabilidad para la construcción de estanques de infiltración y 19.32 km² para la construcción de acciones de captación de agua de lluvia como terrazas, zanjas, tinajas, y acciones afines. Estos resultados sugieren la existencia de una superficie total de 23.94 km² del AVL en la que se pueden implementar acciones adaptativas de captación y recarga hídrica como zanjas, tinajas, terrazas y estanques de infiltración, encaminadas a mitigar la sobreexplotación del acuífero, con un alto grado de certidumbre sobre su viabilidad y eficacia en el proceso de percolación e infiltración al acuífero.

Por otra parte, aunque los polígonos 4 y 5 también presentan condiciones biofísicas favorables para la implementación de acciones como la recarga por riego o la inundación controlada, se considera que los extensos terrenos requeridos para su ejecución, su localización en zonas de intensa actividad agrícola y las posibles

dificultades asociadas con la disponibilidad y gestión de la tierra reducen su viabilidad práctica.

Se considera que los resultados de este capítulo constituyen un avance fundamental en el análisis para determinar la viabilidad de incorporar acciones adaptativas de captación e infiltración hídrica en el AVL. Partiendo del capítulo 5 con la identificación de las zonas y la delimitación de los polígonos con mayor aptitud para permitir los procesos de recarga y percolación dentro de los límites del área de estudio; en este sexto capítulo se han analizado y propuesto las acciones más viables para ser implementadas en estas zonas, considerando sus características biofísicas y los objetivos esperados con su instrumentación. Cabe resaltar que los resultados obtenidos en este capítulo suponen un insumo esencial para el desarrollo del capítulo 7 de este proyecto de investigación, el cual consistirá en determinar el impacto y la utilidad que tendría la implementación de las acciones aquí identificadas para mitigar la sobreexplotación del AVL. Finalmente, se espera que la metodología planteada contribuya a demostrar la utilidad de las herramientas prácticas, como el geoprocésamiento en un ambiente SIG, para la toma de decisiones en la gestión sostenible de los recursos subterráneos en la región. Sentando con ello una estrategia replicable en otros sitios o regiones con desafíos hídricos similares al que enfrenta actualmente la ciudad de León.

7. ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE LAS ACCIONES ADAPTATIVAS DE CAPTACIÓN E INFILTRACIÓN PARA MITIGAR LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL AVL

7.1 Introducción

Resulta innegable que la gestión del agua está enfrentando a nivel mundial cada vez mayores desafíos, atribuidos en gran medida a la creciente incertidumbre derivada del cambio climático, cambios socioeconómicos (Pahl-Wostl, 2007), crecimiento poblacional, cambios tecnológicos y cambios en las actitudes y comportamientos de las sociedades (Morales, 2012). Desde fines del siglo pasado se ha identificado que la disponibilidad de agua dulce se ha visto alterada fundamentalmente por la variabilidad en los ciclos climáticos y por el uso intensivo del recurso con fines diversos, dando como consecuencia un agravamiento de los conflictos por acceder a ella (Langhoff, Gerald, y Rosell, 2017). En el caso del cambio climático si bien sus efectos están presentes en diferentes dimensiones (Nieto, 2011), los cambios en la precipitación y en su distribución espacio-temporal a causa del aumento en la temperatura a nivel global han comenzado a afectar sensiblemente el comportamiento del ciclo hidrológico (Quiroz, 2020), con consecuencias directas no solo en la disponibilidad actual de agua potable, sino también en la sustentabilidad futura del recurso; siendo temas de atención prioritaria dada su relevancia para el sustento de la vida y los ecosistemas.

Además de la posible variabilidad climática, otro factor igualmente relevante es el incremento en la demanda de agua, impulsado por el crecimiento poblacional y el aumento de las actividades productivas y agrícolas. En el caso específico del AVL, los

datos del REPDA, proporcionados por la CONAGUA en las actualizaciones del acuífero para los años 2020, 2023 y 2024, muestran un aumento significativo en los volúmenes concesionados: 176,376,100 m³, 186,138,096 m³ y 186,138,096 m³, respectivamente. Lo que refleja una tendencia a una mayor presión sobre el recurso hídrico en los últimos años. Por otro lado, según el corte del REPDA al 31 de marzo de 2024 (CONAGUA, 2024), el uso del agua se destina principalmente al sector agrícola (52.36 % de las concesiones), seguidas del abastecimiento público urbano (40.86 %), y el uso industrial (2.90 %).

En capítulos anteriores ya se ha abordado la relevancia de estos y otros fenómenos en la intensa sobreexplotación que afecta al AVL, haciendo necesario y pertinente conducir estudios que ayuden a disminuir las incertidumbres asociadas a las acciones adaptativas de captación e infiltración de agua pluvial para hacer de ellas una alternativa realista que pueda ser ampliamente apoyada por tomadores de decisión para su implementación a gran escala en la ciudad de León. De acuerdo con los autores Pizarro et al. (2004) un problema que enfrentan las obras de conservación de aguas y suelos de mediana o pequeña envergadura es que estas son comúnmente ejecutadas sin estándares de ingeniería para su diseño; siendo normalmente instrumentadas bajos criterios empíricos, que, aunque de indudable valor, no siempre son suficientes para soportar las sollicitaciones mecánicas a que las obras son sometidas. Un ejemplo claro de esta circunstancia es el de las acciones de recarga implementadas por distintas comunidades autóctonas en la subcuenca del valle de Ocotlán, Oaxaca (Ojeda-Olivares et al., 2017), en donde la instrumentación de estos sistemas, aunque ha generado conciencia en las comunidades sobre el valor que representa el recurso hídrico para sus actividades, la ausencia de todo tipo de asesoría técnica o científica al momento de su construcción podría haber tenido un claro efecto en su eficiencia, contribuyendo así al hecho de que el aporte de agua de las obras de recarga sea escaso en comparación con el volumen concesionado en la subcuenca.

Ya que esta implementación empírica puede ser bien considerada parte de las incertidumbres inherentes a las acciones adaptativas de pequeñas dimensiones para captación y recarga hídrica, los capítulos 4 y 5 se han encaminado a dar certeza sobre la viabilidad de incorporar estas acciones en el área de estudio, identificándose como parte de los resultados, 453.01 km² con alto potencial de recarga al AVL, en los que se podrían implementar con un alto grado de certidumbre cualquier tipo de obra encaminada a favorecer y aumentar la recarga natural del acuífero; como también, una superficie de 23.94 km² en la región noroeste del acuífero, en la que se presentan las condiciones óptimas para implementar zanjas, terrazas o estanques de infiltración, siendo todos estos, sistemas altamente viables para la zona de estudio.

Con base en estos hallazgos y con el objetivo de concluir el análisis de viabilidad para contrastar así los resultados obtenidos con la hipótesis planteada, este capítulo propone evaluar la efectividad e impacto de la implementación a gran escala de estanques y zanjas de infiltración para mitigar la sobreexplotación del AVL bajo un contexto de cambio climático y aumento en la demanda de agua, y plantear así la pertinencia de adoptar este enfoque de gestión hídrica como alternativa al modelo tradicional imperante en la ciudad de León, el cual continúa apostando por la construcción de grandes obras de infraestructura para abordar la crisis hídrica. En atención al objetivo planteado, el capítulo se estructura de dos apartados fundamentales, en una primera parte se identifica el posible impacto de la implementación de terrazas y estanques en cuatro parcelas dentro del área de estudio. Cuyo análisis sirve como ejemplo para el diseño de las acciones y presenta un método replicable en otras regiones, ya sea dentro o fuera del área de estudio. Mientras que en la segunda parte del capítulo y como parte de la discusión, se evalúa la efectividad potencial de las zanjas y estanques si estos fueron considerados para ser implementados en los 23.94 km² identificados como viables para dichas intervenciones. El capítulo finaliza con las conclusiones de los resultados obtenidos.

7.2 Metodología

Para determinar el impacto de los estanques y zanjas, se ha planteado realizar el análisis de cuatro escenarios: tres para zanjas (tinas ciegas) y una para estanques de infiltración, y posteriormente estimar a partir de los resultados obtenidos en estas cuatro parcelas, el posible impacto que tendrían en la disminución de la sobreexplotación del AVL la implementación de estas acciones en las 2,394 hectáreas identificadas como viables para dichas intervenciones. En el caso de las terrazas, las parcelas seleccionadas se ubicaron en laderas con pendientes distintas, así mismo se buscó que existiera una separación considerable en alguna de las parcelas con respecto al resto para incorporar así variabilidad climática. Para los estanques, solo fue propuesta una parcela para realizar el ejercicio, esto debido a que las características topográficas para la implementación de estanques son más restringidas y por tanto menos diversas, además de que la parcela propuesta representa la región más grande dentro de los límites del AVL con posibilidad para implementar estanques de infiltración.

Resulta fundamental hacer énfasis en que la decisión de conducir este análisis únicamente en estas cuatro parcelas atiende a la necesidad de optimizar tiempo y recursos técnicos, considerando que el proceso sería similar para todas las parcelas destinadas a albergar un mismo tipo de técnica de captación y recarga; como también se sugiere que la selección de parcelas con características climáticas y topográficas distintas permitirá obtener datos representativos para posteriormente estimar el potencial de recarga en las 2,394 hectáreas con posibilidad de albergar estas acciones. Destaca, además, que el proceso que se llevará a cabo para identificar el impacto de las acciones podrá replicarse tanto dentro del área de estudio como en otras zonas fuera del AVL, lo que amplía su aplicabilidad y relevancia.

Se hace notar que el paso fundamental en el proceso para identificar el impacto de las acciones de recarga para mitigar la sobreexplotación del acuífero consiste en determinar el dimensionamiento y espaciado de las acciones, lo cual permitirá identificar el volumen de agua que podrá ser captado por las obras dentro de la parcela. Para dicho objetivo se ha recurrido a distintos manuales y guías para su construcción, sobre todo en América Latina, disponibles como parte de la literatura especializada en acciones de conservación de agua y suelos. Con respecto a la información estadística climatológica como precipitación y evaporación potencial, ha sido obtenida a partir de la climatología diaria y valores mensuales de las estaciones climatológicas Hacienda de Arriba con clave 11025, y Media Luna con clave 11045; con un registro del año 1946 a 2023, para la primera, y de 1947 a 2020 en el caso de la segunda. Por otra parte, la velocidad de infiltración del suelo se retomó a partir de un valor teórico correspondiente al Feozem háplico. En cuanto a los procesos concretos para estimar el dimensionamiento y espaciado de las acciones, así como el método para estimar el impacto de las acciones dentro de las parcelas y el resto de las zonas de interés, se describen en sus respectivos apartados.

Nota: en este trabajo se utiliza el término parcelas a unidades que fueron identificadas con alto potencial de recarga hídrica en la sección 5.5. de este documento y que cubren superficies que van de 59 a 452 ha.

7.3 Propuesta teórica de diseño e implementación de zanjas y estanques

Las parcelas propuestas como escenarios para la implementación de las acciones se ubican al noroeste de la ciudad de León (Figura 45), dentro del AVL, y se localizan íntegramente en los polígonos identificados con alta viabilidad para la implementación de zanjas, estanques de infiltración y acciones afines (Figuras 38-43). La delimitación de las parcelas abarca un ancho de 12 kilómetros en dirección este-oeste y 5 kilómetros en dirección norte-sur, con coordenadas comprendidas entre 213,000 y 225,000 metros al este y entre 2,349,000 y 2,354,000 metros al norte.

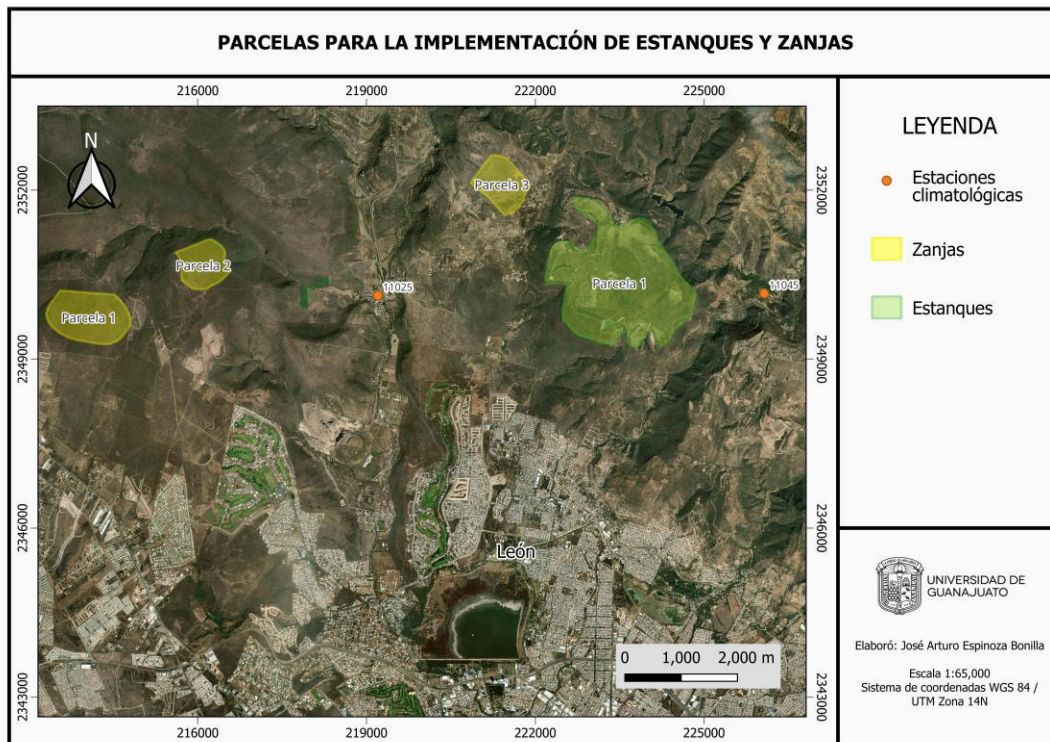


Figura 45. Parcelas para la implementación de estanques y zanjas en el AVL. Elaboración propia.

7.3.1 Zanjas

Parcela 1

La parcela 1 (Figura 46) tiene una extensión de 111 hectáreas y se localiza apenas 1,500 m al este del límite estatal entre Guanajuato y Jalisco. En el límite occidental de la misma se localiza el arroyo Los Muertos, el cual nace en su cota más alta y escurre con dirección 47°SO para continuar e internarse en el estado vecino. Mientras que por su flanco derecho fluye con dirección similar el arroyo El Almagre. Destaca la existencia de dos desarrollos habitacionales ubicados a menos de 1 km al sur de la parcela. El suelo principal es de tipo Feozem háplico con textura relativamente fina, mientras que la cobertura vegetal es de matorral subtropical. La pendiente de la parcela es ligeramente escarpada, no superando el 20% de inclinación.

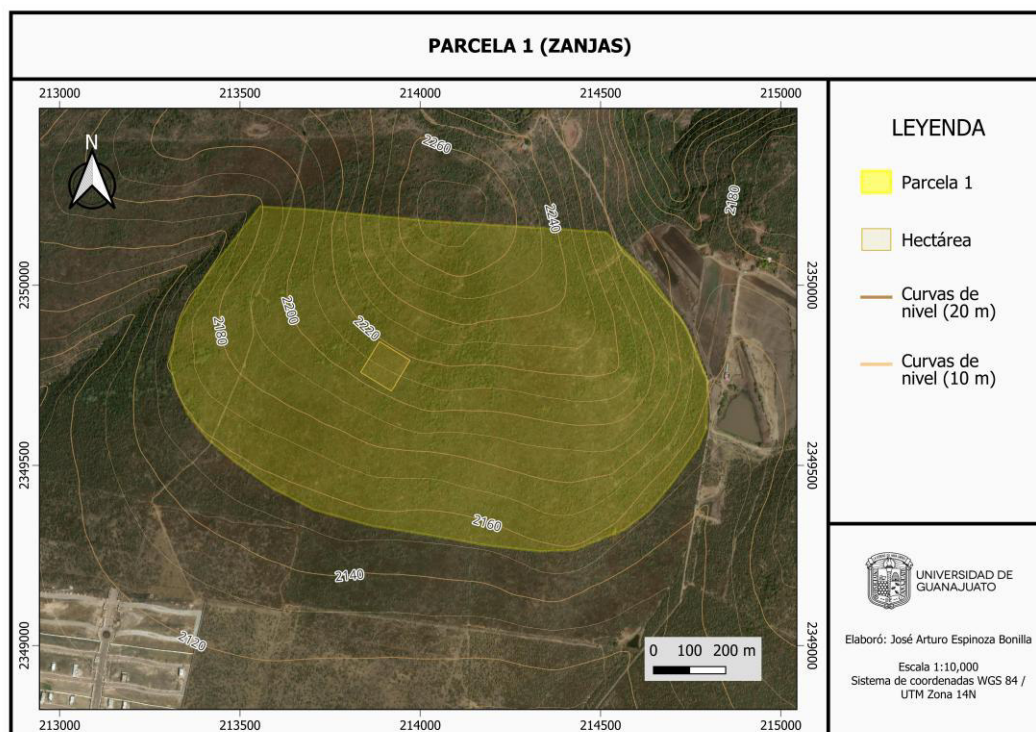


Figura 46. Parcela 1 para zanjas en el AVL. Elaboración propia.

Dimensiones y espaciamento entre zanjas

Para facilitar el cálculo se propone primero realizar el diseño de las zanjas para una hectárea de la parcela siguiendo el proceso sugerido por el manual de diseño de tinajas ciegas o zanjas trincheras propuesto por SAGARPA (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009). La hectárea de trabajo ha sido ubicada en un sitio con características representativas de la parcela. Dicha hectárea tiene coordenadas centroides 14N 213903 2349775 y un desnivel de 17 m, siendo su cota más alta de 2219 msnm y la más baja de 2202 msnm. Su pendiente promedio es de 17% con rumbo 30°SO. Como se observa para el resto de la parcela, la topografía es uniforme, el suelo predominante Feozem háplico y su cobertura vegetal matorral subtropical. Los datos climáticos han sido obtenidos de la estación climatológica Hacienda de Arriba (11025), identificándose una precipitación media anual de 694 mm y estimándose una lluvia máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 5 años de 6.1 cm.

De acuerdo con el procedimiento de diseño de tinajas ciegas o zanjas trincheras propuesto por SAGARPA (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009) el primer paso sería estimar con base a los escurrimientos, las dimensiones de las tinajas zanjas y su espaciamento, considerando la pendiente del terreno y la lluvia máxima en 24 horas para un periodo de retorno de al menos 5 años. Para el cálculo del intervalo vertical de las terrazas se utilizará la ecuación 6.

$$IV = \left(2 + \frac{P}{3 \text{ o } 4}\right) (0.305) \quad (6)$$

Donde: *IV* es el intervalo vertical (m); *P* es la pendiente del terreno (%); 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 1,200 mm y 0.305 es un factor de ajuste de unidades. El intervalo horizontal será obtenido con la ecuación 7.

$$IH = \left(\frac{IV}{P}\right) * 100 \quad (7)$$

Donde IH es el intervalo horizontal (m); IV es el intervalo vertical (m) y P es la pendiente del terreno. Por lo tanto, sustituyendo los valores de la ecuaciones 6 y 7 con los datos de campo se obtiene:

$$IV = \left(2 + \frac{17}{3}\right)(0.305) = 2.34 \approx 2 \quad (8)$$

$$IH = \left(\frac{2.34}{17}\right) * 100 = 13.76 \approx 14 \quad (9)$$

Para fines prácticos se podría considerar un espaciamiento vertical entre zanjas de 2 m y un espaciamiento horizontal de 14 m. A continuación, para calcular el volumen de agua escurrido hacia la tina y con ello sus dimensiones, se utilizarán los datos de uso de suelo, textura del suelo y pendiente; con lo que se procede a determinar el coeficiente de escurrimiento “ C ” auxiliándose de la información de la tabla 15. Ya que la pendiente del terreno es de 17%, el suelo es de textura fina a media y la cobertura vegetal es de matorral subtropical (menos densa que un bosque, pero más dispersa que un pastizal puro), se ha estimado un valor para C de 0.28.

Tabla 15. Factores para el coeficiente de escurrimiento (C). Recuperada de Rubio et al. (2009).

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

El volumen de agua que una tina puede retener, en función de las características de construcción de la tina, se calcula mediante la ecuación 10.

$$A = E * C * L * 10 \quad (10)$$

Donde: A es la capacidad de almacenamiento (l/m); E es el espaciamiento o intervalo horizontal entre tinas (m) o IH ; C es el coeficiente de escurrimiento (adimensional); L es la lluvia máxima en 24 hrs (cm) y 10 es el factor de ajuste de unidades. Sustituyendo los valores en la ecuación 10 se obtiene:

$$A = 14 * 0.28 * 6.1 * 10 = 239.12 \approx 240 \text{ l/m} \quad (11)$$

Por lo tanto, el volumen que puede escurrir como máximo en un periodo de retorno de 5 años sería de 240 litros por metro, por lo que, si se propone un largo de tina de 2 m, entonces el volumen que podría escurrir es de 480 litros. De acuerdo con esta información se propondría que las tinas mantuvieran las dimensiones estándar sugeridas en la literatura (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009), siendo estas de 2 m de largo, 0.50 m de ancho y 0.5 m de profundidad (figura 47), dando así una capacidad de almacenamiento de 500 litros por tina.

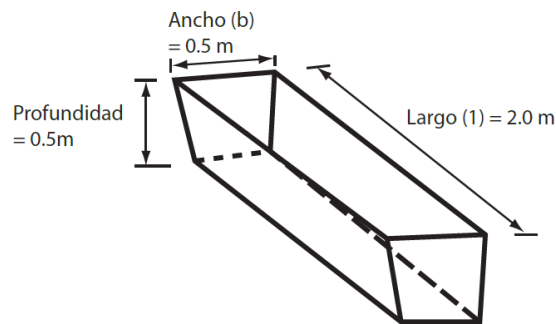


Figura 47. Dimensiones propuestas para las tinas ciegas. Recuperada de Rubio et al. (2009).

Ya que el volumen máximo que podría escurrir del área de drenaje de cada tina para un periodo de retorno de 5 años es de 480 litros, se considera que la capacidad propuesta de 500 litros para cada tina es suficiente para almacenar un evento de precipitación extraordinario que se presente en promedio al menos una vez cada cinco años. Finalmente, como último elemento de diseño, Rubio, Martínez y Sánchez

(2009) sugieren que la distribución de las zanjas dentro del terreno sea a tresbolillo. En la figura 48 se muestra esta distribución de las zanjas para el terreno, señalándose también el espaciamiento calculado.

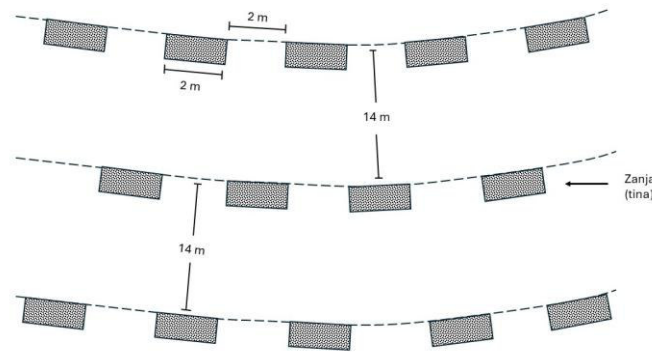


Figura 48. Distribución de las tinas ciegas en el terreno. Elaboración propia.

Cantidad de zanjas y volumen de excavación

Considerando que la longitud de cada tina es de 2 m y el espaciamiento vertical es también de 2 m, en una línea de 100 m se podrían construir 25 tinas. Ya que el espaciamiento entre líneas es de 14 m, entonces $100/14 = 7.14$, es decir, se podrían construir 7 líneas de zanjas por hectárea. Por lo tanto, en una hectárea habrá 7 líneas de 25 zanjas cada una, obteniendo así un total de 175 tinas por hectárea. Finalmente, ya que la parcela 1 tiene una superficie de 111 hectáreas, multiplicando 175×111 , se obtendría que en la parcela 1 se podrían construir aproximadamente 19,425 zanjas (tinas).

Para estimar el volumen de excavación en la parcela 1 habrá que multiplicar la cantidad de tinas por el volumen de excavación de cada tina, el cual sería de $0.5 \text{ m}^3/\text{tina}$. Por lo tanto, en una hectárea el volumen de excavación sería $175 \times 0.50 = 87.5 \text{ m}^3/\text{ha}$, mientras que el volumen de excavación para toda la parcela 1 sería de $9,713 \text{ m}^3$.

