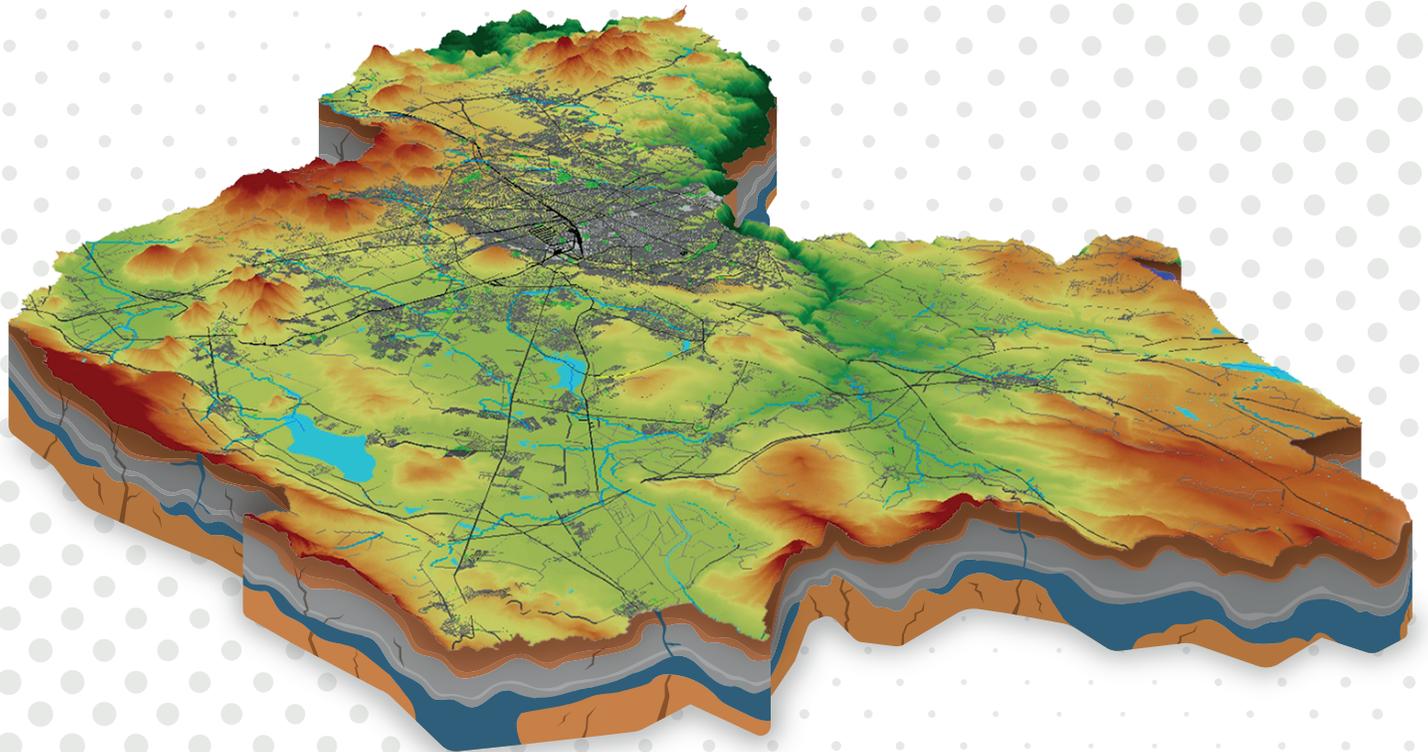


# ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GUADALAJARA

2023





# ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GUADALAJARA

2023





## IMEPLAN

Martha Patricia Martínez Barba  
Directora General

Josué Díaz Vázquez  
Director de Planeación Metropolitana

Patricia Guadalupe Zamora Guzmán  
Gerente Técnica de Gestión Integral del  
Riesgo

Fernando Orozco Murillo  
Gerente Técnico de Ordenamiento  
Territorial y Gestión del Suelo

Cuauhtémoc Aquiles Zúñiga Lázaro  
Líder de Proyectos de Fenómenos  
Naturales

Jennifer Anahí Zambrano Jiménez  
Coordinadora de Ordenamiento  
Sustentable

## ENLACE AMBIENTAL

Ing. Rigoberto Román López  
Director General

Ing. María Montserrat Pocovi Garzón  
Coordinadora General

Ing. Carlos Ignacio López Villanueva  
Ing. Andrea Camarena Covarrubias  
Especialistas ambientales

Lic. Cynthia Corina Tapia Ramírez  
Diseño editorial

Dr. Luis David Rizo Decelis  
Asesor científico - Especialista en  
Hidrología

Geól. Juan Eduardo López Romero  
Especialista senior en Hidrogeología -  
Colaborador

Mtro. Eduardo Parra Ramos  
Especialista en Hidrogeoquímica -  
Colaborador

Ing. Álvaro Monroy Morales  
Especialista Junior en Hidrología -  
Colaborador

**Guadalajara, Jalisco, México.  
Agosto, 2023**

**Elaboración del Estudio de Hidrología Subterránea en el Área  
Metropolitana de Guadalajara**





## Resumen

Los recursos hídricos subterráneos representan la principal fuente de agua dulce para el abastecimiento de la población mundial. A pesar de su vital importancia, a nivel global, estos recursos se enfrentan a desafíos de sobreexplotación, contaminación y degradación. Estos problemas son el resultado directo de actividades humanas como la agricultura, ganadería, minería, actividades industriales, generación de energía y una planificación urbana inadecuada. La falta generalizada de conocimiento acerca de estas fuentes de agua exacerba aún más esta situación.