Costo de construcción

El presupuesto que se describe a continuación (Tabla 16) se ha propuesto por Cardoza et al. (2008) en el manual de obras para el control de erosión laminar publicado con

CONAFOR, quienes han considerado 100 zanjas con dimensiones de 2 m de largo x 0.40 m de ancho x 0.40 m de profundidad (0.32 m³ de volumen de excavación por zanja). Para la parcela de estudio se ha realizado un ajuste a la cantidad requerida en los conceptos de excavación y conformación de bordo, considerando un volumen de excavación por zanja de 0.50 m³; así mismo se ha realizado un ajuste a todos los costos considerando una tasa promedio de inflación mensual entre noviembre del 2008 y junio del 2025 del 0.36% (INEGI, 2025). Todos los costos se presentan en pesos mexicanos (MXN).

Es importante señalar que los costos reportados por la CONAFOR se expresan en jornales, unidad empleada para cuantificar la mano de obra requerida para la ejecución de las distintas actividades. Un jornal equivale al trabajo realizado por una persona durante una jornada laboral, por lo que el costo de cada actividad resulta del producto entre el costo unitario del jornal y el número de jornales estimados. Así, una actividad con un requerimiento de dos jornales representa el equivalente a dos días-hombre de trabajo, independientemente de que sea realizada por un trabajador durante dos días o por dos trabajadores en un solo día.

Tabla 16. Costo para la construcción de 100 zanjas trinchera . Recuperada de Cardozo et al. (2008) y modificado por el autor.

Concepto	Unidad de medida	Costo unitario (MXN)	Cantidad requerida	Costo de la actividad (MXN)
Trazo de curvas de nivel	Jornal	92	0.5	46
Limpia del terreno	Jornal	92	0.75	69
Excavación	Jornal	92	19.00	1748
Conformación del bordo	Jornal	92	6.00	552
			Total	\$ 2415

Considerando un volumen de excavación de 0.5 m³ por zanja y un costo de \$2,415 MXN para la construcción de 100 zanjas, equivalente a un volumen total de excavación de 50 m³, se estima un costo de \$48.33 MXN por m³ de excavación con medios mecánicos y de \$24.15 MXN por cada zanja. Asimismo, el costo estimado por hectárea, considerando 175 zanjas, sería de \$4,226 MXN, mientras que el costo total para la totalidad de la parcela 1, correspondiente a 19,425 zanjas, ascendería aproximadamente a \$469,114 MXN.

Capacidad de recarga

Según Neumann et al. (2004), a escala de cuenca, la disminución progresiva del nivel de agua en un reservorio es un indicador del desempeño de la estructura de recarga. Durante períodos en los que no hay entrada ni salida de agua (excepto por la recarga subterránea y las pérdidas por evaporación), la reducción del nivel hídrico se puede atribuir a la suma de estos dos factores. Por lo tanto, el balance entre la recarga y la evaporación determina si la estructura cumple su objetivo de infiltrar agua o si, por el contrario, el agua se pierde principalmente por evaporación. Este balance esta dado por la ecuación 12.

$$WR = \Delta w - E \quad (12)$$

Donde: WR es la recarga subterránea; Δw es el cambio en el volumen de agua del reservorio (altura del nivel de agua) y E la evaporación. Ya que el cálculo se realiza para acciones que aún no han sido implementadas, se propone estimar la posible recarga de las zanjas utilizando los datos de precipitación media mensual, la velocidad de infiltración del agua en el suelo y la evaporación potencial. En la tabla 17 se presentan los datos climáticos necesarios para la estimación de la posible recarga al acuífero por parte de las zanjas una vez en operación.

Tabla 17. Datos climáticos de precipitación y evaporación para la estimación de la recarga.
Elaboración propia.

Mes	Precipitación (mm/mes)	Evaporación Potencial diaria (mm)	Días de lluvia al mes
Enero	15.9	3.5	2
Febrero	10.6	4.6	1
Marzo	7	6.3	1
Abril	10.1	7.5	2
Mayo	33.2	7.2	5
Junio	117.4	6.2	10
Julio	149.8	5.3	13
Agosto	150.4	5.0	12
Septiembre	124.3	4.4	10
Octubre	49.4	4.2	6

Noviembre	14.1	3.7	2
Diciembre	11.4	3.2	2

Los autores Lozano et al. (2014) determinaron para el Feozem háplico una conductividad hidráulica saturada entre 372 y 610 mm/día, mientras que Defterdarović et al. (2021) reportaron un valor de 172 mm/día. Dado que la velocidad de infiltración depende de factores como la textura, el uso del suelo, la humedad inicial y el contenido de materia orgánica, características especialmente relevantes en los Feozems, por lo que lo más recomendable sería realizar mediciones de infiltración *in situ*. No obstante, para el presente estudio se tomará el promedio de los dos valores inferiores de conductividad hidráulica reportados en la literatura. Considerando que las pruebas de doble anillo llevan al suelo a condiciones cercanas a la saturación, este valor puede emplearse como aproximación de la velocidad de infiltración estabilizada. En consecuencia, se considerará una velocidad de infiltración de 11.33 mm/h, equivalente a 272 mm/día.

Para estimar el porcentaje de precipitación que infiltrará se propone considerar las siguientes suposiciones: 1) la precipitación de un determinado mes se distribuirá uniformemente en los días de lluvia de ese mes, 2) para cada día de lluvia primero ocurrirá la evaporación y luego la infiltración del agua restante, y 3) tomando en cuenta las dimensiones de las obras se considerará que en los días sin lluvia no existirá agua para evaporar o infiltrar.

Bajo estos criterios, se observa, por ejemplo, que enero presenta una precipitación de 15.9 mm distribuidos en dos días de lluvia, por lo tanto, la precipitación diaria será de 8 mm. Ya que la evaporación potencial diaria para ese mes es de 3.5 mm y el agua disponible de 8 mm, sobrarían 4.5 mm para infiltrar, los cuales no superan la capacidad de infiltración; permitiendo así la infiltración de la totalidad del agua disponible. El cálculo del porcentaje de infiltración se estimará con la ecuación 13.

$$\% \text{ infiltrado} = \left(\frac{\text{Infiltración total}}{\text{Precipitación total}} \right) * 100 \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación 13 con los datos para enero se obtendría un porcentaje de infiltración de:

$$\% \text{ infiltrado} = \left(\frac{4.5 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} \right) * 100 \approx 56.25 \% \quad (14)$$

Es decir, el 56.25% del volumen total de precipitación logrará ser infiltrado al suelo. Siguiendo este método para el resto de los meses se obtiene la tabla 18:

Tabla 18. Porcentaje de lluvia que infiltra. Elaboración propia.

Mes	Precipitación (mm/mes)	Porcentaje que infiltra (%)
Enero	15.9	56.3
Febrero	10.6	56.6
Marzo	7.0	10.0
Abril	10.1	0.0
Mayo	33.2	0.0
Junio	117.4	47.2
Julio	149.8	54.0
Agosto	150.4	60.1
Septiembre	124.3	64.6
Octubre	49.4	49.0
Noviembre	14.1	47.5
Diciembre	11.4	43.9

Considerando las dimensiones de zanjas propuestas, el área de cada zanja sería de 1 m². Lo que supone un área de 175 m² de zanjas por hectárea de la parcela 1. Retomando la metodología seguida por Ojeda-Olivares et al. (2017) para calcular el aporte de agua de ollas captadoras, se propone la tabla 19, en la que se calcula el volumen de agua que se podría infiltrar en una hectárea de la parcela 1 considerando la evaporación y la superficie ocupada por las obras.

Tabla 19. Volumen anual de recarga estimado para las zanjas en una hectárea de la parcela 1. Elaboración propia.

Mes	Precipitación (mm/mes)	Área de las zanjas por hectárea (m ²)	Volumen (m ³ /mes)	Volumen de infiltración considerando evaporación (m ³ /mes)
Enero	15.9	175	2.78	1.56

Febrero	10.6	175	1.86	1.05
Marzo	7.0	175	1.23	0.12
Abril	10.1	175	1.77	0.00
Mayo	33.2	175	5.81	0.00
Junio	117.4	175	20.55	9.70
Julio	149.8	175	26.22	14.16
Agosto	150.4	175	26.32	15.82
Septiembre	124.3	175	21.75	14.05
Octubre	49.4	175	8.65	4.24
Noviembre	14.1	175	2.47	1.17
Diciembre	11.4	175	2.00	0.88
Total	693.6			62.74

El aporte de las zanjas al acuífero en un hectárea es de 62.74 m³. Considerando que la parcela 1 tiene una extensión de 111 hectáreas, el volumen anual de aporte de las zanjas para toda la parcela hacia el acuífero sería de aproximadamente 6,964 m³ de agua anuales.

Parcela 2

La segunda parcela propuesta para la implementación de zanjas de infiltración (Figura 49) tiene una extensión de 59 hectáreas y se localiza a aproximadamente 3,670 m al este del límite estatal con Jalisco. El cuerpo de agua más cercano es el arroyo las Dos Aguas, el cual se ubica al norte y fluye con dirección sureste hacia la comunidad Hacienda Arriba. Destaca la presencia de un banco de material a 650 m al sur de la parcela. El suelo principal es de tipo Feozem háplico con textura relativamente fina, mientras que la cobertura vegetal es de matorral subtropical. La pendiente es ligeramente escarpada, presentando una pendiente promedio que no supera el 20% de inclinación.

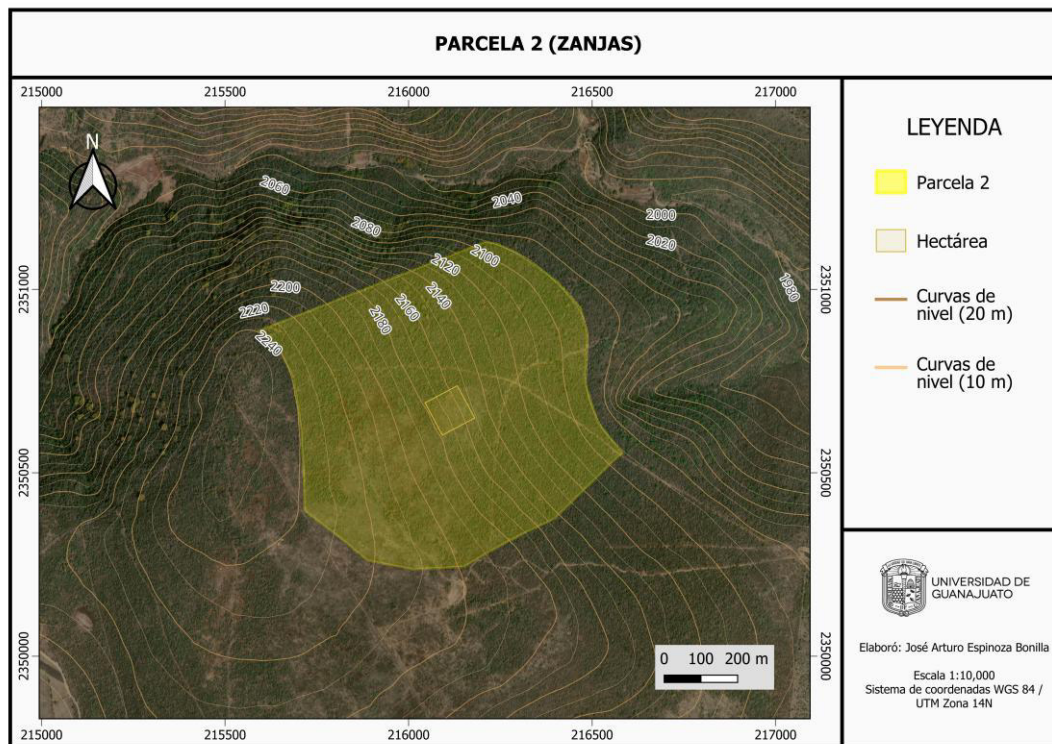


Figura 49. Parcela 2 para zanjás en el AVL. Elaboración propia.

Dimensiones y espaciamiento

Para facilitar su cálculo se realizará el diseño de las zanjás para una hectárea de la parcela siguiendo el proceso sugerido por el manual de diseño de tinajas ciegas o zanjás trincheras propuesto por SAGARPA (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009), tal como se ha realizado en la parcela 1. La hectárea de trabajo ha sido ubicada en un sitio con características representativas de la parcela 2. Dicha hectárea tiene coordenadas centroides 14N 216112 2350670 y un desnivel de 26 m, siendo su cota más alta de 2178 msnm y la más baja de 2152 msnm. Su pendiente promedio es de 26% con rumbo 60°NE. Como se observa para el resto de la parcela, la topografía es uniforme, el suelo predominante Feozem háplico y su cobertura vegetal matorral subtropical. Los datos climáticos han sido obtenidos de la estación climatológica Hacienda de Arriba (11025), identificándose una precipitación media anual de 694 mm y estimándose una lluvia máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 5 años de 6.1 cm.

Considerándose estos parámetros y sustituyéndose las ecuaciones 6 y 7 se obtendría un $IV = 3.25$ y un $IH = 12.5$; por lo que para fines prácticos se podría considerar un espaciamiento vertical entre zanjas de 3 m y un espaciamiento horizontal de 13 m. Ya que la pendiente del terreno es de 17%, el suelo es de textura fina a media y la cobertura vegetal es de matorral subtropical (menos densa que un bosque, pero más dispersa que un pastizal puro), se ha estimado a partir de la tabla 14 un valor para C de 0.28.

Sustituyendo estos valores en la ecuación 10 se obtiene que el volumen que puede escurrir como máximo en un periodo de retorno de 5 años sería de 222 litros por metro, por lo que, si se propone un largo de tina de 2 m, entonces el volumen que podría escurrir es de 444 litros. De acuerdo con esta información se propondría que las tinas mantuvieran las dimensiones estándar sugeridas en la literatura (Fernández, Martínez, y Ramírez, 2009), siendo estas de 2 m de largo, 0.50 m de ancho y 0.5 m de profundidad, dando así una capacidad de almacenamiento de 500 litros por tina, lo cual sería suficiente para almacenar un evento de precipitación extraordinario que se presente en promedio al menos una vez cada cinco años. Finalmente, como última consideración de diseño se sugiere que la distribución de las zanjas dentro del terreno sea a tresbolillo.

Cantidad de zanjas y volumen de excavación

Considerando que la longitud de cada tina es de 2 m y el espaciamiento vertical es de 3 m, en una línea de 100 m se podrían construir 20 tinas. Ya que el espaciamiento entre líneas es de 13 m, entonces $100/13 = 7.69$, es decir, se podrían construir 7 líneas de zanjas por hectárea. Por lo tanto, en una hectárea habrá 7 líneas de 20 zanjas cada una, obteniendo así un total de 140 tinas por hectárea. Finalmente, ya que la parcela 2 tiene una superficie de 59 hectáreas, multiplicando 140×59 , se obtendría que en la parcela 2 se podrían construir aproximadamente 8,260 zanjas (tinas).

Para estimar el volumen de excavación en la parcela 2 se multiplicará la cantidad de tinas por el volumen de excavación de cada tina, el cual es de $0.5 \text{ m}^3/\text{tina}$. Por lo tanto, en una hectárea el volumen de excavación sería $140 \times 0.50 = 70 \text{ m}^3/\text{ha}$, mientras que el volumen de excavación para toda la parcela 2 sería de $4,130 \text{ m}^3$.

Costo de construcción

Dado que el volumen de almacenamiento de las zanjas en la parcela 2 es igual al de la parcela 1 (0.5 m³/tina), el costo por zanja se mantiene en \$24.15 MXN y el costo por m³ de excavación en \$48.33 MXN. Esto implica un costo por hectárea (considerando 140 zanjas) de \$3,381 MXN, lo que resulta en un costo total de \$199,479 MXN para toda la parcela 2 (8,260 zanjas).

Capacidad de recarga

Para la estimación de la recarga de las zanjas para la parcela 2 se utilizarán los datos climáticos de la estación Hacienda de Arriba, así como un valor de velocidad de infiltración de agua en el suelo 11.33 mm/hora o 272 mm diarios, pues este es también Feozem háplico. Los resultados, ajustando la superficie de las zanjas, la cual es de 140 m² por hectárea se presenta en la tabla 20.

Tabla 20. Volumen anual de recarga estimado para las zanjas en una hectárea de la parcela 2.
Elaboración propia.

Mes	Precipitación (mm/mes)	Área de las zanjas por hectárea (m ²)	Volumen (m ³ /mes)	Volumen de infiltración considerando evaporación (m ³ /mes)
Enero	15.9	140	2.23	1.25
Febrero	10.6	140	1.48	0.84
Marzo	7.0	140	0.98	0.10
Abril	10.1	140	1.41	0.00
Mayo	33.2	140	4.65	0.00
Junio	117.4	140	16.44	7.76
Julio	149.8	140	20.97	11.32
Agosto	150.4	140	21.06	12.65
Septiembre	124.3	140	17.40	11.24
Octubre	49.4	140	6.92	3.39
Noviembre	14.1	140	1.97	0.94
Diciembre	11.4	140	1.60	0.70
Total	693.6			50.19

El aporte de las zanjas al acuífero en un hectárea es de 50.19 m³, pero ya que la parcela 2 tiene una extensión de 59 hectáreas, el volumen total anual de aporte de las zanjas en toda la parcela hacia el acuífero sería de aproximadamente 2,962 m³ de agua.

Parcela 3

La tercera parcela propuesta para la implementación de zanjas de infiltración (Figura 50) tiene una extensión de 65 hectáreas. No se identifican cursos de agua próximos, siendo el más cercano el arroyo La Angostura, el cual se ubica aproximadamente a 700 m al oeste de la parcela y fluye en dirección sureste.

Destaca la presencia de tres estanques de agua de dimensiones considerables ubicados en la parte baja de la colina que alberga la parcela, lo cual evidencia la pertinencia de implementar medidas que favorezcan la intercepción e infiltración de agua de lluvia. Los asentamientos urbanos más cercanos son San Fernando, Lomas del Rodeo y Granja el Rodeo, ubicados todos al este de la parcela. El suelo principal es de tipo Feozem háplico con textura media, mientras que la cobertura vegetal es de matorral subtropical. La pendiente de la parcela es moderadamente inclinada, con una pendiente promedio que no supera el 11% de inclinación.

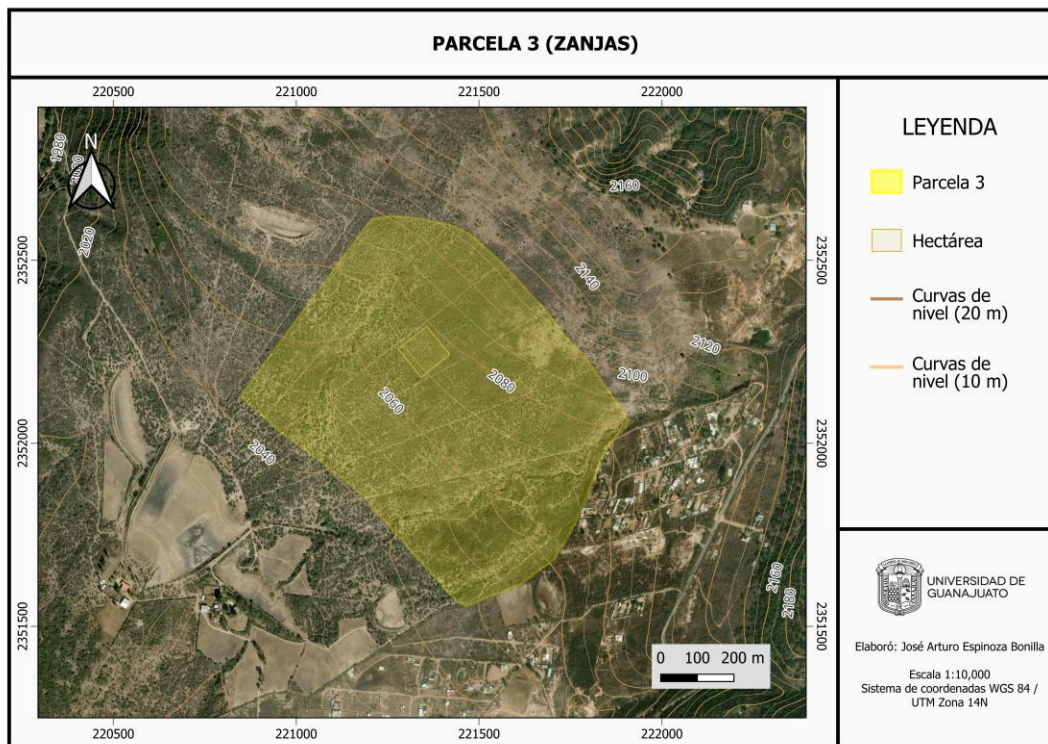


Figura 50. Parcela 3 para zanjas en el AVL. Elaboración propia.

Dimensiones y espaciamiento

Como se llevó a cabo para las parcelas anteriores, se propondrá primero el diseño de las zanjas para una hectárea siguiendo el proceso sugerido por el manual de diseño de tinajas ciegas o zanjas trincheras propuesto por SAGARPA (Rubio, Martínez, y Sánchez, 2009). La hectárea de trabajo ha sido ubicada en un sitio con características representativas de la parcela 3. Dicha hectárea tiene coordenadas centroides 14N 221349 2352250 y un desnivel de 10 m, siendo su cota más alta de 2078 msnm y la más baja de 2068 msnm. Su pendiente promedio es de 10% con rumbo 51°SO. Como se observa para el resto de la parcela, la topografía es uniforme, el suelo predominante Feozem háplico y su cobertura vegetal matorral subtropical. Los datos climáticos han sido obtenidos mediante el promedio de datos de las estaciones climatológicas Hacienda de Arriba (11025) y Media Luna (11045), identificándose una precipitación media anual de 740 mm y estimándose una lluvia máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 5 años de 6.8 cm.

Considerándose estos parámetros y sustituyéndose las ecuaciones 6 y 7 se obtendría un $IV = 1.63$ y un $IH = 16.3$; por lo que para fines prácticos se podría considerar un espaciamiento vertical entre zanjas de 2 m y un espaciamiento horizontal de 16 m. Ya que la pendiente del terreno es de 10%, el suelo es de textura media y la cobertura vegetal es de matorral subtropical (menos densa que un bosque, pero más dispersa que un pastizal puro), se ha estimado a partir de la tabla 14 un valor para C de 0.26.

Sustituyendo estos valores en la ecuación 10 se obtiene que el volumen que puede escurrir como máximo en un periodo de retorno de 5 años sería de 283 litros por metro, por lo que, si se propone un largo de tina de 2 metros, entonces el volumen que podría escurrir es de 566 litros. De acuerdo con esta información se propone que las tinas tengan 2 m de largo, 0.60 m de ancho y 0.5 m de profundidad, dando así una capacidad de almacenamiento de 600 litros por tina, lo cual sería suficiente para almacenar un evento de precipitación extraordinario que se presente en promedio al menos una vez cada cinco años. Como última consideración de diseño se sugiere que la distribución de las zanjas dentro del terreno sea a tresbolillo.

Cantidad de zanjas y volumen de excavación

Considerando que la longitud de cada tina es de 2 m y el espaciamiento entre ellas también de 2 m, en una línea de 100 m se podrían construir 25 tinas. Ya que el espaciamiento entre líneas es de 16 m, entonces $100/16 = 6.25$, es decir, se podrían construir 6 líneas de zanjas por hectárea. Por lo tanto, en una hectárea habrá 6 líneas de 25 zanjas cada una, obteniendo así un total de 150 tinas o zanjas por hectárea. Finalmente, ya que la parcela 3 tiene una superficie de 65 hectáreas, multiplicando 150×65 , se obtendría que en la parcela 3 se podrían construir aproximadamente 9,750 zanjas (tinas).

Para estimar el volumen de excavación en la parcela 3 se multiplicará la cantidad de tinas por el volumen de excavación de cada tina, el cual es de $0.6 \text{ m}^3/\text{tina}$. Por lo tanto, en una hectárea el volumen de excavación sería $150 \times 0.60 = 90 \text{ m}^3/\text{ha}$, mientras que el volumen de excavación para toda la parcela 3 sería de $5,850 \text{ m}^3$.

Costo de construcción

Dado que el volumen de almacenamiento de cada zanja es de 0.6 m³, se ha ajustado el costo por zanja a \$29 MXN. Esto implica un costo por hectárea (considerando 150 zanjas) de \$4,350 MXN y un costo total de \$282,750 MXN para toda la parcela 3 (9,750 zanjas).

Capacidad de recarga

Para la estimación de la recarga de las zanjas para la parcela 3 se utilizarán los datos climáticos promediados de las estaciones Hacienda de Arriba y Media Luna, así como una velocidad de infiltración de agua en el suelo de 11.33 mm/hora o 272 mm diarios. Los resultados, ajustando la superficie de las zanjas, la cual es de 180 m² por hectárea se presenta en la tabla 21.

Tabla 21. Volumen anual de recarga estimado para las zanjas en una hectárea de la parcela 3.
Elaboración propia.

Mes	Precipitación (mm/mes)	Área de las zanjas por hectárea (m ²)	Volumen (m ³ /mes)	Volumen de infiltración considerando evaporación (m ³ /mes)
Enero	16.1	180	2.89	1.67
Febrero	10.6	180	1.91	1.17
Marzo	8.0	180	1.44	0.41
Abril	11.8	180	2.12	0.00
Mayo	38.2	180	6.88	1.02
Junio	125.1	180	22.52	12.25
Julio	160.1	180	28.82	16.89
Agosto	158.3	180	28.49	17.92
Septiembre	128.1	180	23.06	15.31
Octubre	55.5	180	9.98	5.56
Noviembre	15.5	180	2.78	1.49
Diciembre	12.6	180	2.27	1.15
Total	739.9			74.84

El aporte de las zanjas al acuífero en un hectárea es de 74.84 m³, pero ya que la parcela 3 tiene una extensión de 65 hectáreas, el volumen total anual de aporte de las zanjas en toda la parcela hacia el acuífero sería de aproximadamente 4,865 m³ de agua.

7.3.2 Estanques

Parcela 1

La parcela propuesta para la implementación de estanques de infiltración (Figura 51) tiene una extensión de 452 hectáreas. Localizada a 2208 msnm, se trata de una extensa zona elevada de terreno con cima plana y lados de pendiente abrupta, por lo que es conocida como Mesa La Virgen. De sus acantilados nacen distintos arroyos, como El Calvillo, por el flanco occidental, y El Tigre, Guanajuatito y los Castillos, por el flanco oriental. Se identifica la presencia de distintos estanques, siendo el más grande el de Calvillo con aproximadamente 2.9 hectáreas de extensión, ubicado en la porción suroeste de la parcela. Las comunidades más cercanas son Mesa de la Virgen y San Fernando, al norte; Lomas del Rodeo, Granja el Rodeo y Granja Tres Pulgas del Rodeo, al occidente; y Toronjas y Cañada de Ochoa, al sur. El suelo principal es Feozem háplico con textura media y permeabilidad moderada a buena, mientras que la cobertura vegetal corresponde a pastizal inducido. La pendiente de la parcela es muy suave, con una pendiente promedio que no supera el 3% de inclinación.

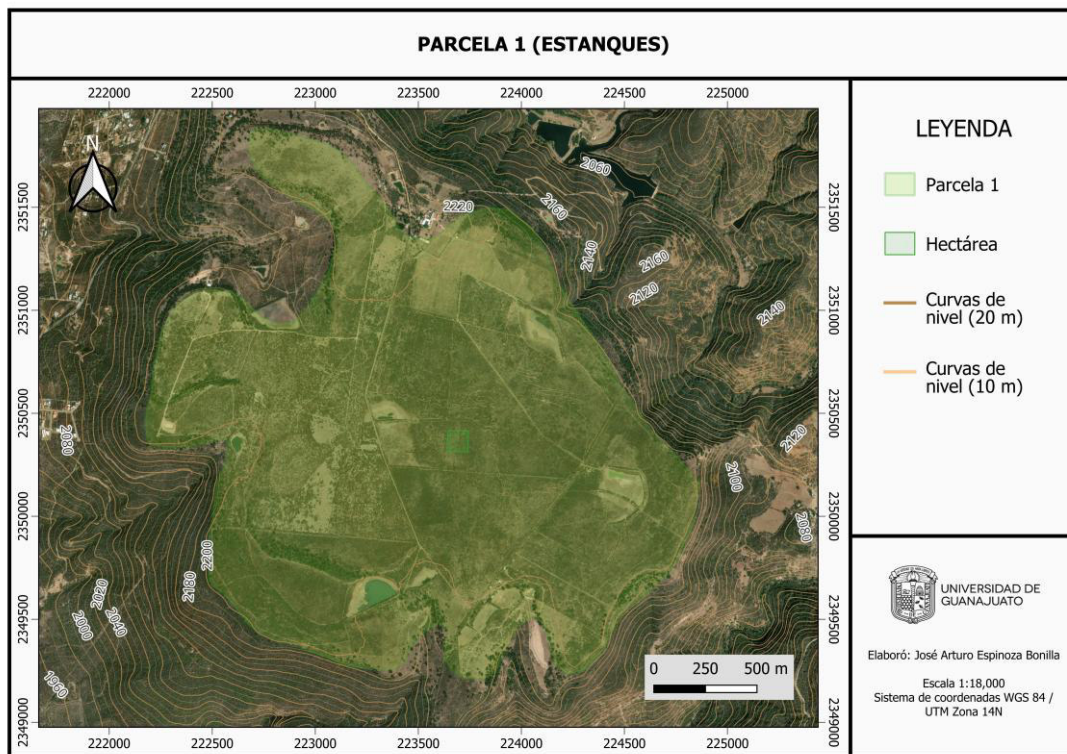


Figura 51. Parcela 1 para estanques en el AVL. Elaboración propia.

Localización y dimensiones del estanque

Con el objetivo de mostrar un ejemplo de posible aplicación de un estanque en la parcela, se han aplicado las herramientas hidrológicas *Flow Direction*, *Flow Accumulation* y *Basin* en ArcGIS 10.4.1 sobre las cartas con escala 1:10,000 del MDE con resolución de 5 m del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), publicado por el INEGI. Como resultado de este proceso se ha generado un mapa con los sitios de acumulación de agua dentro de la parcela, determinando como primer paso, las ubicaciones en las que se podrían implementar los estanques, así como las áreas de captación para cada uno de ellos (Figura 52).

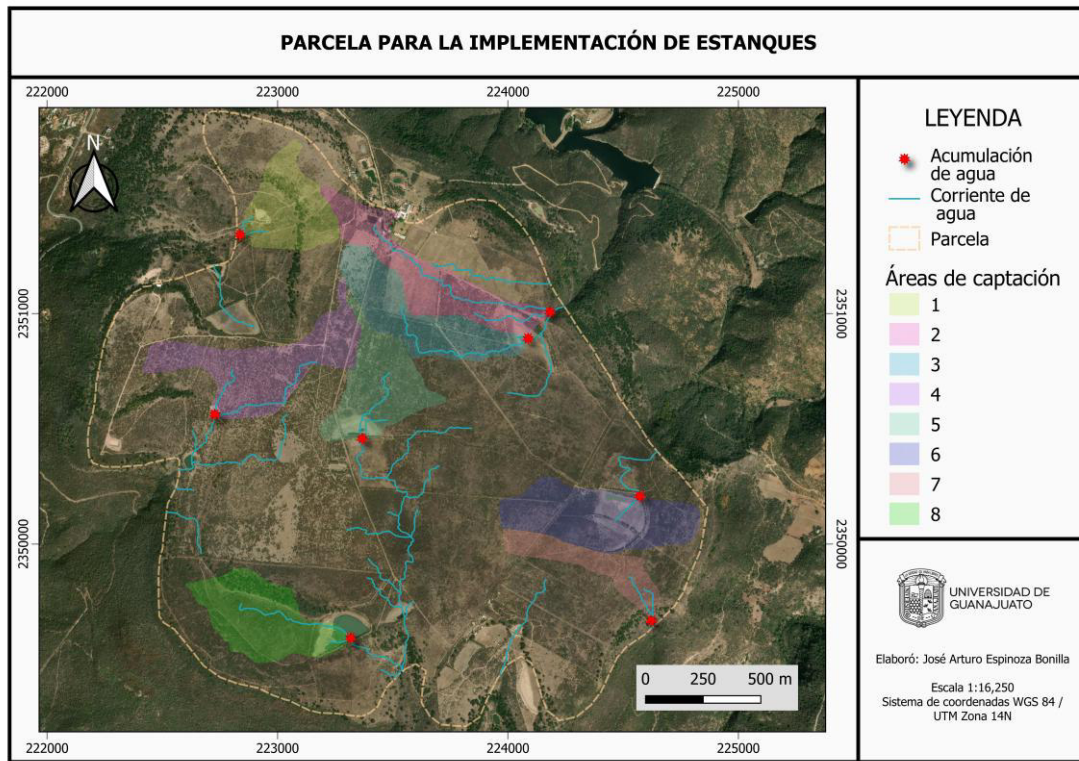


Figura 52. Parcela 1 para estanques en el AVL. Elaboración propia.

Como resultado se identifican ocho sitios de acumulación de agua a los que aportan exclusivamente corrientes de agua de segundo orden o superior. Destaca que en seis de ellos ya se han implementado acciones de bordería, demostrando así la afinidad de este tipo de acciones con las características físicas e hidrológicas de la parcela. Como consecuencia de estos hallazgos se podría proponer la implementación de estanques en aquellos sitios de acumulación de agua en los que aún no se han implementado; identificados con los números 2 y 7 (Figura 52). Para fines prácticos y a modo de ejemplo, se propone la construcción de un estanque en la microcuenca número 7, la cual tendría un área de aporte hacia el estanque de 8.24 hectáreas.

Para determinar las dimensiones del estanque se aplicará el Método Racional Modificado sugerido por Fernández et al. (2017) para la construcción de jagüeyes, el cual es un método sencillo y valido para obras pequeñas cuyas cuencas no sean mayores a 80 ha. La fórmula es la siguiente (ecuación 15):

$$Q = \frac{Ce * i * A}{360} \quad (15)$$

Donde: Q es el gasto máximo (m^3/s); C es el coeficiente de escurrimiento (Adim.); i es la intensidad de la precipitación (mm/hr) y A es el área de captación del estanque (ha). El valor aproximado de C_e se obtendrá a partir de la pendiente del terreno, uso de suelo, y textura del suelo, con ayuda de la tabla 22. Mientras que para el dato de intensidad de precipitación se utilizará la lluvia máxima en 24 para un periodo de retorno de 10 años, asumiéndose así que, para un periodo crítico, la lluvia reportada en 24 horas podrá presentarse en una hora.

Tabla 22. Aproximación del valor del coeficiente de escurrimiento. Recuperada de Fernández et al. (2017).

Uso de suelo	Pendiente (%)	Textura		
Bosque	0-5	G	M	F
	6-10	0.10	0.30	0.40
	11-30	0.25	0.35	0.50
Pastizales	0-5	0.10	0.30	0.40
	6-10	0.16	0.36	0.55
	11-30	0.22	0.42	0.60
Terrenos cultivados	0-5	0.30	0.50	0.60
	6-10	0.40	0.60	0.70
	11-30	0.52	0.72	0.82

Sustituyendo los datos requeridos en la ecuación 15 se obtiene (ecuación 16):

$$Q = \frac{0.30 * 79 * 8.24}{360} = 0.542 \, m^3/s \quad (16)$$

Con dicho valor de caudal se estima que durante una precipitación de una hora podría ingresar al estanque un volumen total de $1,951 \, m^3$. Siguiendo el método propuesto por Fernández et al., (2017) para la construcción de estanques considerando tres planos de superficie, se propone la implementación de un estanque de forma circular con talud suave (3:1) con una profundidad de 2.0 m, un diámetro de 43 m para el plano a (boca del estanque), 36 m en el plano b (1 m de profundidad), y 30 m en el

plano c o base del estanque (Figura 53). El cálculo del volumen total de almacenamiento para cada estanque esta dado por la ecuación 17.

$$V = \frac{A + 4B + C}{6} * D \quad (17)$$

Donde: V es el volumen de excavación (m^3); A el área del plano a (m^2); B el área del plano b (m^2); C el área del plano c (m^2); y D la profundidad (m). Sustituyendo en la ecuación 17 las dimensiones propuestas para el estanque, se obtiene un volumen de almacenamiento de $2,077 m^3$ para el estanque (ecuación 18). Por lo cual sería suficiente para almacenar un evento de precipitación extraordinario que se presente en promedio al menos una vez cada diez años.

$$V = \frac{1452.20 + 4(1017.88) + 706.86}{6} * 2.0 = 2,077 m^3 \quad (18)$$

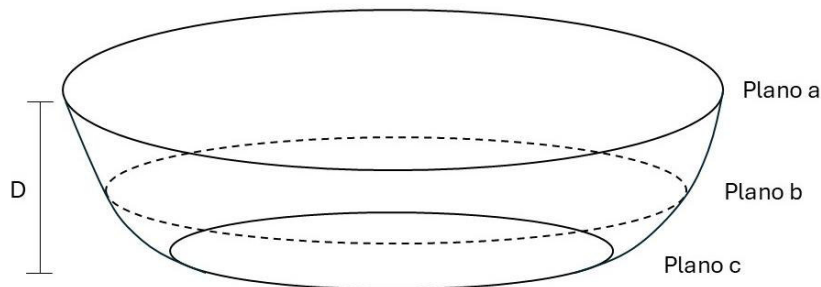


Figura 53. Ejemplo de estanque. Elaboración propia.

Costo de construcción

Se ha estimado para las zanjas de infiltración un costo de construcción por cada m^3 de \$48.33 MXN, considerando mano de obra y maquinaria. Manteniendo este presupuesto, se estima que la construcción del estanque propuesto, cuyo volumen

total es de 2,077 m³, requeriría una inversión de aproximadamente \$100,381 MXN para su construcción.

Capacidad de recarga

Retomando el proceso seguido para determinar la recarga de las zanjas de infiltración, así como la metodología seguida por Ojeda-Olivares et al. (2017) para calcular el aporte de agua de ollas captadoras, se propone la tabla 23, en la que se calcula el volumen de agua que se podría infiltrar considerando la precipitación, evaporación y superficie ocupada por el estanque. Para estimar la contribución del estanque a la recarga del acuífero se utilizan los datos climáticos de la estación Media Luna, así como una velocidad de infiltración de agua en el suelo de 11.33 mm/hora o 272 mm diarios, obtenidos mediante pruebas de velocidad de infiltración del suelo.

Tabla 23. Volumen anual de recarga estimado para el estanque propuesto. Elaboración propia.

Mes	Precipitación (mm/mes)	Superficie del estanque (m ²)	Volumen (m ³ /mes)	Volumen de infiltración considerando evaporación (m ³ /mes)
Enero	16.2	1452.2	23.53	14.23
Febrero	10.6	1452.2	15.39	10.16
Marzo	9.0	1452.2	13.07	5.66
Abril	13.5	1452.2	19.60	2.76
Mayo	43.2	1452.2	62.74	21.33
Junio	132.8	1452.2	192.85	117.25
Julio	170.4	1452.2	247.45	153.17
Agosto	166.1	1452.2	241.21	157.51
Septiembre	131.9	1452.2	191.55	130.63
Octubre	61.5	1452.2	89.31	54.48
Noviembre	16.8	1452.2	24.40	13.93
Diciembre	13.8	1452.2	20.04	11.32
Total	785.8			692.45

Se estima que el aporte del estanque al acuífero sería de aproximadamente 692.45 m³ anuales.

7.4 Evaluación económica de zanjas y estanques en el AVL bajo cuatro escenarios de rendimiento hidráulico

El principal problema al que se enfrentan las acciones de recarga hídrica es la colmatación, entendida como la acumulación progresiva de materiales sobre la superficie de infiltración, lo que reduce gradualmente la capacidad de recarga de las obras y, en consecuencia, su vida útil (López et al., 2000). Debido a ello, la duración funcional de estructuras como estanques y zanjas de infiltración depende principalmente del mantenimiento que reciban, así como de factores como la sedimentación, el tipo de suelo, la pendiente y la intensidad de las lluvias. En este sentido, no existe un valor universal para determinar la vida útil de este tipo de obras; sin embargo, López et al. (2000) señalan que las balsas o estanques de infiltración pueden mantener una vida útil superior a los 10 años mediante labores periódicas de descolmatación, pudiendo incluso superar los 20 años en estructuras de mayor tamaño.

De manera similar, existen distintas recomendaciones orientadas a preservar la eficiencia hidráulica de estas obras y prolongar su funcionamiento. Para las zanjas de infiltración, Weber et al. (2000) recomiendan realizar labores de limpieza entre una y tres veces por año, dependiendo de la cantidad de sedimentos transportados por el escurrimiento superficial. Por su parte, Fernández et al. (2017) señalan que el mantenimiento de los estanques no requiere supervisión especializada, aunque destacan la importancia de evitar procesos de azolvamiento dentro del estanque.

Lo anterior sugiere que tanto las zanjas como los estanques pueden constituir acciones técnica y económicamente viables a largo plazo, siempre y cuando se realicen labores periódicas de mantenimiento y descolmatación, así como la posible incorporación de infraestructura complementaria orientada a disminuir la acumulación de sedimentos. No obstante, con el propósito de evaluar la sensibilidad de estas obras ante la pérdida progresiva de capacidad operativa, en el presente estudio se analizaron cuatro escenarios de costo-rendimiento para las acciones propuestas en el AVL.

Dada la necesidad de realizar simulaciones hidrológicas y de transporte de sedimentos para estimar con precisión los procesos de colmatación en las obras de infiltración, se definieron cuatro escenarios teóricos de reducción del rendimiento hidráulico para zanjas y estanques durante el primer año posterior a su implementación. Estos escenarios representan distintos grados de acumulación de sedimentos y deterioro funcional que podrían presentarse en función de las

condiciones del sitio, la intensidad de los eventos de lluvia, las características de suelo, la cobertura vegetal y las labores de mantenimiento realizadas.

El primer escenario corresponde a un rendimiento hidráulico del 100%, representando las condiciones iniciales de operación de las obras. Bajo este supuesto, la acumulación de sedimentos es mínima y la capacidad de infiltración permanece prácticamente inalterada respecto a la condición de diseño. El segundo escenario considera una reducción moderada del rendimiento hidráulico hasta el 75% de su capacidad original. Este escenario representa una situación en la que los escurrimientos superficiales transportan cantidades moderadas de sedimentos, materia orgánica y partículas gruesas que comienzan a depositarse en el fondo y en las superficies infiltrantes de las obras, disminuyendo parcialmente su eficiencia.

El tercer escenario contempla una reducción del rendimiento hidráulico al 50% de la capacidad inicial. En este caso, además de la acumulación de sedimentos gruesos, se produce el depósito de partículas finas (limos y arcillas) que obstruyen progresivamente los poros del suelo y reducen de manera significativa la conductividad hidráulica de las superficies de infiltración. Este escenario puede estar asociado a eventos de lluvia de alta intensidad, procesos erosivos activos en la cuenca de aporte o insuficientes labores de conservación y mantenimiento. Finalmente, el cuarto escenario representa una condición crítica de colmatación, en la que las obras conservan únicamente el 25% de su rendimiento hidráulico original. Esta situación se asocia a una acumulación considerable de sedimentos finos y materia orgánica, así como a la formación de capas de baja permeabilidad que limitan severamente la infiltración. Dichas condiciones pueden derivarse de una combinación de procesos erosivos persistentes, ausencia de mantenimiento, degradación de la cobertura vegetal aguas arriba o eventos hidrometeorológicos extraordinarios que incrementan significativamente el transporte de sedimentos hacia las obras. Dichos escenarios permiten evaluar la sensibilidad de los indicadores técnicos y económicos ante la pérdida progresiva de capacidad operativa de las obras, identificando el efecto que la colmatación tiene sobre los volúmenes efectivamente infiltrados y, en consecuencia, sobre el costo por metro cúbico de agua infiltrada.

Bajo este contexto, el costo de construcción se estimó en aproximadamente \$48.33 MXN por cada m^3 de excavación. Con base en este presupuesto y considerando las dimensiones propuestas para las obras, en la parcela 1 se estimó la construcción de 19,425 zanjas, lo que representaría una inversión aproximada de \$469,114 MXN y una recarga anual estimada de 6,964 m^3 de agua. Para la parcela 2, el costo total estimado sería de \$199,479 MXN para la construcción de 8,260 zanjas, con una recarga anual aproximada de 2,962 m^3 ; mientras que en la parcela 3 la inversión ascendería a

\$282,750 MXN para un total de 9,750 zanjas, permitiendo una recarga estimada de 4,865 m³ anuales. En el caso del estanque propuesto, cuyo volumen de almacenamiento es de 2,077 m³, la inversión requerida para su construcción sería de aproximadamente \$100,381 MXN, estimándose una recarga anual cercana a 692 m³ de agua. La estimación del comportamiento costo-rendimiento para el estanque y las parcelas propuestas en el AVL se presenta en la tabla 24.

Tabla 24. Comparación costo–rendimiento de las obras de infiltración propuestas en las parcelas de estudio del AVL. Elaboración propia.

Obra	Cantidad	Inversión (MXN)	Recarga anual estimada (m ³)				Costo por m ³ infiltrado (MXN/m ³)			
			100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
Parcela 1 – Zanjas	19,425 zanjas	\$469,114	6,964	5,223	3,482	1,741	67.36	89.82	134.73	269.45
Parcela 2 – Zanjas	8,260 zanjas	\$199,479	2,962	2,222	1,481	741	67.35	89.77	134.69	269.2
Parcela 3 – Zanjas	9,750 zanjas	\$282,750	4,865	3,649	2,433	1,216	58.12	77.49	116.21	232.52
Estanque 1	1 estanque	\$100,381	692	519	346	173	145.06	193.41	290.12	580.24

Nota: Los porcentajes corresponden a escenarios de rendimiento hidráulico de las obras (100%, 75%, 50% y 25%), asociados a distintos grados potenciales de colmatación durante el primer año de operación. La disminución del rendimiento refleja diferentes niveles de acumulación de sedimentos y la consecuente reducción de la capacidad de infiltración respecto a las condiciones iniciales de funcionamiento.

Continuando con el análisis de la superficie apta para la implementación de estas acciones en la totalidad del AVL (tabla 25), se estima que las zanjas podrían establecerse en aproximadamente 1,932 ha clasificados como viables para su construcción. Bajo condiciones iniciales de operación, esta superficie permitiría implementar 299,460 zanjas con un potencial promedio de infiltración anual cercano a 0.41 m³ cada una, pudiendo alcanzar en total una recarga anual estimada de 121,716 m³ de agua, mediante una inversión aproximada de \$7,700,986 MXN, lo que equivale a un costo de \$63.27 MXN por cada m³ de agua infiltrada. Al considerar distintos escenarios de rendimiento hidráulico, el comportamiento costo-rendimiento presenta variaciones importantes. Con una eficiencia operativa del 75%, la recarga anual alcanzaría 91,287 m³, con un costo estimado de \$84.36 MXN por m³ infiltrado. En un escenario intermedio, correspondiente al 50% de rendimiento, la recarga disminuiría a 60,858 m³ y el costo se incrementaría a \$126.50 MXN por m³. Finalmente, bajo un escenario de baja eficiencia (25% de rendimiento), la recarga

anual sería de 30,429 m³, mientras que el costo ascendería hasta \$253 MXN por m³ de agua infiltrada.

De manera similar, considerando la implementación de un total de 16 estanques con características equivalentes al escenario propuesto para el estanque 1, distribuidos en las 462 hectáreas identificadas como aptas para este tipo de infraestructura, bajo condiciones iniciales de operación podría alcanzarse una recarga anual estimada de 11,079 m³ de agua. Para ello sería necesaria una inversión aproximada de \$1,505,715 MXN, lo que equivale a un costo de \$136 MXN por cada m³ de agua infiltrada. Al evaluar distintos escenarios de desempeño hidráulico para los estanques, se observa nuevamente una variación importante en la relación costo-rendimiento. Bajo un escenario con una eficiencia operativa del 75%, la recarga anual alcanzaría aproximadamente 8,304 m³ de agua, con un costo estimado de \$181.32 MXN por cada m³ infiltrado. En un escenario intermedio, correspondiente al 50% de rendimiento, la recarga disminuiría a 5,536 m³ anuales, mientras que el costo se incrementaría a \$271.98 MXN por m³ infiltrado. Finalmente, bajo un escenario de baja eficiencia, equivalente al 25% de rendimiento, la recarga anual sería de apenas 2,768 m³, elevándose el costo hasta \$543.97 MXN por cada m³ de agua infiltrada.

Tabla 25. Evaluación costo-rendimiento de zanjas y estanques de infiltración bajo distintos escenarios de desempeño hidráulico en el AVL. Elaboración propia.

Acción	Cantidad	Escenario de rendimiento	Recarga anual estimada (m ³)	Inversión estimada (MXN)	Costo por m ³ infiltrado (MXN/m ³)	Observaciones
Zanjas	299,460	100%	121,716	\$7,700,986	\$63.27	Sin colmatación apreciable.
Zanjas	299,460	75%	91,287	\$7,700,986	\$84.36	Colmatación moderada.
Zanjas	299,460	50%	60,858	\$7,700,986	\$126.50	Colmatación significativa.
Zanjas	299,460	25%	30,429	\$7,700,986	\$253.00	Colmatación severa.
Estanques	16	100%	11,079	\$1,505,715	\$136.00	Sin colmatación apreciable.
Estanques	16	75%	8,304	\$1,505,715	\$181.32	Colmatación moderada.
Estanques	16	50%	5,536	\$1,505,715	\$271.98	Colmatación significativa.

Estanques	16	25%	2,768	\$1,505,715	\$543.97	Colmatación severa.
-----------	----	-----	-------	-------------	----------	---------------------

Nota: Los escenarios de rendimiento hidráulico representan condiciones potenciales de operación durante el primer año posterior a la implementación de las obras, bajo distintos niveles de precipitación, transporte de sedimentos y procesos de colmatación. La reducción del rendimiento refleja diferentes grados de acumulación de sedimentos y la consecuente disminución de la capacidad de infiltración respecto a la condición inicial de diseño.

Es importante señalar que los escenarios analizados no representan una predicción específica de la evolución de las obras, sino un conjunto de condiciones hipotéticas de reducción progresiva del rendimiento hidráulico asociadas a diferentes grados de colmatación. Como ya se ha mencionado, dichos procesos pueden estar influenciados por factores como la dinámica de transporte de sedimentos, la intensidad de los eventos de lluvia, las condiciones de erosión en las áreas de aportación y las características físicas de los suelos. Los resultados muestran que tanto las zanjas como los estanques presentan una sensibilidad importante a la pérdida de capacidad operativa, reflejada en un incremento progresivo del costo por metro cúbico infiltrado conforme disminuye su rendimiento hidráulico. En este sentido, los escenarios evaluados permiten acotar el rango de desempeño esperado de las obras ante distintos niveles de afectación de su capacidad de infiltración y almacenamiento.

Finalmente, los resultados obtenidos sugieren que las zanjas de infiltración representan una alternativa más eficiente y viable para incrementar la recarga hídrica a gran escala en el AVL. Bajo condiciones ideales de operación, las zanjas presentan una relación recarga/excavación considerablemente superior a la observada en los estanques. Mientras las zanjas infiltran anualmente entre el 72% y el 83% del volumen excavado, el estanque propuesto únicamente infiltra aproximadamente el 33% de su volumen de almacenamiento. De manera específica, en la parcela 1 las zanjas permiten infiltrar aproximadamente 0.72 m³ de agua por cada m³ excavado (6,964 m³ de recarga frente a 9,713 m³ excavados); en la parcela 2 la relación es cercana a 0.72 m³/m³ (2,962 m³ frente a 4,130 m³); y en la parcela 3 alcanza aproximadamente 0.83 m³/m³ (4,865 m³ frente a 5,850 m³). En contraste, el estanque propuesto infiltra únicamente alrededor de 0.33 m³ por cada m³ excavado (692 m³ de recarga frente a 2,077 m³ de almacenamiento). De manera similar, en términos económicos, las zanjas permiten infiltrar entre 15 y 17 m³ de agua por cada \$1,000 MXN invertidos, mientras que el estanque infiltra cerca de 7 m³ por la misma inversión.

Estas diferencias se relacionan principalmente con los criterios de diseño hidráulico considerados. Mientras las zanjas fueron dimensionadas para un periodo de retorno de 5 años, el estanque fue diseñado para un periodo de retorno de 10 años, lo que

implica excavaciones de mayor tamaño para garantizar la seguridad hidráulica de la obra frente a eventos extremos. Como consecuencia, una proporción importante del volumen del estanque no será utilizada de manera regular bajo condiciones promedio de operación, reduciendo la relación entre volumen excavado y volumen efectivamente infiltrado.

En este sentido, aunque ambos sistemas constituyen medidas pertinentes para fortalecer la gestión hídrica y favorecer procesos de captación e infiltración, las zanjas muestran un mayor potencial para su implementación extensiva dentro del AVL, particularmente en términos de relación costo-rendimiento, eficiencia hidráulica y capacidad de recarga.

7.5 Posible impacto de las zanjas y estanques para la mitigación de la sobreexplotación del AVL

Se ha estimado la posible recarga al AVL en cuatro escenarios; para tres parcelas y un estanque de infiltración propuestos al norte de la ciudad de León. Con el objetivo de obtener un volumen de recarga representativo para el resto de las superficies con alta afinidad para la implementación de zanjas, se promedió el aporte de agua al acuífero de las tres parcelas. Considerando que se ha identificado una superficie de 19.32 km² con alta afinidad para la implementación de zanjas y acciones afines dentro del AVL, se estima que, de aprovecharse en su totalidad, se podrían construir 299,460 zanjas e infiltrar hasta 121,716 m³ de agua anuales, con una inversión aproximada de \$7,700,986 MXN.

En el caso del estanque propuesto, cuya área de captación es de 8.24 hectáreas, se estimó un aporte anual al acuífero de aproximadamente 692 m³. Si se considera que las 462 hectáreas identificadas como aptas para la implementación de estanques presentan condiciones climáticas, hidrológicas y superficiales similares, y se asume la construcción de estructuras con dimensiones y características equivalentes al ejemplo propuesto, sería posible implementar hasta 15 estanques adicionales dentro de las zonas afines. Esto permitiría una recarga anual aproximada de 11,079 m³, con una inversión estimada de \$1,505,715 MXN. Destaca que estos resultados evidencian una mayor pertinencia en la implementación de zanjas de infiltración, dado que su capacidad de ser construidas sobre una superficie mayor permite una contribución más significativa al acuífero en comparación con los estanques. A ello se suma que las zanjas presentaron una mayor eficiencia hidráulica y económica en los escenarios

analizados, infiltrando anualmente entre el 72% y el 83% del volumen excavado, mientras que el estanque propuesto infiltró aproximadamente el 33% de su volumen de almacenamiento. De manera similar, las zanjas permitieron infiltrar entre 15 y 17 m³ de agua por cada \$1,000 MXN invertidos, frente a cerca de 7 m³ en el caso del estanque. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones físicas e hidrológicas del AVL, las zanjas poseen un mayor potencial para su implementación extensiva como estrategia de recarga inducida, sin que ello implique descartar la viabilidad y pertinencia de implementar estanques en sitios con características favorables para este tipo de infraestructura.

Se estima que la implementación conjunta de ambas estrategias permitiría infiltrar hasta 132,788 m³ anuales al acuífero, incrementando la recarga promedio de 76,647 m³/km² a 76,746 m³/km², lo que representa un aumento aproximado del 0.13 % respecto a la recarga natural actual. Aunque este volumen es muy inferior a la recarga natural del acuífero, estimada en 102,400,000 m³ anuales, así como con los 159,388,718 m³ concesionados en el AVL (CONAGUA, 2024), la integración de acciones adaptativas continúa considerándose pertinente y fundamental como parte esencial de la gestión integral del acuífero. Además de favorecer la recarga directa, dichas acciones pueden fortalecer la conciencia comunitaria sobre el valor del recurso hídrico (Ojeda-Olivares et al., 2017), incentivando la participación social y la replicación de experiencias. Un ejemplo de ello es la cuenca del río Arvari, en India, donde el creciente involucramiento comunitario en la construcción de represas y estructuras de captación de agua, aunque inicialmente limitado, derivó, tras varios años, en un incremento significativo de los niveles de agua subterránea (Gale, 2005).

Aunado a lo anterior, deben considerarse otros beneficios potenciales de la implementación de este tipo de acciones, tales como la reducción de la erosión del suelo y la posibilidad de establecer especies forestales en el caso de las zanjas; o bien, el mejoramiento del microclima local, el autoconsumo y el uso como abrevaderos en el caso de los estanques (Fernández et al., 2009). Asimismo, las zanjas podrían contribuir indirectamente a disminuir la velocidad del escurrimiento superficial, favorecer la retención temporal de humedad y promover condiciones más favorables para la recuperación de cobertura vegetal en zonas degradadas. En el caso de los estanques, además de su función hidrológica, su presencia podría representar una fuente de abastecimiento temporal para actividades pecuarias y para el mantenimiento de pequeños hábitats locales durante la temporada seca.

Finalmente, es importante destacar que estos resultados corresponden a la implementación de zanjas y estanques en una superficie de 23.94 km², identificada como particularmente adecuada para dichas acciones dentro de los polígonos con alta

aptitud para la recarga hídrica ubicados al norte del AVL. Sin embargo, los resultados presentados en el capítulo 5 de esta tesis señalan la existencia de otros 429 km² con alta aptitud para la recarga, donde podrían evaluarse otras estrategias adaptativas acordes con las características físicas e hidrológicas específicas de cada sitio. Asimismo, se identificaron 679.53 km² con aptitud moderada, los cuales, si bien no presentan las condiciones más favorables para la recarga natural, podrían destinarse a acciones de recuperación y conservación y, eventualmente, a la implementación de técnicas de recarga que contribuyan a mitigar la sobreexplotación del acuífero.

7.6 Conclusión

Con el objetivo de determinar el grado de contribución que tendría la implementación de zanjas y estanques en la disminución de la sobreexplotación del AVL, se desarrollaron tres escenarios de posible aplicación de zanjas y un escenario de estanques de infiltración en sitios con alta afinidad para albergar estas acciones, localizados en los polígonos con mayor aptitud para la recarga hídrica al norte del acuífero. Los resultados permitieron determinar que, aunque el volumen potencial de infiltración asociado a las estrategias analizadas alcanza los 132,788 m³ anuales, este volumen es muy inferior a la recarga natural del acuífero, estimada en 102,400,000 m³ anuales y a los 159,388,718 m³ concesionados en el AVL (CONAGUA, 2024). No obstante, se considera que esta diferencia no resta relevancia a la aplicación de dichas acciones, ya que su contribución debe entenderse dentro de un enfoque integral de gestión hídrica, donde la recarga inducida constituye un complemento estratégico a las políticas de manejo sustentable del acuífero.

Los resultados también permitieron identificar diferencias importantes en la eficiencia hidráulica y económica de las acciones evaluadas. En términos generales, las zanjas de infiltración mostraron un mejor desempeño que los estanques, tanto por el volumen de agua infiltrado respecto al material excavado, como por la relación entre recarga obtenida e inversión requerida. Mientras las zanjas lograron infiltrar entre el 72% y el 83% de su volumen excavado, los estanques presentaron valores cercanos al 33%. Estas diferencias se relacionan principalmente con los criterios de diseño hidráulico considerados, ya que una proporción importante del volumen del estanque no será utilizada de manera regular bajo condiciones promedio de operación, reduciendo la relación entre volumen excavado y volumen efectivamente infiltrado. De manera similar, las zanjas permitieron infiltrar entre 15 y 17 m³ de agua por cada \$1,000 MXN invertidos, mientras que los estanques alcanzaron

aproximadamente 7 m³ bajo la misma inversión. Esto sugiere que las zanjas podrían representar una alternativa económicamente más eficiente y viable para programas extensivos de recarga hídrica en el AVL.

Así mismo, debe entenderse que más allá de la magnitud de los volúmenes infiltrados, la relevancia de las acciones adaptativas radica también en los beneficios adicionales que generan sobre el sistema socioambiental. En el caso de las zanjas, la reducción de la erosión del suelo y la retención de humedad podrían propiciar un aumento en la vegetación forestal, lo que además de favorecer el autoconsumo, podría reducir la escorrentía superficial y aumentar la recarga subsuperficial. Por su parte, los estanques ofrecen la posibilidad de ser utilizados para el autoconsumo, como abrevadero de ganado y para la estabilización de hábitats locales, lo que incrementa su aceptación social y su viabilidad de implementación. Resulta relevante mencionar que estas dimensiones sociales y ambientales refuerzan el papel de las acciones adaptativas no solo como herramientas hidrológicas encaminadas exclusivamente a la recarga subterránea, sino como mecanismos de manejo participativo del territorio.

Finalmente, se subraya la necesidad de transitar hacia una gestión adaptativa y descentralizada del acuífero, que combine el análisis técnico con la planeación participativa. Destacándose que, si bien las acciones evaluadas no representan una solución definitiva al déficit hídrico del AVL, sí constituyen una base sólida para el desarrollo de programas integrales de recarga, donde la priorización espacial y la articulación institucional sean ejes rectores. Por consiguiente, la recarga hídrica mediante acciones adaptativas, junto con la conservación del suelo, la restauración de la vegetación y la educación ambiental, deben entenderse como estrategias complementarias orientadas no solo a aumentar la disponibilidad de agua subterránea, sino también a fortalecer la resiliencia socioambiental e hidrológica de las comunidades que las implementen.

8. MARCO METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE VIABILIDAD DE ACCIONES ADAPTATIVAS DE CAPTACIÓN Y RECARGA HÍDRICA (MEVARH)

8.1 Introducción

Con el objetivo de ofrecer una herramienta metodológica útil, sólida y fácilmente replicable para investigaciones orientadas a evaluar la viabilidad hidrológica y técnica de la implementación de acciones adaptativas de captación y recarga hídrica para la recuperación de fuentes subterráneas, así como para estudios afines que empleen el análisis multicriterio como instrumento de apoyo a la toma de decisiones en materia de gestión hídrica, en este capítulo se presenta el Marco Metodológico para la Evaluación de Viabilidad de Acciones Adaptativas de Captación y Recarga Hídrica (MEVARH). Este marco fue desarrollado para identificar, evaluar y priorizar estrategias orientadas a fortalecer la resiliencia de las fuentes subterráneas, mediante la integración de criterios hidrológicos, técnicos y territoriales. Se describe de manera esquemática y sintetizada el modelo metodológico propuesto, detallando sus etapas, componentes y fundamentos conceptuales.

En la segunda parte del capítulo se analizan y discuten de manera integral los resultados obtenidos a lo largo de las distintas etapas metodológicas aplicadas al AVL, con el propósito de determinar la viabilidad de la ciudad de León para implementar y albergar acciones de captación y recarga hídrica orientadas a mitigar la sobreexplotación de su acuífero. De esta manera, el capítulo busca, por un lado, proporcionar una base metodológica que sirva como referencia para futuras investigaciones y proyectos de gestión sostenible del recurso hídrico en contextos similares, y por otro, examinar, en el caso de su aplicación al AVL, los aspectos

susceptibles de mejora identificados en las diferentes etapas metodológicas, así como las líneas de profundización y desarrollo para investigaciones futuras.

8.2 Objetivos del MEVARH

Se ha identificado que las directrices para la implementación de acciones de recarga hídrica están encaminadas a proporcionar mayor certeza en la evaluación de riesgos, prevenir el fracaso de los proyectos de recarga de acuíferos, así como garantizar la confianza de los inversionistas y del público en futuras innovaciones. De lo anterior que dichas directrices están destinadas a ser utilizadas principalmente por los proponentes de los proyectos, los organismos reguladores y cualquier individuo o grupo interesado en el proyecto y su impacto (NRMMC, EPHC, NHMRC, 2009). En congruencia con estos principios, el modelo metodológico que se propone para el AVL, aunque igualmente válido para otros sitios, está dirigido a:

- Optimizar el proceso de implementación de proyectos de captación y recarga, reduciendo el tiempo, esfuerzo y recursos necesarios por parte de los distintos actores involucrados.
- Identificar y descartar tempranamente aquellos proyectos de captación y recarga que no sean viables o compatibles con las características del área de estudio.
- Facilitar el acceso y la transferencia del conocimiento técnico y científico necesario para el diseño y ejecución de proyectos de captación y recarga.
- Reducir la incertidumbre comúnmente asociada a las acciones adaptativas de captación y recarga hídrica, mediante la conformación de una base de conocimiento sólida, que permita justificar y coordinar de manera efectiva la propuesta, implementación y seguimiento de las acciones.
- Sentar las bases técnicas y de información que respalden la formulación de políticas y marcos normativos que favorezcan la adopción de infraestructura hídrica adaptativa de recarga en los sitios de interés.

8.3 Descripción del MEVARH

El marco metodológico propuesto para identificar la viabilidad de un sitio para albergar acciones adaptativas de captación y recarga hídrica con el objetivo de mitigar la sobreexplotación de sus fuentes de agua subterráneas es de nivel correlacional, no experimental y de tipo mixto; es decir, busca describir cualitativa y cuantitativamente las características fundamentales de los fenómenos tal como se presentan en la realidad, aplicando criterios sistemáticos que permitan mostrar su estructura y comportamiento (SEMAR, 2016), siguiendo el método deductivo-inductivo.

Dicha metodología se compone de seis etapas:

1. Comprender la naturaleza y las características generales de los sistemas adaptativos de gestión hídrica orientados a la captación y recarga, así como su pertinencia frente a los megaproyectos hidráulicos;
2. Analizar la gestión actual e histórica de los recursos hídricos en el área de estudio;
3. Determinar el papel que desempeña la infraestructura adaptativa de captación e infiltración dentro de la política hídrica en la zona donde se contempla implementar el proyecto;
4. Identificar las zonas con potencial de recarga hídrica subterránea en el área de estudio;
5. Seleccionar las acciones adaptativas de captación e infiltración hídrica más viables para dicha área; y
6. Estimar el posible impacto de las acciones de captación y recarga en la mitigación de la sobreexplotación de las fuentes de agua subterránea.

A continuación, se describen en detalle cada una de las etapas, junto con sus componentes y fundamentos conceptuales.

ETAPA 1: Comprender la naturaleza de los sistemas adaptativos de gestión hídrica orientados a la captación y recarga

En esta primera etapa, el objetivo será definir los conceptos de sistema adaptativo, gestión integral de los recursos hídricos e infraestructura adaptativa orientada a la captación y recarga de agua de lluvia. Se buscará identificar los beneficios potenciales que ofrece la implementación de infraestructura adaptativa como alternativa

sostenible para mitigar la sobreexplotación de acuíferos. Para ello, se realizará una investigación documental exhaustiva basada en fuentes secundarias, tales como artículos científicos, libros especializados, informes técnicos o cartillas informativas. Estas fuentes podrán abordar los conceptos de manera general o bien aportar información específica sobre la zona o región de estudio, en caso de estar disponible.

El resultado fundamental de esta primera etapa será el de identificar la pertinencia de considerar la implementación de infraestructura adaptativa en el área de estudio como una estrategia complementaria de gestión hídrica sostenible. Además, proporciona una base conceptual sólida para las etapas posteriores del proyecto, permitiendo establecer los criterios técnicos, sociales y ambientales necesarios para valorar la capacidad de dicha infraestructura en la recuperación de los sistemas hidrológicos locales.

ETAPA 2: Analizar la gestión actual e histórica de los recursos hídricos en el área de estudio

El objetivo de esta etapa es construir un panorama integral de los recursos hídricos en la zona o región de interés. Para ello, se procederá a identificar y describir el modelo de gestión hídrica vigente, detallando las instancias responsables de la administración del recurso en los distintos niveles de gobierno. También se incluirá la identificación de los actores no gubernamentales que participan en la gestión y protección del agua, tales como colectivos locales, asociaciones civiles, instituciones académicas u organizaciones internacionales con presencia en la región. Asimismo, con el propósito de comprender en mayor profundidad las causas estructurales de la problemática hídrica que se busca abordar, así como la lógica detrás del modelo de gestión actualmente imperante, se realizará una revisión histórica de la gestión del agua en la zona de estudio. Esta investigación documental con fuentes primarias y secundarias permitirá reconocer las transformaciones institucionales, políticas y técnicas que han configurado el sistema actual, haciendo especial énfasis, en caso de que se haya producido, en la incorporación del enfoque de gestión integrada del agua, así como de infraestructura adaptativa, a lo largo del tiempo.

La relevancia de esta etapa consistirá, por un lado, en diagnosticar o descartar la existencia de un posible origen institucional de la crisis hídrica; es decir, determinar si una gestión ineficiente ha contribuido a generar o agravar la problemática hídrica en la zona de estudio. Por otro lado, este análisis permitirá reconocer si, a lo largo del tiempo, ha existido un interés o voluntad institucional por incorporar el enfoque de

gestión adaptativa en la administración del agua. En función de ello, será posible valorar desde una fase temprana la pertinencia y viabilidad de continuar con un proyecto fundamentado en dicho modelo, asegurando que las estrategias propuestas respondan no solo a las necesidades técnicas y ambientales, sino también al contexto histórico e institucional de la región.

ETAPA 3: Determinar el papel que desempeña la infraestructura adaptativa de captación e infiltración dentro de la política hídrica en la zona de estudio

Una vez analizado el contexto histórico e institucional de la gestión hídrica en la zona de estudio, así como evaluada la pertinencia y viabilidad de continuar con un proyecto basado en un modelo de gestión hídrica adaptativa, esta etapa se centrará en identificar de manera concreta las acciones adaptativas de captación y recarga que hayan sido propuestas o implementadas, tanto por iniciativa gubernamental como no gubernamental, dentro de la zona de estudio, y que hayan pasado a formar parte del modelo actual de gestión hídrica. Para ello, se llevará a cabo una exhaustiva búsqueda documental en fuentes primarias y secundarias, como planes y programas de gobierno, boletines informativos y publicaciones periodísticas, con el propósito de reconocer dichas acciones y su grado de incorporación en la infraestructura hídrica existente. Asimismo, a través de los mismos medios o mediante el acercamiento con las instancias responsables de su implementación y seguimiento, se buscará conocer su nivel de avance, así como los posibles beneficios o efectos derivados de su incorporación en la gestión del recurso hídrico a nivel local o regional.

El resultado principal esperado de esta etapa metodológica será determinar si se ha implementado infraestructura descentralizada y de pequeña escala para la gestión de las aguas subterráneas, y si dicha implementación ha estado acompañada por procesos de adopción social y seguimiento institucional. También se buscará identificar si, por el contrario, estas acciones solo se han planteado en planes y programas sin que se lleve a cabo su implementación efectiva. El propósito es comprender el papel real que dichas iniciativas ocupan dentro del modelo de gestión actual y evaluar si existe un respaldo institucional que permita avanzar en la incorporación de medidas basadas en la gestión comunitaria y la gestión integral del agua.

ETAPA 4: Identificar las zonas con potencial de recarga hídrica subterránea en el área de estudio

Una vez identificado el posible respaldo institucional para la continuidad del proyecto, el siguiente paso será evaluar la viabilidad del área de estudio para albergar acciones de captación y recarga subterránea. Para ello, se propone realizar un Análisis Multicriterio, considerando los factores biofísicos más relevantes en los procesos de infiltración y percolación hacia el acuífero de la zona de estudio (v.g. pendiente del terreno, tipo de suelo, litología, uso de suelo, entre otros). La información necesaria para dicho análisis podrá obtenerse a partir de fuentes secundarias, como mapas temáticos, bases de datos, investigaciones previas o fuentes oficiales, así como de fuentes primarias, mediante observación y trabajo de campo.

El resultado central de esta etapa será la zonificación del área de estudio, con el propósito de identificar los sitios cuyas características físicas favorecen la recarga subterránea, y, en consecuencia, aquellos donde podría implementarse infraestructura adaptativa orientada a dicho fin. Los resultados permitirán reducir la incertidumbre asociada a la implementación de esta infraestructura y fortalecer el respaldo institucional necesario para dar continuidad al proyecto. Asimismo, servirán como base técnica para la priorización de acciones y la toma de decisiones estratégicas en materia de gestión del agua subterránea. De esta manera, se busca no solo validar la viabilidad del área de estudio en relación con el objeto de la investigación, sino también establecer un marco de referencia que pueda replicarse en futuros proyectos de recarga en contextos similares.

ETAPA 5: Seleccionar las acciones de captación e infiltración más viables para el área de estudio

Una vez identificadas las zonas con alto potencial de recarga hídrica al acuífero, será necesario determinar, dentro del amplio espectro de obras de recarga existentes, cuáles resultan más viables y adecuadas para la zona de estudio. Para ello, se propone realizar una exhaustiva investigación documental de la literatura especializada en técnicas MAR, centrada en identificar las características distintivas de cada técnica, así como las condiciones hidrológicas y de terreno más favorables para su implementación.

Con base en esta revisión, se efectuará una evaluación comparativa de las principales acciones MAR mediante un sistema de calificación multicriterio (escala de 1 a 5), con el propósito de cuantificar su grado de viabilidad y afinidad con las condiciones del área de estudio. La evaluación considerará criterios biofísicos, como el clima, el suelo, el uso y cobertura del suelo, la geología y la topografía, así como criterios técnicos, económicos y sociales, entre ellos la complejidad de diseño e implementación, la relación costo-beneficio, la confiabilidad de la técnica, la calidad del agua recuperada y los posibles conflictos asociados a su aplicación. Esta valoración permitirá seleccionar únicamente aquellas alternativas con mayor potencial de implementación, considerando tanto las características físicas e hidrológicas del área como los objetivos del proyecto bajo un enfoque de gestión integrada y adaptativa del agua.

Una vez definidas las alternativas más viables, se propone realizar un Análisis Multicriterio que integre los rangos óptimos de las variables físicas más relevantes para la recarga hídrica asociada a cada acción (v.g. pendiente suave, suelo franco-arenoso, cobertura de pastizal), con el propósito de identificar los sitios específicos dentro del área de estudio que presenten estas características y, con ello, un alto potencial para la implementación de las acciones seleccionadas. Por lo tanto, los resultados clave de esta etapa serán la selección final de las obras de captación y recarga más compatibles con las condiciones físicas e hidrológicas del área, así como con las necesidades particulares que atiende el proyecto, además de la definición de los sitios específicos de implementación, fortaleciendo con ello la certeza técnica y la confianza en su efectividad.

ETAPA 6: Estimación del posible impacto de las acciones de captación y recarga en la mitigación de la sobreexplotación de las fuentes de agua subterránea.

Corresponde a la última etapa metodológica, cuyo objetivo es determinar el posible impacto de la implementación de acciones de recarga para mitigar la sobreexplotación del acuífero. Para ello, será necesario, en primer lugar, estimar las dimensiones de las obras propuestas y su distribución espacial dentro de la zona de estudio. En caso de contar con información suficiente, así como con el tiempo y los recursos económicos y técnicos necesarios, será recomendable desarrollar simulaciones hidrológicas que permitan evaluar si el agua captada e infiltrada logra alcanzar el acuífero, así como estimar la recarga potencial asociada a dichas acciones. No obstante, una alternativa más sencilla y práctica, que además requiere menor

tiempo de ejecución sin comprometer el rigor científico, consiste en el uso de métodos indirectos, como el balance hídrico o el balance hídrico de suelos (Neumann et al., 2004; Glendenning y Vervoort, 2010; Glendenning y Vervoort, 2011).

Para el caso de estos últimos, será fundamental realizar una investigación documental que permita recopilar información climática de la zona de estudio, así como identificar trabajos afines desarrollados en la misma región o en áreas con características físicas e hidrológicas similares. Esto facilitará la identificación de parámetros previamente validados, tales como tasas de infiltración, coeficientes de recarga, pérdidas por evapotranspiración y estimaciones de escurrimiento superficial, los cuales podrán ajustarse a las condiciones locales con el fin de obtener una estimación razonable de la recarga potencial y, en consecuencia, resultados confiables.

Una vez definidas las dimensiones de las acciones y su distribución espacial, en esta etapa también se abordará el análisis de los costos de implementación y su posible impacto a nivel de cuenca y sobre el ciclo hidrológico. Finalmente, una vez demostrada la viabilidad técnica de las acciones, así como su utilidad para contribuir a la recarga del acuífero, se procederá a establecer vínculos con los propietarios de las tierras susceptibles de intervención, así como con organismos operadores o comités técnicos locales, con el propósito de explorar posibles mecanismos de financiación e implementación y asegurar el respaldo institucional necesario para llevar a cabo dichas acciones.

En la tabla 26 se integran los pasos propuestos para evaluar la viabilidad de la implementación de acciones adaptativas de captación e infiltración.

Tabla 26. Modelo metodológico para estimar la viabilidad de implementación de acciones adaptativas de recarga como medidas de mitigación de la presión sobre acuíferos sobreexplotados.
Elaboración propia.

ETAPA 1: Comprender la naturaleza de los sistemas adaptativos de gestión hídrica orientados a la captación y recarga.
Objetivos
• Construcción de base conceptual para las etapas posteriores del proyecto. • Establecimiento de los criterios técnicos, sociales y ambientales necesarios para valorar la capacidad de la infraestructura adaptativa en la recuperación de los sistemas hidrológicos locales.
Preguntas de investigación

• ¿Qué factores condicionan la viabilidad de dicha infraestructura a escala territorial (física, ambiental, social y de gestión)? • ¿De qué manera la infraestructura adaptativa puede contribuir a la mitigación de la sobreexplotación de los acuíferos dentro de un esquema de gestión integral de los recursos hídricos? • ¿Qué ventajas y limitaciones presenta la infraestructura adaptativa frente a las estrategias hidráulicas convencionales, particularmente los megaproyectos?
ETAPA 2: Análisis de la gestión actual e histórica de los recursos hídricos en el área de estudio.
Objetivos
• Identificación y descripción del modelo de gestión hídrica vigente. • Identificación de actores gubernamentales y no gubernamentales (colectivos locales, asociaciones civiles, instituciones académicas u organizaciones internacionales con presencia en la región) que participan en la gestión del agua. • Comprender la evolución histórica de la gestión del agua en el área de estudio.
Preguntas de investigación
• ¿La sobreexplotación del acuífero y la crisis hídrica pueden explicarse únicamente por una escasez física del agua o responden a un origen institucional coherente con la gestión histórica del recurso en el área de estudio? • ¿Resulta pertinente continuar con un proyecto basado en acciones adaptativas, considerando que la gestión actual e histórica ha priorizado la infraestructura hidráulica tradicional?
ETAPA 3: Determinación del papel que desempeña la infraestructura adaptativa de captación e infiltración dentro de la política hídrica en la zona de estudio.
Objetivos
• Identificar las acciones adaptativas de captación y recarga que hayan sido propuestas y/o implementadas en el área de estudio, tanto por iniciativas gubernamentales como no gubernamentales. • Conocer el estado actual de las acciones que han sido propuestas, determinando su condición de implementación, así como su seguimiento, funcionamiento y los beneficios generados en las comunidades donde se han aplicado.
Preguntas de investigación
• ¿Se han propuesto e implementado de manera gubernamental y no gubernamental acciones adaptativas de captación y recarga para mitigar la sobreexplotación del acuífero? • ¿Se cuenta con un inventario de los sitios intervenidos que facilite su control, seguimiento y monitoreo, y permita conocer el estado y funcionamiento de las acciones implementadas? • ¿Existiría respaldo institucional para la implementación y el seguimiento de un proyecto orientado a acciones adaptativas de captación y recarga?
ETAPA 4: Identificación de zonas con potencial de recarga subterránea dentro del área de estudio.
Objetivos

• Identificar los factores superficiales y subsuperficiales del área de estudio que desempeñan un papel relevante en la infiltración de agua hacia el acuífero. • Identificar, mediante un análisis multicriterio, las zonas con alto potencial de recarga del acuífero. • Evaluar la disposición, aceptación e involucramiento potencial de las comunidades humanas presentes en las zonas identificadas, con la finalidad de reconocer la viabilidad social de implementar posibles acciones de conservación, restauración o recarga inducida.
Preguntas de investigación
• ¿En qué sitios se presentan las condiciones físicas más favorables para que exista recarga natural o inducida al acuífero? • ¿Existen sitios con aptitud baja o moderada para la recarga en los que podrían implementarse acciones como reforestación u obras de recuperación de suelo que mejoren las condiciones biofísicas actuales y, con ello, la capacidad de recarga natural? • ¿Cuál es el nivel de aceptación y participación potencial de las comunidades locales respecto a la implementación de acciones orientadas a la conservación y mejora de las zonas de recarga?
ETAPA 5: Selección de las acciones adaptativas de captación y recarga más viables para ser implementadas en el área de estudio.
Objetivos
• Identificar las características distintivas de las principales técnicas de recarga, así como las condiciones hidrológicas y superficiales más favorables para su implementación. • Comparar las características físicas del área de estudio con los parámetros y criterios sugeridos en la literatura para la implementación de las distintas acciones, evaluando la compatibilidad de las condiciones del sitio con los requerimientos técnicos establecidos para cada tipo de obra. • Determinar las acciones adaptativas de recarga más adecuadas para el área de estudio y establecer su ubicación óptima en función de las características físicas del terreno.
Preguntas de investigación
• ¿Qué acciones adaptativas de recarga son más afines al área de estudio, considerando factores hidrológicos, superficiales, económicos, sociales, entre otros? • ¿Cuáles son los sitios más adecuados para implementar las acciones de recarga identificadas como más afines al área de estudio?
ETAPA 6. Estimación del posible impacto de la implementación de las acciones de captación y recarga en la mitigación de la sobreexplotación del acuífero en el área de estudio.
Objetivos
• Estimar las dimensiones de las obras y su distribución sobre el terreno. • Estimar el costo de implementación de las acciones. • Estimar la recarga potencial de las acciones al acuífero. • Una vez demostrada la viabilidad de las acciones, establecer vinculación con las autoridades encargadas de la gestión del agua, para dar continuidad a la exploración de mecanismos de financiamiento e implementación, así como al diálogo con los habitantes de los sitios susceptibles a intervención
Preguntas de investigación

- ¿Qué volumen de agua podría captarse e infiltrarse mediante las acciones propuestas?
- ¿El agua infiltrada logra alcanzar el acuífero?
- ¿Las acciones propuestas contribuyen a disminuir la presión sobre el acuífero?
- ¿Las acciones adaptativas de captación y recarga representan una solución definitiva a la presión hídrica sobre el acuífero o podrían implementarse como medidas complementarias a la infraestructura convencional, orientadas a mitigar dicha presión y generar beneficios ambientales y sociales adicionales?

8.4 Resultados de la aplicación del MEVARH al AVL

Las seis etapas propuestas han sido aplicadas al AVL con el objetivo de identificar la viabilidad de implementar acciones adaptativas de captación y recarga de agua de lluvia como medidas para incrementar la capacidad de recarga actual y, con ello, contribuir a mitigar la sobreexplotación que enfrenta el acuífero. Dicho escenario resulta particularmente preocupante ante los efectos previstos del cambio climático y el incremento en la demanda de agua, factores que podrían agravar dicha problemática.

Dado que cada etapa se desarrolla a profundidad en los distintos capítulos que integran esta tesis, en el presente subcapítulo se presentan exclusivamente, y de manera sintética, los hallazgos más relevantes de cada etapa, es decir, las respuestas a las preguntas de investigación planteadas en la metodología. Asimismo, se pone especial énfasis en los aspectos susceptibles de mejora identificados en las distintas fases metodológicas, así como en las líneas de profundización y desarrollo para futuras investigaciones.

Los sistemas adaptativos como alternativa para el AVL (Capítulo 2)

La ciudad de León, uno de los centros urbanos de mayor relevancia económica y política del país, satisface aproximadamente el 99 % de su demanda de agua potable mediante la extracción de agua subterránea, principalmente del AVL. Esta fuerte dependencia ha contribuido a su condición de sobreexplotación, registrando, de acuerdo con las actualizaciones publicadas por CONAGUA en 2024, un déficit anual

estimado en 61,638,096 m³. Dicho escenario refleja una presión estructural sostenida que compromete la seguridad hídrica regional.

Frente a este panorama, y considerando los efectos adversos asociados a las grandes obras hidráulicas convencionales, como la profundización de la sobreexplotación mediante pozos de extracción cada vez más profundos, el desplazamiento de población derivado de la construcción de grandes presas o el impacto ambiental, los sistemas adaptativos de gestión del agua emergen como alternativas más sostenibles y resilientes ante cambios sociales, institucionales e hidroclimáticos (Figueroa, 2020). Hay que destacar que su adopción implica un cambio de paradigma que requiere transformaciones estructurales tanto en la infraestructura hidráulica como en los marcos regulatorios e institucionales (Huntjens et al., 2008; Figueroa, 2020; Arana, 2021).

En este contexto, la infraestructura adaptativa de recarga, con experiencias exitosas documentadas a nivel nacional e internacional (véase Gale, 2005; Cordoval y De Alquino, 2009; o Silva-Hidalgo, 2017), se caracteriza por esquemas de cogestión social y por la implementación de soluciones descentralizadas, de pequeñas dimensiones y frecuentemente basadas en la naturaleza. Estas incluyen, entre otras, la restauración de humedales, la cosecha de lluvia, zanjas y terrazas de infiltración, estanques (jagüeyes), presas filtrantes y pozos de recarga someros (Mendoza, 2017; Zhang et al., 2020). Si bien este tipo de acciones presenta menores impactos adversos en comparación con la infraestructura hidráulica tradicional, su viabilidad territorial en el AVL está condicionada por diversos factores. Entre los principales se encuentran la heterogeneidad hidrogeológica del acuífero; el riesgo de infiltración de agua con posibles cargas contaminantes provenientes de zonas urbanas o industriales; la variabilidad espacial y temporal de la precipitación; la necesidad de aceptación social y la disposición de actores locales para destinar superficie a infraestructura de recarga; la percepción de beneficios en el mediano y largo plazo frente a costos inmediatos; así como la disponibilidad de financiamiento, capacidades técnicas y mecanismos de monitoreo y evaluación.

A partir del análisis de los casos de estudio y de las condiciones particulares del AVL, se considera pertinente la exploración de la viabilidad de implementar acciones adaptativas de recarga como estrategia complementaria para mitigar su sobreexplotación. Pues además del potencial incremento en la recarga y la eventual recuperación del nivel freático, estas acciones podrían generar beneficios adicionales, tales como la atenuación de picos de tormenta, la mejora en la humedad del suelo y la recuperación de la vegetación, el fortalecimiento de la resiliencia de ecosistemas locales, la reducción de la erosión hídrica y la contribución a la adaptación frente al

cambio climático mediante soluciones basadas en la naturaleza (Pizarro et al., 2004; Gale, 2005; Mendoza, 2017; Dillon et al., 2022).

La gestión de los recursos hídricos en el AVL (Capítulo 3)

El principal organismo responsable de la gestión de los recursos hídricos en el país es la CONAGUA, órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo desconcentrado de la SEMARNAT. A esta institución le corresponde la explotación, uso, aprovechamiento, distribución y control de las aguas nacionales, funciones que ejerce en coordinación con diversas instancias de los ámbitos federal, estatal y municipal, así como con asociaciones de usuarios, empresas, instituciones de los sectores privado y social y organizaciones internacionales.

En el ámbito estatal, la gestión del agua involucra al Titular del Poder Ejecutivo y a distintas dependencias, entre las que se encuentran la Secretaría del Agua y Medio Ambiente (SAMA); el IPLANEG; la CEAG; y la PAOT. Cada una de estas instancias participa, desde el ámbito de sus atribuciones, en la planeación, regulación, supervisión y conducción de la política hídrica estatal. A nivel municipal, la gestión del agua recae en los organismos operadores. En el caso de León, esta función corresponde al Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL), encargado de administrar y mantener la infraestructura hidráulica, así como de prestar los servicios de agua potable, saneamiento y aprovechamiento de agua tratada a la población del municipio. De igual forma, la Dirección General de Medio Ambiente se identifica como un actor relevante en la gestión hídrica municipal, ya que tiene a su cargo la instrumentación del proyecto “Agua para todos”.

Además de estas instituciones, y con el propósito de establecer mecanismos de coordinación y colaboración entre sociedad y gobierno en materia de gestión hídrica, se crearon los denominados COTAS. No obstante, al momento de concluir esta tesis, había desaparecido el COTAS de León, que representaba a los usuarios del agua en la región correspondiente al AVL. En relación con el estudio de la evolución de la gestión del agua en León durante los siglos XX y XXI, así como de la estructura responsable de su manejo en los niveles federal, estatal y municipal, se ha identificado la influencia de intereses empresariales y económicos que históricamente han moldeado la gestión del recurso en la ciudad y que continúan teniendo gran relevancia en la actualidad. Estos intereses han promovido la implementación de megaproyectos hidráulicos para atender una prolongada crisis hídrica que, como señala Tagle (2023),

no parece ser enteramente de carácter físico, sino una escasez socialmente construida, asociada principalmente con su modelo de gestión.

Se advierte que, aunque desde la década de 1990 la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato ha manifestado un supuesto interés en incorporar el enfoque de la GIRH en el estado y en la ciudad de León, distintos autores (Caldera, 2014; Caldera, Tagle y Davison, 2020) han evidenciado los limitados resultados obtenidos a partir de la adopción de este enfoque participativo. Ello puede atribuirse principalmente a obstáculos políticos y a una serie de arreglos institucionales que han configurado una gobernanza no democrática, alejada de la sustentabilidad del AVL. Si bien se ha promovido la descentralización del Estado en materia de gestión hídrica, Caldera (2014) advierte que en Guanajuato y en la ciudad de León dicha descentralización no ha favorecido a la sociedad, sino fundamentalmente a actores privado-mercantiles.

El análisis histórico del manejo del agua en la ciudad de León y en el estado de Guanajuato, junto con la revisión de su estructura administrativa, revela la persistencia de un modelo de gestión centrado en la oferta y en la construcción de grandes obras de infraestructura hidráulica como respuesta predominante ante la crisis hídrica. Este paradigma ha sido el eje de la política pública en materia de agua durante las últimas décadas, teniendo en el complejo hidráulico El Zapotillo su ejemplo más representativo. A pesar de los aparentes esfuerzos institucionales por incorporar el enfoque de la GIRH desde inicios de los años 2000, respaldados por reformas a la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato y la creación de organismos como el ya desaparecido COTAS de León, los avances han sido limitados y de alcance reducido. Esto evidencia que los principales obstáculos para la adopción de un enfoque adaptativo en la gestión de los recursos hídricos del AVL y de la ciudad de León no son de carácter exclusivamente técnico, sino político e institucional, lo que ha perpetuado un modelo de gobernanza que prioriza intereses económicos sobre la sustentabilidad del acuífero y la participación social efectiva.

Por lo tanto, si bien estos hallazgos no descartan la posibilidad de continuar con el diseño de un proyecto que contemple la implementación de acciones adaptativas para la recarga del AVL, será necesario redoblar esfuerzos para entablar vinculación con las autoridades del agua y demostrar la viabilidad, pertinencia y los potenciales beneficios de adoptar dichas acciones como medida complementaria para disminuir el estrés hídrico del acuífero y la vulnerabilidad de la ciudad de León.

El papel de la infraestructura adaptativa de captación e infiltración dentro de la política hídrica del AVL (Capítulo 4)

Con el propósito de determinar el papel que ocupa la gestión hídrica adaptativa frente a la sobreexplotación del AVL, se han revisado los principales instrumentos de planeación en materia de desarrollo, ordenamiento territorial y cambio climático, tanto del estado de Guanajuato como del municipio de León. El análisis incluyó el Plan Estatal de Desarrollo Guanajuato (Visión 2025, 2030, 2035 y 2040); el PEDUOET 2040; el PECCG; el Programa de Gobierno del Estado de Guanajuato 2018–2024; el PMCC; el PMD 2045; y el Programa de Gobierno Municipal de León 2021–2024, así como proyectos impulsados desde la sociedad civil.

La revisión evidencia que, desde inicios del siglo XXI, se ha configurado en la ciudad de León un respaldo institucional hacia enfoques de gestión sustentable del agua con carácter adaptativo, centrados en la captación de lluvia y la recarga. Estas acciones se integran en la política hídrica como mecanismos para disminuir la presión sobre los acuíferos del estado y del municipio, lo que sugiere una adopción progresiva de este paradigma tanto por instancias gubernamentales como por actores no gubernamentales. Entre los indicios más claros se encuentra la implementación, durante la última década, de sistemas de captación de agua de lluvia, principalmente en zonas rurales; y la ampliación de superficies intervenidas mediante obras de restauración de suelos, reforestación e infiltración (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2018, 2020; Ayuntamiento de León, 2022). Estas intervenciones incluyen la construcción de bordos, zanjas y tinas ciegas en comunidades como Barbosa, Huizache, Mesa de Ibarra y Rincón Grande, además de apoyos vinculados a actividades agropecuarias.

No obstante, el análisis también revela limitaciones importantes. Persiste una disponibilidad insuficiente de información pública respecto al estado de las obras, su localización precisa y las instancias responsables de su ejecución, evaluación y seguimiento. Incluso mediante solicitudes directas a las dependencias correspondientes, la información suele remitirse de un área a otra sin que exista claridad sobre la instancia responsable, lo que dificulta el seguimiento y la evaluación de los proyectos. Esta situación complica la elaboración de inventarios confiables y debilita el alcance efectivo de instrumentos de planeación que, en el discurso, se presentan como integrales. Asimismo, resulta complejo vincular las acciones reportadas en informes y boletines con las estrategias establecidas en los planes y programas, ya que con frecuencia no se especifica a qué línea estratégica responden ni se detalla su nivel de avance, continuidad o impacto. Los reportes tienden a

cuantificar intervenciones, pero ofrecen escasa información sobre resultados o evaluación de desempeño.

En conjunto, el panorama actual de la gestión hídrica adaptativa en Guanajuato y León puede considerarse favorable en el corto y mediano plazo, en tanto existe un marco institucional que podría respaldar nuevos proyectos en esta línea. Sin embargo, para consolidar este enfoque como un verdadero cambio de paradigma, es indispensable fortalecer los mecanismos de inventario, monitoreo y evaluación de las acciones de recarga, así como garantizar mayor transparencia y accesibilidad de la información. Ello permitiría no solo mejorar las zonas ya intervenidas, sino también replicar experiencias exitosas en otras áreas vulnerables del municipio y del estado, bajo esquemas participativos y transdisciplinarios.

Identificación de zonas con potencial de recarga al AVL (Capítulo 5)

El proceso propuesto para identificar las zonas de recarga al AVL se compone de cinco etapas fundamentales: 1) identificación de los criterios biofísicos que determinan la recarga; 2) desarrollo de capas temáticas correspondientes a los criterios seleccionados; 3) reclasificación de dichas capas conforme a su aptitud para favorecer la recarga; 4) ponderación de los criterios para establecer su importancia relativa en el proceso; y 5) superposición ponderada de las capas reclasificadas para delimitar las zonas con potencial de recarga.

Para el AVL, los criterios identificados como de mayor relevancia en el proceso de recarga fueron: pendiente del terreno, tipo de suelo, litología, geomorfología, densidad de drenaje, uso de suelo y cobertura vegetal, precipitación y densidad de lineamientos. Estos criterios fueron jerarquizados mediante la aplicación de la técnica AHP, con la participación de seis expertos en gestión hídrica e hidrología familiarizados con el acuífero. Los resultados indicaron que el parámetro de mayor relevancia es el uso de suelo y cobertura vegetal (20.3%), seguido por la litología (15.0%), la pendiente del terreno (13.6%), la densidad de drenaje (11.7%), la precipitación (11.6%), el tipo de suelo (11.0%), la densidad de lineamientos (10.2%) y, finalmente, la geomorfología (6.6%).

A partir de la superposición ponderada de las capas temáticas se generó el mapa de aptitud para la recarga hídrica al AVL. Este muestra la existencia de 453.01 km² con alto potencial, localizados principalmente en la zona noroeste del acuífero y en su porción meridional. Asimismo, se identificaron 679.53 km² con potencial moderado

de recarga, principalmente en la Sierra de Guanajuato, así como en el flanco occidental y el extremo sur del acuífero. Si bien estas áreas presentan condiciones biofísicas menos favorables en comparación con las zonas de alto potencial, no deben descartarse para fines de recarga, ya que su aptitud podría mejorar mediante acciones de conservación y recuperación de suelos y cobertura vegetal.

Las acciones adaptativas de recarga más viables para ser implementadas en el AVL (Capítulo 6)

Mediante el análisis de las principales técnicas de recarga gestionada de acuíferos (MAR) se identificó que, dadas las características hidrológicas y superficiales del área de estudio, así como los criterios establecidos en la literatura para su implementación, además de aspectos específicos de cada técnica como el costo, la complejidad de construcción/mantenimiento o el potencial de generar conflictos sociales, las acciones más viables para mitigar la sobreexplotación del AVL son las terrazas, zanjas y tinajas de infiltración. En segundo término, se consideran las cuencas y estanques de infiltración, seguidos por represas de control o gaviones de pequeñas dimensiones, esquemas de liberación controlada y pozos de recarga someros.

Al evaluar los factores biofísicos requeridos para la implementación de estas acciones se determinó que la zona norte del acuífero, particularmente en la región de Los Altos de Jalisco, presenta las condiciones más favorables para su establecimiento. En esta área se identificaron 4.62 km² con alta aptitud para la construcción de estanques de infiltración y 19.32 km² aptos para la implementación de terrazas, zanjas, tinajas y obras afines.

En conjunto, estos resultados indican la existencia de 23.94 km² del AVL con condiciones altamente favorables para la aplicación de medidas adaptativas orientadas a mitigar la sobreexplotación del acuífero, con un alto grado de certidumbre respecto a su viabilidad para favorecer los procesos de infiltración y percolación. Con base en estos hallazgos, se considera viable avanzar a la última etapa del modelo metodológico, correspondiente a la estimación del posible impacto que tendría la implementación de estas acciones sobre el acuífero.

Estimación del posible impacto de la implementación de las acciones de recarga en la mitigación de la sobreexplotación del AVL (Capítulo 7)

Se estimó que la implementación de zanjas, tinajas, terrazas y estanques en los sitios aptos del acuífero podría aportar un volumen potencial de infiltración de 132,788 m³ anuales. Este volumen incrementaría la recarga promedio de 76,647 m³/km² a 76,746 m³/km², lo que representa un aumento aproximado del 0.13 % con respecto a la recarga natural actual. Si bien este incremento es reducido, ello no disminuye la relevancia de las medidas propuestas. Su contribución debe interpretarse desde una perspectiva integral de la gestión hídrica, en la que la recarga inducida constituye uno de los componentes de una estrategia orientada al aprovechamiento sustentable del acuífero.

Además del volumen que podría infiltrarse al acuífero, la importancia de estas acciones también se relaciona con los beneficios adicionales que pueden generar en el sistema socioambiental naturaleza (Pizarro et al., 2004; Gale, 2005; Mendoza, 2017; Dillon et al., 2022). En el caso de las zanjas de infiltración, la reducción de la erosión y la conservación de la humedad en el suelo pueden favorecer el desarrollo de la cobertura vegetal. Este proceso, además de contribuir potencialmente al autoconsumo, puede reducir la escorrentía superficial y, bajo ciertas condiciones, favorecer procesos adicionales de infiltración en el subsuelo. Por su parte, los estanques pueden cumplir funciones complementarias, como servir de abrevadero para el ganado y propiciar condiciones que favorezcan la estabilización de hábitats locales, lo cual podría fortalecer su aceptación social. En este sentido, las dimensiones sociales y ambientales amplían el alcance de estas intervenciones, que no solo buscan promover la recarga subterránea, sino también fortalecer formas participativas de manejo del territorio.

La aplicación de la metodología propuesta en el AVL permite reconocer la pertinencia y viabilidad de avanzar hacia un modelo de gestión del acuífero con un enfoque adaptativo y descentralizado, en el cual el análisis técnico se articule con una revisión crítica de los procesos históricos y actuales que han orientado la gestión del agua en el acuífero y en la ciudad de León. A partir de esta etapa se observa que, aunque las acciones evaluadas no constituyen por sí mismas una solución definitiva al déficit hídrico del AVL, sí representan una base sólida para el desarrollo de programas integrales de recarga sustentados en criterios de priorización espacial y en mecanismos de coordinación institucional. En consecuencia, la recarga hídrica mediante medidas adaptativas, junto con la conservación del suelo, la restauración de la vegetación y la educación ambiental debe entenderse como un conjunto de

estrategias complementarias orientadas no únicamente a incrementar la disponibilidad de agua subterránea, sino también a fortalecer la resiliencia hidrológica y socioambiental de las comunidades que participen en su implementación.

8.5 Conclusión

Se ha propuesto un marco metodológico como herramienta de apoyo para la toma de decisiones orientado a evaluar la viabilidad de implementar acciones adaptativas de captación y recarga como medida para mitigar la sobreexplotación de acuíferos. Si bien este constituye el objetivo principal de la metodología, las etapas que la integran pueden adaptarse y replicarse como instrumento para la selección objetiva de sitios, así como para la implementación de acciones adaptativas con otros fines hídricos o ambientales en contextos donde la evaluación multicriterio permita orientar la toma de decisiones.

El modelo propuesto se basa en un enfoque deductivo e inductivo, de nivel correlacional, no experimental y de tipo mixto. Se estructura en seis etapas interrelacionadas que integran elementos técnicos, sociales y políticos. Entre los elementos técnicos destacan la zonificación de las áreas de recarga del acuífero y la estimación de la posible contribución de las acciones propuestas a la recarga. Por su parte, los elementos sociales y políticos comprenden el análisis de los mecanismos de gestión que actualmente rigen, y que históricamente han regido, los recursos hídricos subterráneos y superficiales en la zona de estudio, así como la revisión y análisis de las acciones adaptativas que han sido propuestas o implementadas por instancias gubernamentales y no gubernamentales.

La aplicación de la metodología al AVL permitió identificar la pertinencia y viabilidad de avanzar hacia un modelo de gestión con enfoque adaptativo. Los resultados muestran que, aunque estas acciones no constituyen por sí mismas una solución definitiva al déficit hídrico del acuífero, sí representan una base sólida para el desarrollo de programas sustentados en la priorización espacial y en la coordinación entre distintos actores. Por lo tanto, la recarga hídrica mediante medidas adaptativas debe entenderse como un conjunto de estrategias complementarias orientadas no solo a incrementar la disponibilidad de agua subterránea, sino también a fortalecer la resiliencia hidrológica y socioambiental de las comunidades que las adopten.

DISCUSIÓN

La ciudad de León enfrenta un intenso estrés hídrico desde principios del siglo XX, situación agravada por la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, el incremento de la demanda de agua y un modelo de gestión centrado en la oferta. La dependencia casi exclusiva del agua subterránea ha favorecido la expansión de los pozos de extracción y la consecuente sobreexplotación del acuífero AVL. Como respuesta, se han impulsado megaproyectos hidráulicos, particularmente presas, para diversificar las fuentes de abastecimiento (Tagle, Caldera, y Rodríguez, 2023). Sin embargo, casos como las presas El Zapotillo y Solís evidencian que estas alternativas también generan impactos ambientales, sociales y de sostenibilidad, especialmente en un contexto de cambio climático, lo que refuerza la necesidad de explorar estrategias sustentables y adaptativas orientadas a recuperar y conservar la principal fuente de abastecimiento de agua de la ciudad.

La experiencia nacional e internacional demuestra que las acciones adaptativas, descentralizadas y, en muchos casos, basadas en la naturaleza pueden contribuir a la gestión sostenible del agua (Gale, 2005; Cordoval y De Alquino, 2009; Silva-Hidalgo, 2017). No obstante, en el Área Metropolitana de León estas iniciativas continúan siendo de pequeña escala, altamente focalizadas y con un carácter casi experimental. Esta situación parece asociarse a la limitada evidencia técnica que respalde su viabilidad hidrológica, social y técnica, al arraigo institucional y los intereses vinculados a la infraestructura hidráulica convencional, así como a la percepción de que los volúmenes potenciales de recarga son insuficientes frente a los volúmenes concesionados.

Ante este escenario, la presente investigación propuso un marco metodológico para evaluar la viabilidad de acciones de recarga desde una perspectiva integral, incorporando no solo criterios técnicos, sino también dimensiones sociales e histórico-políticas. Este enfoque parte de que el éxito de un proyecto de recarga depende tanto de la aptitud biofísica del territorio como de las condiciones institucionales y de gobernanza que determinan su implementación. Para ello se analizó la evolución de la gestión del agua en León y el AVL, así como las acciones de recarga promovidas por instituciones públicas y organizaciones civiles.

Los resultados muestran que la gestión del agua en León ha estado dominada por un enfoque centralizado y orientado a la oferta, apostando por las grandes presas como

única solución a la presión sobre sus aguas subterráneas. Aunque desde principios de los años 2000 se han impulsado instrumentos relacionados con la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, mediante reformas institucionales y la creación de organismos como el COTAS León, sus avances han sido limitados. En concordancia con Tagle (2023), los resultados indican que las principales barreras para incorporar un enfoque adaptativo no son únicamente técnicas, sino también políticas e institucionales. Asimismo, la persistencia de un modelo de gobernanza que históricamente ha privilegiado intereses económicos constituye un obstáculo para la adopción de estrategias descentralizadas de recarga (Caldera, Tagle, y Davison, 2020), pese a los beneficios ambientales y sociales que estas pueden generar en las zonas periurbanas (Pizarro et al., 2004; Gale, 2005; Mendoza, 2017; Dillon et al., 2022). En este sentido, la incorporación de acciones adaptativas representa una oportunidad para avanzar hacia una gestión hídrica que priorice la sustentabilidad del acuífero, la participación social y el reconocimiento del agua como un derecho humano.

Un hallazgo consistente con el modelo histórico de gestión del agua en León se obtuvo del análisis de los planes y programas estatales y municipales relacionados con acciones adaptativas para enfrentar la crisis hídrica. En términos generales, estos instrumentos reflejan un creciente interés institucional por incorporar tecnologías de recarga de acuíferos y otras medidas de adaptación, tanto para mitigar la sobreexplotación del agua subterránea como para mejorar el abastecimiento en comunidades rurales y zonas vulnerables. Sin embargo, también evidencian importantes deficiencias en su planeación, seguimiento y evaluación. En el ámbito estatal, documentos como el Plan Estatal de Desarrollo Guanajuato Visión 2040 y los planes 2025 y 2030 presentan lineamientos generales, pero no establecen responsables específicos, mecanismos de seguimiento, calendarios de ejecución ni la distribución espacial de las acciones propuestas. De manera similar, instrumentos municipales como el Programa Municipal de Cambio Climático de León y el PMD 2045 plantean medidas generales, como captación de agua de lluvia, conservación de suelos, regulación de escorrentías o infiltración, pero sin precisar sitios de intervención, metas o cronogramas. La principal excepción corresponde al Programa de Gobierno Municipal León 2021–2024, que establece la construcción de 90 obras de bordería entre 2021 y 2024.

La revisión del estado de implementación de estas acciones puso de manifiesto otra limitante relevante: la ausencia de mecanismos institucionales claros para acceder a la información y dar seguimiento a los proyectos. Las consultas realizadas ante dependencias estatales y municipales, entre ellas IPLANEG, CEAG, SMAOT, la Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural, la Secretaría de Infraestructura, Conectividad y Movilidad, SAPAL e IMPLAN, evidenciaron una dispersión de

responsabilidades y la falta de información sobre las acciones de recarga implementadas en León. En diversos casos, las instituciones remitieron la consulta a otras dependencias o señalaron no contar con información específica sobre los proyectos.

A partir de los Informes Ambientales de la SMAOT fue posible identificar la ejecución de diversas acciones, entre ellas la instalación de 1,504 sistemas de captación de agua de lluvia entre 2013 y 2018, la restauración de más de 44,724 hectáreas de suelo en el Bajío y la realización de intervenciones en zonas de recarga entre 2019 y 2022. Sin embargo, estos informes se limitan a reportar el número de obras o la superficie atendida, sin información sobre su localización, estado de operación o resultados hidrológicos y socioambientales, lo que impide evaluar su efectividad. Del mismo modo, la información disponible en comunicados oficiales y medios locales permitió identificar algunas comunidades beneficiadas, aunque no fue posible vincular la mayoría de las acciones con los programas que les dieron origen. Únicamente los proyectos SISCAP y Captemos Agua pudieron identificarse de forma explícita, persistiendo en este último la ausencia de mecanismos de evaluación de resultados.

Estos resultados no permiten afirmar que exista una falta de apoyo institucional hacia las acciones adaptativas de recarga; sin embargo, sí evidencian la necesidad de fortalecer los mecanismos de planeación, monitoreo, evaluación y transparencia. Asimismo, muestran la importancia de garantizar la congruencia entre los objetivos de sostenibilidad planteados en los instrumentos de política pública y las acciones efectivamente ejecutadas, fortaleciendo la rendición de cuentas y la participación ciudadana en el seguimiento de los proyectos. Lo anterior constituye un requisito indispensable para avanzar hacia un modelo de gestión hídrica verdaderamente integral, adaptativo y participativo.

Relativo a la dimensión técnica del marco metodológico, se propusieron como objetivos fundamentales la identificación de zonas con aptitud para la recarga del acuífero, la definición de las acciones hidrológica y superficialmente más afines a la zona de estudio, así como la estimación de la recarga potencial que estas aportarían al AVL. Si bien ya se contaba con antecedentes relevantes como el mapa de zonas de recarga elaborado por la CEAG en 2018 y la caracterización desarrollada por Hernández-Laloth (1991), la cual continúa siendo un referente fundamental para las actualizaciones periódicas de la CONAGUA, se consideró pertinente desarrollar un análisis de viabilidad con mayor nivel de detalle, tanto cartográfico como en el número de parámetros biofísicos considerados, dado que el estudio se orienta a la implementación de acciones adaptativas de menor dimensión que exigen una delimitación espacial más precisa. Para la zonificación se aplicaron técnicas

multicriterio, específicamente AHP con la participación de seis expertos en hidrología, evaluando la pendiente del terreno, tipo de suelo, litología, geomorfología, densidad de drenaje, uso de suelo y cobertura vegetal, precipitación y densidad de lineamientos. Destaca que los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con la zonificación de las áreas de recarga propuesta por Hernández-Laloth (1991), quien identifica las principales zonas de recarga del AVL al sur del acuífero y en la porción noroccidental, correspondiente a la región de Los Altos de Jalisco. No obstante, se observan discrepancias con el mapa elaborado por la CEAG (2018). Si bien ambos estudios coinciden en identificar un bajo potencial de recarga en la Sierra de Guanajuato, el mapa de la CEAG asigna una aptitud baja en la zona del valle de León, moderada a la región de Los Altos de Jalisco y alta a los márgenes del río Turbio en el extremo sur del acuífero. Aunque se conocen los parámetros considerados en dicha evaluación (pendiente, textura del suelo, conductividad hidráulica, litología y densidad de drenaje), no se dispone de información sobre la ponderación asignada a las distintas capas temáticas, lo que dificultaba identificar el origen de estas diferencias.

En relación con este análisis, resulta pertinente destacar la decisión de omitir el criterio de nivel estático, ampliamente utilizado en investigaciones afines; si bien este constituye un indicador relevante, su inclusión fue descartada debido a que la intensa extracción de agua subterránea en León ha generado un cono de abatimiento significativo en la región central del AVL, lo que disminuye su utilidad al reflejar dinámicas de extracción más que procesos de infiltración (CONAGUA, 2024). Por su parte, respecto a la metodología AHP, es importante destacar que cualquier modificación en el peso de un criterio implica una redistribución matemática del peso total entre los demás, como consecuencia del proceso de normalización del vector de pesos, sin que ello suponga una relación causal entre los criterios. Por lo tanto, al ajustar el peso de uno o más factores, es necesario realizar un ajuste proporcional en los restantes para mantener dicha condición de normalización, y no como resultado de una influencia directa entre ellos. En este sentido, podrían implementarse modificaciones controladas en los pesos de los factores más relevantes del proceso de recarga, con el fin de evaluar cómo estas variaciones afectan la delimitación de las zonas con potencial de recarga; sin embargo, aunque este tipo de análisis se reconoce como una línea de investigación relevante para trabajos futuros, quedó fuera de los alcances del presente estudio para el AVL.

En lo relativo a la selección de acciones de recarga, la investigación buscó trascender el enfoque tradicional centrado únicamente en las características superficiales, hidrológicas y climáticas del terreno. Para lograr un análisis más integral y objetivo, se incorporaron criterios adicionales como el costo de implementación, el potencial de

generación de conflictos sociales, la confiabilidad, el rendimiento y la complejidad de diseño de las acciones. Al evaluar las técnicas MAR más populares reportadas en la literatura, se enfatiza que la diversidad de estas tecnologías puede ser muy amplia y adaptable. Dentro de esta etapa, la herramienta propuesta fundamentada en la asignación de estrellas a cada uno de los criterios evaluados demostró ser un método práctico, intuitivo y de fácil aplicación. Aunque en el AVL la calificación se basó en condiciones biofísicas, climáticas e hidrológicas obtenidas de fuentes oficiales (SGM, INEGI, CONAGUA y SMAOT) y literatura especializada, el enfoque permite ajustar progresivamente su nivel de detalle según la información disponible. Esto puede lograrse incorporando descripciones *in situ*, estimaciones de parámetros hidráulicos, además de análisis más exhaustivos de costos y mantenimiento. De igual manera, la delimitación de los sitios identificados como aptos puede refinarse mediante estudios de mayor detalle que consideren restricciones locales, tales como asentamientos humanos, infraestructura, tenencia de la tierra u otros elementos que, debido a la escala regional del análisis, no pueden representarse con un alto nivel de detalle en la cartografía generada.

Como última etapa metodológica de la dimensión técnica, se abordó el cálculo de la infiltración potencial mediante tres escenarios de terrazas y uno de estanques, definiendo el dimensionamiento y la distribución de las obras a partir de variables de precipitación, evaporación y parámetros hidráulicos teóricos. Se asumió una distribución uniforme de la lluvia mensual entre los días lluviosos, considerando que la evaporación antecede a la infiltración y que en días secos no hay agua disponible en obras de pequeña escala. Aunque este método indirecto resulta adecuado para estimar la recarga de intervenciones adaptativas de pequeñas dimensiones, se recomienda que investigaciones afines validen en campo parámetros como la conductividad hidráulica, la capacidad de infiltración y la porosidad efectiva, e incorporen simulaciones hidrológicas y de transporte de sedimentos para evaluar el impacto de la colmatación a largo plazo sobre la capacidad efectiva de infiltración.

Esta estimación permitió identificar que el volumen potencial de recarga derivado de estas acciones adaptativas es significativamente inferior a la recarga natural del acuífero o al volumen concesionado; sin embargo, esto no invalida su pertinencia o viabilidad. Por el contrario, los beneficios ambientales y sociales adicionales, como la mejora de las condiciones ambientales locales, el incremento de la humedad del suelo, el control de escorrentías e inundaciones, la reducción de la erosión y el fortalecimiento de la conciencia social sobre la protección del recurso, justifican plenamente su consideración. Por tanto, estas acciones deben entenderse no como una solución única o definitiva frente a la presión hídrica, sino como una alternativa ambientalmente sostenible y complementaria a los proyectos hidráulicos

tradicionales. Se considera que su incorporación efectiva en la política pública municipal y estatal podría marcar el inicio de un cambio de paradigma para trascender la visión predominantemente mercantil del agua y el enfoque centrado en la oferta.

En este sentido, los resultados respaldan en términos generales la hipótesis planteada, demostrando que un modelo metodológico que articula criterios técnicos, sociales y políticos es una herramienta pertinente para evaluar la viabilidad de las acciones adaptativas de recarga hídrica. No obstante, deben reconocerse limitaciones metodológicas asociadas al uso principal de información secundaria y parámetros teóricos, la ausencia de trabajo de campo directo, la falta de simulaciones hidrológicas y de sedimentos, y la omisión de una evaluación específica sobre la percepción, aceptación y disposición de los propietarios de los predios prioritarios, así como de los mecanismos de incentivos y gobernanza territorial. De estas limitaciones se derivan diversas líneas de investigación futura: en primer lugar, profundizar en los mecanismos de financiamiento para este tipo de intervenciones, así como en el diseño de estrategias sociales, institucionales y de participación comunitaria que incentiven el involucramiento de los propietarios de tierras ubicadas en zonas estratégicas para la recarga, como pagos por servicios ambientales, fondos de agua, subsidios e incentivos fiscales; en segundo lugar, fortalecer la selección de acciones MAR incorporando métricas cuantitativas e indicadores técnicos de costo, eficiencia hidráulica y mantenimiento; y por último, avanzar en la validación en campo, monitoreo continuo, modelación hidrológica y de transporte de sedimentos bajo escenarios de cambio climático y uso de suelo, a la par del estudio detallado de los procesos de gobernanza y aceptación social.

CONCLUSIONES

El presente trabajo desarrolló un análisis integral orientado a determinar la viabilidad de implementar acciones adaptativas de recarga para mitigar la sobreexplotación del AVL. El marco metodológico propuesto se sustenta en un enfoque multidimensional que integra las dimensiones técnica, social y política de la gestión hídrica. Este modelo incorpora el análisis de la gestión histórica y actual del recurso, la evaluación del papel de las acciones adaptativas dentro de la política pública vigente, la identificación de zonas con aptitud para la recarga, la selección objetiva de acciones acordes con las condiciones físico-hidrológicas del área de estudio y la estimación de la recarga potencial derivada de su implementación. Asimismo, se trata de una metodología flexible y replicable en contextos con problemáticas similares, adaptable a distintos niveles de disponibilidad de información, capacidades técnicas y recursos económicos.

Los resultados muestran que las limitaciones para la adopción de enfoques adaptativos en la gestión del AVL no son exclusivamente técnicas, sino también políticas e institucionales. La persistencia de modelos de gobernanza orientados principalmente a garantizar el abastecimiento mediante grandes obras hidráulicas ha reducido la atención hacia estrategias preventivas y de restauración del ciclo hidrológico. En este contexto, resulta fundamental fortalecer la vinculación entre la comunidad científica, las autoridades y los tomadores de decisiones, así como promover mecanismos de participación social y transparencia institucional que favorezcan la incorporación de medidas adaptativas dentro de una gestión más sustentable del recurso hídrico.

Respecto a las acciones adaptativas impulsadas desde el ámbito gubernamental, se identificó que, aunque existe un interés creciente reflejado en diversos planes y programas, persisten deficiencias en los mecanismos de inventario, monitoreo y evaluación de las intervenciones realizadas. Esto evidencia la necesidad de mejorar la accesibilidad y sistematización de la información para facilitar el seguimiento de las acciones implementadas y la replicabilidad de experiencias exitosas.

En relación con la zonificación de áreas con potencial de recarga, se determinó que los factores más influyentes corresponden a la pendiente, el tipo de suelo, la litología, los rasgos geomorfológicos, la densidad de drenaje, el uso de suelo y cobertura vegetal, la precipitación y la densidad de lineamientos. La integración ponderada de

estas variables permitió identificar 453.01 km² con alto potencial de recarga, localizados principalmente en la zona noroeste y en la porción meridional del acuífero, así como 679.53 km² con potencial moderado, distribuidos en la Sierra de Guanajuato, el flanco occidental y el extremo sur. Estas últimas áreas representan espacios con potencial de mejora mediante acciones de conservación y restauración de suelos y cobertura vegetal.

Como resultado del análisis multicriterio realizado para seleccionar las acciones más viables, se determinó que las terrazas, zanjas/tinas y estanques de infiltración constituyen las alternativas más adecuadas para el AVL. Asimismo, se identificó que la región de Los Altos de Jalisco presenta condiciones particularmente favorables para su implementación. En términos espaciales, se delimitaron 4.62 km² con alta aptitud para estanques de infiltración y 19.32 km² para terrazas, zanjas y obras afines, lo que representa un total de 23.94 km² con condiciones altamente favorables para la implementación de estas intervenciones.

Se estimó que la implementación de zanjas, terrazas y estanques en los sitios aptos del acuífero podría aportar un volumen potencial de recarga de 132,788 m³ anuales. Este volumen incrementaría la recarga del AVL de 76,647 m³/km² a 76,746 m³/km², lo que representa un aumento aproximado del 0.13 % con respecto a la recarga natural actual. Aunque este volumen es significativamente menor a la recarga natural del acuífero, estimada en 102,400,000 m³ anuales, así como con los 159,388,718 m³ de agua concesionados (CONAGUA, 2024), no disminuye la relevancia de las acciones propuestas, ya que sus beneficios trascienden la infiltración directa e incluyen la reducción de la erosión, la conservación de la humedad del suelo, el fortalecimiento de la cobertura vegetal, la mejora de hábitats locales y la promoción de una mayor conciencia ambiental sobre la protección del recurso hídrico. Asimismo, la viabilidad técnica y económica de estas intervenciones depende en gran medida de un mantenimiento periódico que preserve su capacidad de infiltración y prolongue su vida útil.

Los resultados obtenidos indican que estas acciones no constituyen una solución única ni suficiente para revertir por sí solas la sobreexplotación del acuífero; sin embargo, representan medidas ambientalmente sostenibles que pueden complementar las estrategias convencionales de abastecimiento y contribuir a una transición gradual hacia un modelo de gestión hídrica más integral, adaptativo y resiliente frente a los cambios hidrosociales y al cambio climático. En este sentido, el enfoque desarrollado resulta congruente con los objetivos planteados en el Programa Estatal de Cambio Climático de Guanajuato, particularmente en materia de adaptación hídrica, fortalecimiento de la resiliencia territorial y conservación de

ecosistemas estratégicos. Asimismo, las acciones adaptativas de recarga se vinculan con los principios establecidos en la Ley de Economía Circular para el Estado de Guanajuato y sus Municipios, al promover un aprovechamiento más eficiente y sostenible del agua mediante enfoques de regeneración, conservación y fortalecimiento de los ciclos naturales. De manera complementaria, los resultados guardan correspondencia con diversas líneas estratégicas del Programa Estatal Hidráulico de Guanajuato con horizonte al año 2030, especialmente aquellas orientadas a la recarga de acuíferos, la gestión sustentable del agua, la participación de la comunidad científica y el fortalecimiento de la cultura hídrica. Asimismo, los alcances de esta investigación contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), ODS 13 (Acción por el clima) y ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres). El principal aporte de esta investigación radica en la construcción de un modelo metodológico integral que permite evaluar la viabilidad de acciones adaptativas de recarga incorporando de manera explícita las dimensiones técnicas, sociales y políticas que condicionan su implementación. Los resultados evidencian que la problemática hídrica trasciende los aspectos físicos y responde a dinámicas complejas de gobernanza, por lo que la incorporación de acciones adaptativas debe entenderse como parte de una transformación más amplia hacia modelos de gestión hídrica sustentables, capaces de integrar cambios técnicos, institucionales y sociales.

Finalmente, aunque los resultados deben interpretarse considerando los alcances metodológicos, la disponibilidad de información y la escala de análisis empleada, ello no limita la utilidad del modelo propuesto como herramienta para orientar la planificación, evaluación e implementación de acciones adaptativas de recarga. La validación en campo, la simulación detallada de procesos hidrológicos y de transporte de sedimentos, así como el análisis de la aceptación social y los mecanismos de adopción de estas medidas, constituyen líneas de investigación futuras que permitirán fortalecer y ampliar las aplicaciones del modelo desarrollado.

REFERENCIAS

- Achu, A., Reghunath, R. y Thomas, J. (2019). Mapping of Groundwater Recharge Potential Zones and Identification of Suitable Site-Specific Recharge Mechanisms in a Tropical River Basin. *Earth Systems and Environment*, 1-15. doi:10.1007/s41748-019-00138-5
- Aguilera, F. (2008). *La nueva economía del agua*. Madrid, España: Los Libros de la Catarata.
- Aguilera, F. (2021). *Economía basada en el saqueo y la violencia. Ni democracia, ni mercado*. Editorial Centros de Estudios Sociales de América Latina.
- Alam, F., Azmat, M., Zarin, R., Ahmad, S., Raziq, A., Hsu-Wen, V., . . . Yuei-An, L. (2022). Identification of Potential Natural Aquifer Recharge Sites in Islamabad, Pakistan, by Integrating GIS and RS Techniques. *Remote Sensing* 14, 1-26. doi:10.3390/rs14236051
- Alam, S., Borthakur, A., Ravi, S., Gebremichael, M. y Mohanty, S. (2021). Managed aquifer recharge implementation criteria to achieve water sustainability. *Science of the Total Environment*, 1-19. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.144992
- Alternativas. (consultado el 15 de junio de 2024). Obtenido de ¿qué hacemos?: http://www.alternativas.org.mx/hacemos_agua.html
- Anbazhagan, S., Ramsamy, S. y Gupta, S. (2005). Remote sensing and GIS for artificial recharge study, runoff estimation and planning in Ayyar Basin, Tamil Nadu, India. *Environmental Geology* 48, 158-170.
- Arana, O. (2021). *Construcción de zanjas de infiltración en laderas para la recarga hídrica en el distrito Huayllacayan, Provincia Bolognesi, Departamento Ancash*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina / Facultad de Ingeniería Agrícola.
- Ayuntamiento de León. (2022). *1er Informe de Gobierno, Ayuntamiento de León 2021 - 2024*. León: Ayuntamiento de León.
- Ayuntamiento de León. (2014). *Programa Municipal de Cambio Climático, Resumen Ejecutivo*. León: Ayuntamiento de León / Centro Mario Molina.
- Ayuntamiento de León. (10 de abril de 2020). Programa de Bordería para captar agua de lluvia continúa en beneficio de productores de León. Recuperado el 6 de mayo de

2023, de Comunicados: <https://enterate.leon.gob.mx/programa-de-boderia-para-captar-agua-de-lluvia-continua-en-beneficio-de-productores-de-leon/>

Ayuntamiento de León. (2021). *Plan Municipal de Desarrollo, León hacia el futuro. Visión al 2045*. León: Ayuntamiento de León, Periódico Oficial.

Ayuntamiento de León. (8 de junio de 2022). Contarán comunidades rurales con 32 bordos más para captación de agua. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de Comunicados: <https://enterate.leon.gob.mx/contaran-comunidades-rurales-con-32-bordos-mas-para-captacion-de-agua/>

Ayuntamiento de León. (2022). *Programa de Gobierno Municipal de León, Guanajuato, 2021-2024. -versión integral-*. León: Ayuntamiento de León.

Azizur, M., Rusteberg, B., Salah, M., Lutz, A., Abu, M. y Sauter, M. (2013). An integrated study of spatial multicriteria analysis and mathematical modelling for managed aquifer recharge site suitability mapping and site ranking at Northern Gaza coastal aquifer. *Journal of Environmental Management* 124, 25-39.

Barea, J. (6 de agosto de 2018). Los canales de riego en las montañas de Sierra Nevada, aliados para la gestión del agua. Obtenido de iagua: <https://www.iagua.es/noticias/onu/canales-riego-montanas-sierra-nevada-aliados-gestion-agua>

Barkin, D. y Klooster, D. (2006). Estrategias de la Gestión del Agua Urbana en México: Un análisis de su evolución y las limitaciones del debate para su privatización. En D. Barkin y (Coord), *La Gestión del Agua Urbana en México-Retos, Debates y Bienestar (1-45)* (págs. 1-45). México: Universidad de Guadalajara.

Ben Khelifa, M., Hermassi, W., Strohmeier, S., Zucca, C., Ziadat, F., Boufaroua, M. y Habaieb, H. (2017). Parametization of the effect of bench terraces on runoff and sediment yield by SWAT modelling in a small semi-arid watershed in northern Tunisia. *Land Degrad. Dev.* 28, 1568-1578.

Bharwani, S. y Downing, T. (2009). Methodological footprints. Multiple pathways for analyzing dynamic vulnerability in coupled socio-ecological systems. Obtenido de N. Project, New Approaches to Adaptative Water Management Under Uncertainty, Stockholm, 17: <http://www.newater.uni-osnabrueck.de/index.php?pid=1050>

Bisaro, A., Hinkel, J. y Kranz, N. (2020). Multilevel water, biodiversity and climate adaptation governance: evaluating adaptive management in Lesotho. *Environmental Science & Policy*. Vol 13., 637-647.

- Biswajit, D. y Subodh, C. (2019). Assessment of groundwater recharge and its potential zone identification in groundwater-stressed Goghat-I block of Hugli District, West Bengal, India. *Environment, Development and Sustainability*, 1-19. doi:10.1007/s10668-019-00457-7
- Boughariou, E., Saidi, S., Eddine, A., Khanfir, H., Zarehloul, Y. y Bouri, S. (2015). Mapping recharge potential zones and natural recharge calculation: study case in Sfax region. *Arab J Geosci* 8, 5203-5221. doi:10.1007/s12517-014-1512-x
- 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. *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ-2015*, 1-6.
- Briseño-Ruiz, J., Escolero-Fuentes, O., Mendoza-Cázares, E. y Gutiérrez-Ojeda, C. (2017). Infiltración de agua de tormenta al acuífero de San Luis Potosí, México: Colector Salk. En Ó. Escolero, C. Gutiérrez y E. Mendoza, *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (págs. 159-189). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Caldera, A. (2014). Capítulo 3: La gestión del agua urbana en León, Guanajuato: un análisis político de las ideas que dan forma a las políticas públicas y sus resultados. En D. (Tagle), *La crisis multidimensional del agua en la ciudad de León, Guanajuato* (págs. 67-85). León, México: Universidad de Guanajuato-Campus León.
- Caldera, A. y Tagle, D. (2015). La acción pública y la construcción social de conflictos por el agua entre cuencas vecinas: el caso de la gestión del agua en León, Guanajuato. En H. (Ochoa-García), *WATERLAT-GOBACIT Network Working Papers. Thematic Area Series SATCTH - TA6 - Basins and Hydrosocial Territories, Vol. 2 N°1* (págs. 115-130). Newcastle upon Tyne, UK and Guadalajara, Mexico: WATERLAT-GOBACIT Network Working Papers.
- Caldera, A. y Tagle, D. (2020). Introducción. En A. Caldera y D. Tagle, *Agua en el bajío guanajuatense* (págs. 9-32). León, México: Universidad de Guanajuato.
- Caldera, A., Tagle, D. y Davison, M. (2020). Capítulo 1. Guanajuato: crónica del cambio institucional en su gestión del agua. En A. Caldera y D. Tagle, *Agua en el bajío guanajuatense* (págs. 33-64). Guanajuato, México: Universidad de Guanajuato.
- California Department of Transportation. (2020). *Infiltration Basin. Design Guidance*. Sacramento, United States: Caltrans Division of Design.

- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2023). *Ley de Aguas Nacionales*. Última reforma publicada DOF 08-05-2023. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Cardoza, R., Cuevas, L., García, J., Guerrero, J., González, J., Hernández, H., . . . Vázquez, C. (2008). *Obras para el control de erosión laminar*. Zapopan, México: Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).
- Casanova, J., Devau, N. y Pattenati, M. (2016). Managed Aquifer Recharge: An Overview of Issues and Options. In A. Jakerman, O. Barreteau, R. Hunt, J. Rinaudo y A. Ross, *Integrated Groundwater Management* (pp. 413-434). Orléans, France: Springer.
- Casillas, M. (2023). 1. El Zapotillo bajo acuerdo: Respuestas al acertijo ambiental. En D. Tagle, A. Caldera, X. Delgado y J. Mora, *El Zapotillo y su viraje en la 4T. Voces y Reacciones* (págs. 17-44). León, México: Universidad de Guanajuato.
- Chan, P. y Myeong-Hun, L. (2019). Prioritizing Sustainable City Indicators for Cambodia. *Urban Science*, Vol 3, 104, 1-32. doi:10.3390/urbansci3040104
- Chowdhury, A., Jha, M. y Chowdary, V. (2010). Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur District, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. *Environmental Earth Sciences* 59, 1209-1222. doi:10.1007/s12665-009-0110-9
- Chowdhury, A., Jha, M., Chowdary, V. y Mal, B. (2009). Integrated remote sensing and GIS-based approach for assessing groundwater potential in West Medinipur district, West Bengal, India. *International Journal of Remote Sensing* 30 (1), 231-250.
- CNN Español. (5 de noviembre de 2021). En esta región de México lograron 'domesticar' el agua combinando la sabiduría indígena con la tecnología moderna. El resultado es un ejemplo para el mundo. Obtenido de CNN Español: <https://cnnespanol.cnn.com/2021/11/05/agua-para-siempre-mexico-guardianes-orix/>
- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). (2007). *Estudio de Mitigación y Disminución de Riesgos de Inundaciones del Río Turbio, Tramo León a la desembocadura al Río Lerma*. Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). (2018). Zonas de recarga de acuíferos del estado de Guanajuato. Obtenido de Comisión Estatal del Agua: https://agua.guanajuato.gob.mx/espacioacuoso/pdf/3_poster_zonas_de_recarga.pdf

- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). (24 de junio de 2024). Misión. Obtenido de Comisión Estatal del Agua de Guanajuato:
<https://agua.guanajuato.gob.mx/conocenos.php>
- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). (26 de junio de 2024). Inicio / Consejos Técnicos de Aguas (COTAS). Obtenido de Comisión Estatal del Agua de Guanajuato:
<https://agua.guanajuato.gob.mx/cotas.php>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de León (1113), Estado de Guanajuato*. Ciudad de México, México: CONAGUA, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2017). *Presas y acueductos para abastecimiento de agua potable - Presa El Realito*. Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (09 de octubre de 2019). Acciones y Programas>Sistema Nacional de Información del Agua SINA>Usos del Agua>Uso agrupado abastecimiento público. Recuperado el 08 de agosto de 2023, de Comisión Nacional del Agua: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Valle de León (1113), Estado de Guanajuato*. Ciudad de México, México: Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). *Estadísticas del Agua en México 2021*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero La Muralla (1111), Estado de Guanajuato*. Ciudad de México, México: Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Río Turbio (1114), Estado de Guanajuato*. Ciudad de México, México: Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Valle de León (1113), Estado de Guanajuato*. Ciudad de México, México: Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Valle de León (1113), Estado de Guanajuato*. Ciudad de México, México: Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (22 de junio de 2024). Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS). Obtenido de Red Mexicana de Cuencas: <https://remexcu.org/index.php/organos-auxiliares/cotas>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (20 de junio de 2024). Consulta a la base de datos del REPDA / Estado: Guanajuato / Municipio: León. Obtenido de CONAGUA: <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). *Estadísticas del Agua en México 2023*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua / Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (29 de abril de 2021). Sistema de zanja bordo. Obtenido de Fotogalería de Obras de conservación de suelos: https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/fsuelos/images/SISTEMA_DE_ZANJA_BORDO.JPG
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (09 de octubre de 2019). Situación de los Recursos Hídricos. Obtenido de Sistema Nacional de Información del Agua SINA: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos>
- Consejo Técnico de Aguas de León, A.C (COTAS). (2018). *Sistemas de Captación de Agua Pluvial en zonas de alta vulnerabilidad hídrica en comunidades de la Sierra de Lobos perteneciente al Municipio de León (SISCAP)*. León: COTAS LEÓN, A.C.
- Cordoval, L. y De Alquino, P. (2009). *Barraginhas: Água de chuva para todos / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Milho e Sorgo*. Brasília, DF: Embrapa informação Tecnológica (ABC da Agricultura Familiar, 21).
- Cotas de León, A.C. (2019). *Avances de las obras el San José de Otates Sur*. León, México: Cotas de León, A.C.
- 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 A.C.; Instituto de Geografía-UNAM; Facultad de Ciencias-UNAM; Conservation International; CONANP.
- Cullell, J. (10 de noviembre de 2021). El País. Obtenido de Luz verde a la presa de El Zapotillo: tres pueblos se salvan de la desaparición: <https://elpais.com/mexico/2021-11-11/luz-verde-a-la-presa-de-el-zapotillo-tres-pueblos-se-salvan-de-la-desaparicion.html>

- Defterdarovic, J., Filipovic, L., Kranjcec, F., Ondrašek, G., Kikic, D., Novosel, A., . . . Filipovic, V. (2021). Determination of Soil Hydraulic Parameters and Evaluation of Water Dynamics and Nitrate Leaching in the Unsaturated Layered Zone: A Modelling Case Study in Central Croatia. *Sustainability*, 13, 6688, 1-20.
- Dillon, P. (2005). Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal* 13, 313-316. doi:10.1007/s10040-004-0413-6
- Dillon, P. y Molloy, R. (2006). *Developing Aquifer Storage and Recovery (ASR) Opportunities in Melbourne. Technical Guidance for ASR*. Canberra, Australia: CSIRO Land and Water.
- Dillon, P., Alley, W., Zheng, Y., Vanderzalm, J., Page, D., Ward, J., . . . Carlson, R. (2022). *Managed Aquifer Recharge: Overview and Governance*. n.p: International Association of Hydrogeologists.
- Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H. y Ward, J. (2009). *Managed aquifer recharge: An Introduction*. Canberra, Australia: National Water Commission.
- Dillon, P., Vanderzalam, J., Sidhu, J., Page, D. y Chadha, D. (2014). *A Water Quality Guide to Managed Aquifer Recharge in India*. Department of Foreign Affairs and Trade / UNESCO.
- Dobhal, R., Uniyal, D., Chandra, N., Grischek, T. y Sandhu, C. (2019). *Guidelines on Bank Filtration for Water Supply in India*. New Delhi, India: Department of Science & Technology (DST).
- Ebrahim, G., Fathi, S., Lautze, J., Ansems, N., Villholth, K., Nijsten, G.-J., . . . Kaeleboga, D. (2017). *Review of Managed Aquifer Recharge (MAR) Experience in Africa and MAR Suitability Mapping for Ramotswa Transboundary Aquifer Area*. Colombo, Sri Lanka: IWMI, igrac.
- Editorial Telediario. (10 de abril de 2020). Destinan más de 2mdp para captar agua de lluvia en zona agrícola de León. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de Telediario: <https://www.telediario.mx/local/destinan-2-mdp-captar-agua-lluvia-zona-agricola-leon>
- Edwards, E., Washburn, B. y Lock, B. (2017). *Dry wells for stormwater management*. Alexandria, USA: American Geosciences Institute (AGI).
- El Heraldo de León. (4 de julio de 2022). Arranca el programa de bordería. Recuperado el 5 de mayo de 2023, de El Heraldo de León: <https://www.heraldoleon.mx/arranca-el-programa-de-borderia-en-rafael-de-estala/>

- El Herald de León. (9 de junio de 2022). Construirán bordos de captación de agua. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de El Herald de León: <https://www.heraldoleon.mx/municipio-construira-mas-de-90-bordos-de-captacion-de-agua/>
- EL INFORMADOR. (29 de diciembre de 2009). INFORMADOR.MX. Obtenido de La Presa de Arcediano siempre fue inviable: <https://www.informador.mx/Jalisco/La-Presa-de-Arcediano-siempre-fue-inviable-20091229-0180.html>
- El Sol de San Luis. (sábado de enero de 2021). Presa El Realito, el gran dolor de cabeza de los potosinos. San Luis Potosí, México.
- El Sol de San Luís. (20 de julio de 2022). Otra vez sin agua 200 mil potosinos por falla en el acueducto de la presa El Realito. San Luis Potosí, México.
- Espinoza, J. (2022). *Diseño de obra civil como aplicación de la Gestión de Recarga de Acuíferos en la comunidad El Laurel, Guanajuato*. Guanajuato, México: Universidad de Guanajuato. División de Ingenierías.
- Esqueda, C. (3 de marzo de 2023). Destina ayuntamiento 39 millones de pesos para apoyo rural en León . Recuperado el 5 de mayo de 2023, de Periódico Correo: <https://periodicocorreo.com.mx/leon/destina-ayuntamiento-39-millones-de-pesos-para-apoyo-rural-en-leon-20230303-69221.html>
- Esri. (2024, November 9). Weighted Overlay (Spatial Analyst). Retrieved from ArcGis Pro: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/weighted-overlay.htm>
- Estrada, L. (8 de enero de 2023). Gobierno instalará sistema de captación de lluvia en escuelas y viviendas. Recuperado el 8 de mayo de 2023, de Periódico AM - León: <https://www.am.com.mx/guanajuato/2023/1/8/gobierno-instalara-sistema-de-captacion-de-lluvia-en-escuelas-viviendas-641788.html>
- Ezell, B. (2007). Infrastructure Vulnerability Assessment Model (I-VAM). *Multi-Journal Collection in support of UN SDG 13*, 571-583. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1539-6924.2007.00907.x>
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- FAO. (21 de enero de 2025). Contrucción del Estanque. 2. Selección del emplazamiento y planificación general. Retrieved from Colección FAO Capacitación. Simple methods for aquaculture.:

https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6708s/Index.htm

- Fernández, D. y López, O. (2017). *Pozos de absorción*. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).
- Fernández, D., Martínez, M. y Ramírez, M. (2009). *Catálogo de obras y prácticas de conservación de suelo y agua. Apoyadas con el componente de conservación y uso sustentable del suelo y agua (COUSSA) del Programa Uso Sustentable de los Recursos Naturales para la Producción Agrícola*. Texcoco: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) / Colegio de Postgraduados.
- Fernández, D., Martínez, M., Ramírez, H. y Bulmaro, L. (2017). *Diseño y construcción de jagüeyes*. Segunda edición. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Subsecretaría de Desarrollo Rural, Dirección General de Producción Rural Sustentable en Zonas Prioritarias.
- Figueroa, D. (20 de Octubre de 2020). ITESO, Universidad Jesuita de Guadalajara. Obtenido de El ITESO lidera proyecto para diseñar modelos de gestión del agua para cinco ciudades: https://www.iteso.mx/web/general/detalle?group_id=22113815
- Funes, N., Martín, S. y González, E. (2018). *Grandes fracasos hidráulicos. Embalses carentes de utilidad*. Ecologistas en Acción.
- Gale, I. (2005). *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- Glendenning, C. J., & Vervoort, R. W. (2010). Hydrological impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part 1: Field-scale impacts. *Agricultural Water Management*, 98(2), 331–342. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.09.003>
- Glendenning, C. J., & Vervoort, R. W. (2011). Hydrological impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part 2: Catchment-scale impacts. *Agricultural Water Management*, 98(4), 715–730. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.11.010>
- Gobierno de Guanajuato. (18 de julio de 2025). Boletines Guanajuato. Obtenido de Garantiza Gobierno de la Gente agua para Guanajuato; este año inicia la construcción del Acueducto Solís-León: <https://boletines.guanajuato.gob.mx/2025/07/18/garantiza-gobierno-de-la-gente-agua-para-guanajuato-este-ano-inicia-la-construccion-del-acueducto-solis-leon/>

- Gobierno de México. (19 de junio de 2024). Data México. Obtenido de León:
<https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/leon?redirect=true>
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2019). *Programa de Gobierno 2018 - 2024*. Guanajuato: Gobierno del Estado - Poder Ejecutivo.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2003). *Plan Estatal de Desarrollo 2025*. Guanajuato.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2011). *Plan Estatal de Desarrollo 2030*. Guanajuato.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2011). *Programa Estatal de Cambio Climático Guanajuato*. Guanajuato: Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2012). *Plan Estatal de Desarrollo: Guanajuato Siglo XXI+35*. Guanajuato: Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2015). *Programa Estatal Hidráulico de Guanajuato, Resumen Ejecutivo*. Gobierno el Estado de Guanajuato / Comisión Nacional del Agua / COLMERN, A.C.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (22 de octubre de 2017). Implementan sistema de captación de agua del lluvia en 6 localidades de León. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de Boletines Guanajuato:
<https://boletines.guanajuato.gob.mx/2017/10/22/implementan-sistema-captacion-agua-lluvia-6-localidades-leon/>
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2018). *Informe Ambiental del Estado de Guanajuato 2012 - 2018*. Guanajuato: Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2018). *Plan Estatal de Desarrollo Guanajuato 2040. Construyendo el futuro*. Guanajuato: Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (03 de Abril de 2020). Implementan proyectos productivos para optimizar el agua. Obtenido de
<https://boletines.guanajuato.gob.mx/2020/04/03/implementan-proyectos-productivos-para-optimizar-el-agua/>
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2020). *Informe Ambiental del Estado de Guanajuato 2020*. Guanajuato: Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (21 de mayo de 2020). Invierten 2.4 mdp para obras de captación de agua en León. Recuperado el 5 de mayo de 2023, de Boletines Dependencias: <https://boletines.guanajuato.gob.mx/2020/05/21/invierten-2-4-mdp-para-obras-de-captacion-de-agua-en-leon/>

- Gobierno del Estado de Guanajuato. (8 de febrero de 2021). Aprovechan los recursos naturales para la captación de agua para borderías en el norte del estado. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de Boletines Dependencias: <https://boletines.guanajuato.gob.mx/2021/02/08/aprovechan-los-recursos-naturales-para-la-captacion-de-agua-para-borderias-en-el-norte-del-estado/>
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (2023). *Informe Ambiental del Estado de Guanajuato 2021 - 2022*. Guanajuato: Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial.
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (29 de Julio de 2024). Boletines Guanajuato. Obtenido de Bordería: <https://boletines.guanajuato.gob.mx/tag/borderia/>
- Godínez, J. (2022). *Paradigm Lost - On the Value of Lost Causes in Transforming Cities and Water Systems' Development Pathways*. Delft: IHE Delft Institute for Water Education.
- Godínez, J., Ochoa-García, H., Van Cauwenbergh, N. y Van der Zaag, P. (2023). 3. Un sueño hecho realidad: Transición del conflicto por el proyecto hidráulico El Zapotillo a un plan de justicia para los pueblos afectados. En D. Tagle, A. Caldera, X. Delgado y J. Mora, *El Zapotillo y su viraje en la 4T. Voces y reacciones* (págs. 65-88). León, México: Universidad de Guanajuato.
- Goepel, K. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytical Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*. Vol. 10 Issue 3, 469-487. doi:10.13033/ijahp.v10i3.590
- Gómez, A. (2015). Redes y movimientos sociales en contra de la construcción de presas en México. El caso del Movimiento Mexicano de Afectados por las Presas y en Defensa de los Ríos. *Revista Espaço Acadêmico - N° 167*, 5-15.
- Gómez, A., Wagner, L., Torres, B., Martín, F. y Rojas, F. (2014). Resistencias sociales en contra de los megaproyectos hídricos en América Latina. *Revista Europea de Estudios Latinoamericanos y del Caribe, No. 97*, 75-96.
- González, A. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del Río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la A.G.E.N.* °38, 311-329.
- González, I. (2023). *Propuesta de punto de acuerdo para que se revise, evalúe, actualice y dé seguimiento al Programa Estatal Hidráulico*. Congreso del Estado de Guanajuato, Sexagésima Quinta Legislatura.
- González, N. (18 de agosto de 2023). Pulso. Diario de San Luis. Obtenido de ESPECIAL: El Realito. Crónica de la crisis hídrica en San Luis Potosí:

<https://pulsoslp.com.mx/slp/fallas-en-la-presa-el-realito-la-raiz-de-la-crisis-hidrica-en-san-luis-potosi/1708018>

- Government of India. (2007). *Manual on Artificial Recharge of Ground Water*. New Delhi, India: Ministry of Water Resources.
- Grützmacher, G. y Sajil Kumar, P. (2012). Introduction to managed aquifer recharge (MAR) - overview of schemes and settings worldwide. *Managed Aquifer Recharge: Methods, Hydrogeological Requirements, Post and Pre-treatment Systems*, (pp. 1-11).
- Gutiérrez, C. y Ortiz, G. (2017). Proyectos de recarga MAR en el Acuífero Principal-Región Lagunera, México. En O. Escolero, C. Gutiérrez y Y. Mendoza, *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (págs. 139-158). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Guysa. (1998). *Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de León, Gto.* Guanajuato, México: Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato.
- Hani, H., Nour El Din, M., Khalifa, A. y Elalfy, E. (2023). Development of suitability map for managed aquifer recharge: Case study, West Delta, Egypt. *Water Infrastructure, Ecosystems and Society, Vol. 72, No. 6*, 868-884. doi:10.2166/aqua.2023.177
- Hernández, J. (2018). *Efectos de la urbanización en la gestión del agua en las zonas periurbanas. El caso de la Zona Metropolitana de León, Guanajuato*. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.
- Hernández, R. y Herrerías, G. (abril de 2004). Tecnologías de Regeneración de cuencas para la obtención de Agua - El programa "Agua para Siempre" -. Obtenido de Alternativas: <http://www.alternativas.org.mx/Regeneracion%20de%20cuencas.pdf>
- Hernández, R. y Herrerías, G. (Consultado el 15 de junio de 2024). Agua para Siempre. Obtenido de Alternativas: <http://www.alternativas.org.mx/Agua%20para%20Siempre.pdf>
- Hernández-Laloth, N. (1991). *Modelo Conceptual del Funcionamiento Hidrodinámico del Sistema Acuífero del Valle de León*. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Hunink, J., Niadas, I., Antonaropoulos, P., Droogers, P. y de Vente, J. (2013). Targeting of intervention areas to reduce reservoir sedimentation in the Tana catchment (Kenya) using SWAT. *Hidrological Sciences Journal*. 58 (3), 1-15.
- Huntjens, P., Pahl-Wostl, C., Rihoux, B., Flachner, Z., Neto, S., Koskova, R., . . . Dickens, C. (2008). The role of adaptive and integrated water management (AIWM) in

developing climate change adaptation strategies for dealing with floods or droughts - A formal comparative analysis of eight water management regimes in Europe, Asia, and Africa. Obtenido de N. Project, New Approaches to Adaptive Water Management Under Uncertainty, Osnabrück, Germany.:
<http://www.newater.uniosnabrueck.de/index.php?view=folders&showPage=1063>

Ibrahim, M. y Shatnawi, A. (2022). Delineating potential sites for artificial groundwater recharge using a mathematical approach to remote sensing and GIS techniques. *Water Supply*, Vol. 22, No. 4, 4230-4246. doi:10.2166/ws.2022.046

Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN). (2019). *Diagnóstico del Municipio de León 2019*. León, México: IMPLAN.

Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN). (2023). *Estudio de Agua y Drenaje a Nivel Metropolitano*. León, México: IMPLAN.

Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN). (2023). *Estudio de Agua y Drenaje a Nivel Metropolitano. Documento Síntesis*. León, México: Instituto Municipal de Planeación León (IMPLAN).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (5 de agosto de 2025). Índice Nacional de Precios al Consumidor. Obtenido de Calculadora de inflación:
<https://www.inegi.org.mx/app/indicesdepresios/calculadorainflacion.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Estructura económica de Guanajuato, en síntesis*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato (IPLANEG). (2019). *Programa Estatal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Guanajuato PEDUOET 2040*. IPLANEG.

Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato (IPLANEG). (2022). Consulta de indicadores. Recuperado el 29 de marzo de 2023, de Medio ambiente y territorio / Información al cierre del 2022:
<https://iplaneg.guanajuato.gob.mx/dimension-medio-ambiente/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (19 de junio de 2024). Información por entidad / Guanajuato. Obtenido de cuéntame:
<https://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/gto/poblacion/default.aspx?tema=me&e=11>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (19 de junio de 2024). Población / Población total. Obtenido de Cuéntame de México / Población: <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1993). *Cuaderno Estadístico Municipal de León*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1998). *Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).
- Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, A.C. (ITESO). (2021). *Propuesta Nr: 308965 "Sistemas adaptativos para la gestión sustentable del agua en ciudades y cuencas en situación de conflicto y alta presión hídrica"*. PRONACES Agua.
- International Groundwater Resources Assessment Centre IGRAC - UNESCO. (2007). *Artificial Recharge of Groundwater in the World, Report*. Delft, The Netherlands: IGRAC - UNESCO.
- International Rivers. (2008). *Dirty Hydro: Dams and Greenhouse Gas Emissions*. Berkeley, California: internationalrivers.org.
- Irrigat. (8 de marzo de 2023). Barraginhas e a importância dessas pequenas obras para a conservação do solo e da água. Obtenido de Irrigat: <https://irrigat.com.br/barraginhas/>
- Jena, S., Kumar, R., Ramadas, M., Prasad, B. y Kishore, S. (2020). Delineation of groundwater storage and recharge potential zones using RS-GIS-AHP: Application in arable land expansion. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 1-53. doi:10.1016/j.rsase.2020.100354
- Jiménez, Ó. (04 de julio de 2023). Pase a crisis del agua en Guanajuato, acaban con los COTAS que optimizaban su uso. Obtenido de Periódico Correo: <https://periodicocorreo.com.mx/vida-publica/pese-a-crisis-de-agua-en-guanajuato-acaban-con-los-cotas-que-optimizaban-su-uso-20230704-76982.html>
- Kaliraj, S., Chandrasekar, N. y Magesh, N. (2013). Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. *Arabian Journal of Geosciences*, 1-17. doi:10.1007/s12517-013-0849-x

- Kazakis, N. (2018). Delineation of Suitable Zones for the Application of Managed Aquifer Recharge (MAR) in Coastal Aquifers Using Quantitative Parameters and the Analytical Hierarchy Process. *Water*, 10, 804, 1-22.
- Kumar, T., Kant, A. y Jhariya, D. (2016). Multi-criteria decision analysis for planning and management of groundwater resources in Balod District, India. *Environmental Earth Sciences* 75, 1-16. doi:10.1007/s12665-016-5462-3
- Langhoff, L., Geraldi, A. y Rosell, P. (2017). El concepto de ciclo hidro-social aplicado a los conflictos por el acceso al agua. El caso de la disputa por el río Atuel entre las provincias de La Pampa y Mendoza, Argentina. *Papeles de Geografía*, núm. 63.
- López, J. A., Rodríguez, L., Murillo, J. M., Orden, J. A. de la, Armayor, J. L., & Castaño, S. (2000). *Recarga artificial de acuíferos. Conceptos generales*. En *Recarga artificial de acuíferos. Síntesis metodológica. Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante* (Libro 36). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). https://aguas.igme.es/igme/publica/libro36/pdf/lib36/in_01a.pdf
- López-Ballesteros, A., Senent-Aparicio, J., Srinivasan, R. y Pérez-Sánchez, J. (2019). Assessing the Impact of Best Management Practices in a Highly Anthropogenic and Ungauged Watershed Using the SWAT Model: A Case of Study in the El Beal Watershed (Southeast Spain). *Agronomy*. 9. 576.
- Lozano, L., Soracco, C., Buda, V., Sarli, G. y Filgueira, R. (2014). Stabilization of Soil Hydraulic Properties Under a Long Term No-Till System. *R. Bras. Ci. Solo*. 38, 1281-1292.
- Lucas-Borja, M., Piton, G., Yu, Y., Castillo, C. y Zema, D. (2021). Check dams worldwide: Objectives, functions, effectiveness and undesired effects. *Catena* 204, 1-14.
- Maddrell, S. y Neal, I. (2013). *Building sand dams: a practical guide*. London: Excellent Development.
- Martínez, G. (2003). La Nueva Cultura del Agua. *Naturaleza Aragonesa* (105), 41-60.
- Martínez, J. (19 de octubre de 2021). Graves Problemas de Abastecimiento ¿Por qué la Ciudad de México se queda sin agua si llueve el doble que en Madrid? Obtenido de El Confidencial: https://www.elconfidencial.com/medioambiente/agua/2021-10-19/ciudad-de-mexico-se-queda-sin-agua_3308143/#:~:text=El%20SACMEX%20abastece%20diariamente%20a,14%2C1%25%20del%20total.
- Martínez-Velarde, R. (2014). Presas y Defensa de los Territorios. La construcción de presas como manifestación del despojo extractivista y la defensa de los territorios como estrategia de resistencia de las comunidades. *Entretextos*. Vol. 6, N°18, 1-12.

- 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.
- Méndez, A. (19 de noviembre de 2019). Experiencias y proyectos en Puebla. Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno de México: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/experiencias-y-proyectos-en-puebla-226912>
- Mendoza, E. (2017). Clasificación de tecnologías MAR. En Ó. Escolero, C. Gutiérrez y E. Mendoza, *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (págs. 81-99). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Mendoza, M., Tagle, D., Mora, J. y Delgado, X. (2023). 4. Modificación al proyecto Presa El Zapotillo. En D. Tagle, A. Caldera, X. Delgado y J. Mora, *El Zapotillo y su viraje en la 4T. Voces y reacciones* (págs. 89-113). León, México: Universidad de Guanajuato.
- Mendoza-Cázares, E., Ramírez-León, J. y Puero-Piedra, Z. (2017). Recarga utilizando agua de lluvia en la cuenca del Río Magdalena, Ciudad de México. En O. Escolero, C. Gutiérrez y E. Mendoza, *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (págs. 227-281). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Miller, K., Milman, A. y Kiparsy, M. (2021). Introduction to the Special Collection: Institutional Dimensions of Groundwater Recharge. *Water Management, Science and Technology. Special Collection: Institutional Dimensions of Groundwater Recharge*, 1-10.
- Ministry of the Environment. (2004). *Model Project to Combat Desertification In NARE Village, BURKINA FASO. Technical Report of the Subsurface Dam*. Japan: Global Environmental Issues Division, Ministry of the Environmental, Overseas Environmental Cooperation Center.
- Morales, A. (2012). *La gestión adaptativa de agua ante un contexto de variabilidad y cambio climático: un enfoque operativo*. Tijuana, México: El Colegio de la Frontera Norte.
- Morris, B., Lawrence, A., Chilton, P., Adams, B., Calow, R. y Klinck B. (2003). *Groundwater and its Susceptibility to Degradation: A Global Assessment of the Problem and Options for Management*. Nairobi, Kenya: Early Warning and Assessment Report Series, RS. 03-3. United Nations Environment Programme.
- National Ground Water Foundation. (2022). Groundwater Overuse and Depletion. Obtenido de Groundwater Foundation: <https://groundwater.org/threats/overuse-depletion/>

- Natural Resources Conservation Service. (2007). Individual Terrace. Conservation Practice Job Sheet 751. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture (USDA).
- Neumann, I., Barker, J., MacDonald, D. y Gale, I. (2004). *Numerical approaches for approximating technical effectiveness of artificial recharge structures, Commissioned Report*. British Geological Survey.
- Nieto, N. (2011). La gestión del agua: tensiones globales y latinoamericanas. *Política y Cultura*, núm. 36, 155-176.
- NRMMC, EPHC, NHMRC. (2009). *National Water Quality Management Strategy Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Managed Aquifer Recharge*. n.p.: Australian Government, Canberra. Retrieved from <https://recharge.iah.org/files/2016/11/Australian-MAR-Guidelines-2009.pdf>
- Ojeda-Olivares, E., Belmonte-Jiménez, S. y Ladrón de Guevara-Torres, M. (2017). Evaluación de obras de recarga hídrica construidas por comunidades autóctonas en la subcuenca del Valle de Ocotlán, Oaxaca, México. En Ó. Escolero, C. Gutiérrez y E. Mendoza, *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (págs. 103-137). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Organización de las Naciones Unidas. (2022). *Protocolos de Soluciones basadas en la Naturaleza. Restauración de Zonas Críticas*. s/c: CityAdapt / ONU.
- Pacheco-Vega, R. (2017). El megaproyecto de la presa El Zapotillo como nodo centroidal de conflicto intratable. Un análisis desde la ecología política. *Espiral (Guadalajara)* vol.24 no. 69.
- Pacheco-Vega, R. y Hernández, A. (2014). Capítulo 6: Percepciones divergentes de la escasez de agua en León y Guadalajara: un análisis del caso de la presa El Zapotillo. En D. (Tagle), *La crisis multidimensional del agua en la ciudad de León, Guanajuato* (págs. 125-138). León, México: Universidad de Guanajuato-Campus León.
- Page, D., Bekele, E., Vanderzalm, J. y Sidhu, J. (2018). Managed Aquifer Recharge (MAR) in Sustainable Urban Water Management. *Water* 10, 239, 1-16.
- Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions towards adaptative management of water facing climate and global change. *Water Resources Management* 21, 49-62. doi: 10.1007/s11269-006-9040-4
- Pahl-Wostl, C. y Sendzimir, J. (2005). The relationships between IWRM and Adaptative Water Management. Obtenido de N. Project, New Approaches to Adaptative Water Management Under Uncertainty, 1-15: <http://www.newater.uniosnabrueck.de/index.php?pid=1020>

- Pahl-Wostl, C., Jeffrey, P. y Sendzimir, J. (2011). 13. Adaptive and integrated management of water resources. En Q. Grafton y K. Hussey, *Water Resources Planning and Management* (págs. 292-310). Cambridge University Press.
- Peniche, S., García, J. y Martínez, G. (2023). 2. Teogonía del agua en el Occidente de México. La batalla de El Zapotillo. En D. Tagle, A. Caldera, X. Delgado y J. Mora, *El Zapotillo y su viraje en la 4T. Voces y reacciones* (págs. 45-64). León, México: Universidad de Guanajuato.
- Peñuela, L. y Carrillo, J. (2013). Definición de zonas de recarga y 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, P. (1 de abril de 2023). Contempla León 22 obras de bordería para captar agua. Recuperado el 5 de mayo de 2023, de TV4 Noticias Guanajuato: <https://tv4noticias.com/guanajuato/contempla-leon-22-obras-de-borderia-para-captar-agua>
- Pi, N. y Ashoor, A. (2014). *Dry Wells. Uses, Regulations, and Guidelines in California and Elsewhere*. Sacramento, USA: California Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA).
- Pizarro, R., Flores, J., Sangüesa, C., Martínez, E. y García, J. (2004). *Manual de opciones tecnológicas. Diseño de obras para la conservación de agua y suelos*. Chile: Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda.
- Proceso. (28 de octubre de 2003). Nacional. Obtenido de Aprueba Semarnat proyecto de la presa de Arcediano: <https://www.proceso.com.mx/nacional/2003/10/28/aprueba-semarnat-proyecto-de-la-presa-de-arcediano-80109.html>
- Quiroz, C. (2020). *Sobreexplotación y gestión de sistemas acuíferos*. Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería, Secretaría de Investigación y Posgrado.
- Rahman, M., Rusteberg, B., Gogu, R., Ferreira, J. y Sauter, M. (2012). A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. *Journal of Environmental Management* 99, 61-75. doi:10.1016/j.jenvman.2012.01.003
- Ramos, Y., Ortega, V., Martínez, J. y Ramírez, V. (2017). *Estado del arte sobre el agua en la Zona Metropolitana de León*. Ciudad de México, México: Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos (CEMCA).

- Rubio, E., Martínez, M. y Sánchez, B. (2009). *Tinas ciegas*. Montecillos, México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill, p 287.
- Saaty, T. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 48 (1), 9-26.
- Sabokbar, H., Hamze, M., Talebi, S. y Rafiei, Y. (2012). Identification of suitable areas for artificial groundwater recharge using integrated ANP and pair wise comparison methods in GIS environment, (case study: Garbaygan Plain of Fasa). *Geography and Environmental Planning Journal* 22 (4), 41-46.
- Salameh, E., Abdallat, G. y van der Valk, M. (2019). Planning Considerations of Managed Aquifer Recharge (MAR) Projects in Jordan. *Water*, 11, 182, 1-18.
doi:10.3390/w11020182
- Sánchez, G. (2003). *Técnicas Participativas para la Planeación*. México, D.F.: Fundación ICA.
- Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL). (2023). *Informe anual 2023*. León, México: Sapal León.
- Saraf, A. y Choudhury, P. (1998). Integrated remote sensing and GIS for the groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. *International Journal of Remote Sensing* 19 (10), 1825-1841.
- Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural. (2023). *Nota informativa [Q3614 - Programa de Desarrollo Territorial Sustentable] Bordería*. León: Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural. Recuperado el 8 de mayo de 2023
- Secretaría de Marina (SEMAR). (2016). *Metodología de la investigación*. Ciudad de México, México: Universidad Naval.
- Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMAOT). (2023). Subsistema de Información Geográfica, Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial y Urbano (SIGMAOT). Obtenido de Capas: <http://mapas.ecologia.guanajuato.gob.mx/sigmaot/>
- Segovia, F. (11 de junio de 2021). Sobreexplotación de los mantos acuíferos causará desabastecimiento en León. Obtenido de Meganoticias: <https://www.meganoticias.mx/leon/noticia/sobreexplotacion-de-los-mantos-acuiferos-causara-desabastecimiento-en-leon/249752>
- Servicio Geológico Mexicano. (5 de mayo de 2024). GeoInfoMex. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#>

- Silva, M. (28 de julio de 2019). POPLAB. Obtenido de No hay presa, pero sí dispendio: El Zapotillo lleva gastados 35 mil millones y faltaría otro tanto: <https://poplab.mx/v2/story/No-hay-presa-pero-si-dispendio:-El-Zapotillo-lleva-gastados-35-mil-millones-y-faltaria-otro-tanto>
- Silva-Hidalgo, H., González-Núñez, M., Pinales, A. y Villalobos, A. (2017). 7. Proyecto de manejo de recarga de acuíferos en los Ojos del Chuvíscar, Chihuahua, México. En Ó. Escolero, C. Gutiérrez y E. Mendoza, *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (págs. 191-225). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Singh, A., Panda, S., Kumar, K. y Shekmar, C. (2013). Artificial Groundwater Recharge Zones Mapping Using Remote Sensing and GIS: A Case Study in Indian Punjab. *Environmental Management* 52, 61-71. doi:10.1007/s00267-013-0101-1
- Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL). (2019). *Informe de Resultados. Consejo Directivo de SAPAL 2016-2019*. León, México: SAPAL.
- Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL). (12 de diciembre de 2023). Acceso universal al agua. Obtenido de SAPAL: <https://www.sapal.gob.mx/proyecto-prioritario?id=63013>
- Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL). (26 de junio de 2024). Somos SAPAL / Misión. Obtenido de SAPAL: <https://www.sapal.gob.mx/somos-sapal>
- Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmacher, G., Scheibler, F. y Hannappel, S. (2017). Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: historical development, current situations and perspectives. *Hydrogeological Journal* 25, 1909-1922. doi:10.1007/s10040-017-1554-8
- Tagle, D. (2023). Presa El Zapotillo: una discusión de su pertinencia para León, Guanajuato, a una década del conflicto por el agua. *Estudios Demográficos y Urbanos. Vol. 38, núm 1 (112)*, 247-282.
- Tagle, D., Caldera, A. y Rodríguez, J. (2023). 7. Plan B "Agua sí para Guanajuato": Una terquedad gubernamental. En D. Tagle, A. Caldera, X. Delgado y J. Mora, *El Zapotillo y su viraje en la 4T. Voces y reacciones* (págs. 153-178). León, México: Universidad de Guanajuato.
- Tahoe Regional Planning Agency. (2014). *The Tahoe Regional Planning Agency (TRPA) Best Management Practices (BMP) Handbook*. Kingsbury, United States: The Tahoe Regional Planning Agency.

- Technische Universität Dresden. (16 de May de 2018). Innovative Groundwater Solutions (INOWAS). Obtenido de MAR METHODS: <https://www.inowas.com/mar-methods/>
- United Nations. (2003). *The United Nations World Water Development Report: Water for People Water for Life*. UNESCO / Berghahn Books.
- United States Environmental Protection Agency. (2021). *Stormwater Best Management Practice - Check Dams*. Washington, D.C., United States: United States Environmental Protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency. (2021). *Stormwater Best Management Practice - Infiltration Basin*. Washington, D.C., United States: United States Environmental Protection Agency.
- Valdivia, R., Delgadillo, M., Sangerman-Jarquín, D., Hernández, J., Sandoval, F. y Garay, Á. (2022). Valoración económica de la calidad del agua potable en León, Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, volumen 13, número 3*, 527-538.
- Velmerugan, R., Selvamuthukumar, S. y Manavalan, R. (2011). Multi criteria decision making to select the suitable method for the preparation of nanoparticles using an analytical hierarchy process. *Pharmazie* 66, 836-842.
- Vétérinaires Sans Frontières. (2006). *A manual on SubSurface Dams construction based on an experience of Vétérinaires Sans Frontières in Turkana District [Kenya]*. Belgium: Vétérinaires Sans Frontières.
- Weber, A., Fohrer, N. y Möller, D. (2001). Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio-economic factors - effects on landscape structures and functions. *Ecological Modelling*. 140, 125-140.
- Weber, G., Ulloa, S., Fischler, M., Obando, M., Sosa, H. y Rodríguez, R. (2000). *Guía Técnica de Conservación de Suelos y Agua*. San Salvador, El Salvador: Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central (PASOLAC).
- Yuan, J., Van Dyke, M. y Huck, P. (2016). Water reuse through managed aquifer recharge (MAR): assessment of regulations/guidelines and case studies. *Water Quality Research Journal of Canada* 51, 4, 357-376. doi:10.2166/wqrjc.2016.022
- Zacune, J. (2011). *Banco mundial: Catalizador del cambio climático devastador*. Amsterdam, Holanda: Ronnie Hall. Amigos de la Tierra Internacional.
- Zghibi, A., Mirchi, A., Haythem, M., Merzougui, A., Zouhri, L., Taupin, J.-D., . . . Tarhouni, J. (2020). Using Analytical Hierarchy Process and Multi-Influencing Factors to Map

Groundwater Recharge Zones in a Semi-Arid Mediterranean Coastal Aquifer.
Water,12, 1-27. doi:10.3390/w12092525

Zhang, H., Xu, Y. y Kanyere, T. (2020). A review of the managed aquifer recharge: Historical development, current situation and perspectives. *Physics and Chemistry of the Earth* 118-119, 1-13. doi:10.1016/j.pce.2020.102887

Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K. y Dillon, P. (2021). *Managing Aquifer Recharge: A Showcase for Resilience and Sustainability*. Paris, France: UNESCO.

Zimik, H., Angchuk, T., Kumar, A., Ranjan, R., Wanjari, N. y Basnett, S. (2022). GIS-based identification of potential watershed recharge zones using analytic hierarchy process in Sikkim Himalayan region. *Applied Water Science* 12:248, 1-18. doi:10.1007/s13201-022-01758-5