La gestión integral del agua subterránea requiere cierta comprensión de las características y funcionamiento de los sistemas acuíferos, así como la implementación de estrategias para su monitoreo y protección. En Hidrología, un acuífero es una formación geológica que permite el almacenamiento y transmisión de agua a una tasa aprovechable. No obstante, en México, todo el territorio se considera un “acuífero”, con diferentes atribuciones administrativas; solo se autorizan concesiones en áreas definidas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). No se otorgan permisos de extracción en zonas consideradas de veda, reserva o déficit. Este enfoque administrativo afecta la evaluación de disponibilidad de los recursos hídricos, lo que plantea preocupaciones. Actualmente, la gestión se basa en límites administrativos, no hidrogeológicos.

En el estado de Jalisco existen programas que enfatizan el desarrollo sustentable, dado que establecen metas y estrategias para el manejo integrado del agua, en cuencas y acuíferos. El Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN) lidera proyectos clave para el desarrollo urbano y ha implementado instrumentos como el Plan de Ordenamiento Metropolitano (POTmet), con objeto de guiar la sustentabilidad en la región, así como estudios para la caracterización de los acuíferos urbanos, basados en información científica. En el contexto del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), gran parte de la población depende directamente del abastecimiento del agua subterránea, y se evidencian deficiencias en la gestión de dicho recurso. El crecimiento demográfico y económico ha incrementado la demanda de agua, lo que a su vez ha contribuido al aumento de la escasez de este recurso, planteando un futuro preocupante. Particularmente, la falta de control sobre la extracción, desconocimiento de sus límites físicos y la fluctuación de los niveles piezométricos se presentan como desafíos importantes. En este sentido, la ejecución de un sistema de monitoreo se vuelve imperativa para mantener la información actualizada y facilitar la toma de decisiones fundamentadas, asegurando así una gestión y protección adecuada de las fuentes de abastecimiento público urbano.

Durante la elaboración del presente estudio, se llevaron a cabo cuatro etapas principales para lograr los objetivos trazados: (1) definir los sistemas acuíferos mediante criterios hidrogeológicos, (2) identificar áreas vulnerables a la contaminación, (3) localizar zonas de recarga y (4) proponer un sistema de monitoreo de aguas subterráneas. En la primera etapa, se delimitaron los sistemas acuíferos en el AMG, de acuerdo con criterios hidrológicos. Esta tarea se realizó por medio del procesamiento de información relevante, como trabajos científicos y académicos, reportes oficiales, documentos técnicos relacionados con el medio físico y antrópico (*e.g.*, climatología, usos del suelo, edafología, relieve, geología, calidad del agua, etc.), bibliografía técnica y, sobre todo, cartografía especializada proveniente de estos estudios previos. Las etapas 2 y 3 se llevaron a cabo de manera paralela. En la segunda etapa se realizó una minuciosa evaluación de la vulnerabilidad de los



acuíferos a la contaminación, mediante metodologías ampliamente probadas y utilizadas en todo el mundo, centrándose en los factores intrínsecos de los sistemas hidrogeológicos. Al mismo tiempo, en la tercera etapa, se procedió a la delimitación de las zonas de mayor capacidad de recarga de aguas subterráneas. Estas dos etapas requirieron un análisis exhaustivo de los aspectos geográficos del entorno en el área conurbada. Por último, la cuarta etapa estuvo dedicada al diseño y propuesta de un sistema de monitoreo hidrogeológico. Este sistema se concibió como una herramienta esencial para el seguimiento constante de los niveles piezométricos y la evolución química del agua subterránea en la región. A lo largo de las cuatro etapas se realizaron trabajos *in situ*, con objeto de corroborar, en campo, los resultados que se iban obteniendo y validar la información cartográfica recopilada. Se midieron profundidades de los niveles piezométricos en numerosos pozos de abastecimiento y distintas propiedades químicas, además se recolectaron muestras de agua subterránea, que fueron enviadas a un laboratorio certificado. Esto se hizo siguiendo los lineamientos normativos vigentes, nacionales e internacionales, tanto en métodos de adquisición de datos, como en la preservación de muestras y posterior análisis hidrogeoquímico.

Como parte de los productos entregables se delimitaron seis sistemas hidrogeológicos: (1) Atemajac, (2) Toluquilla, (3) Los Altos, (4) San Isidro, (5) Cajititlán e (6) Ixtlahuacán de los Membrillos. Estas demarcaciones cuentan con fundamentos geológicos y características de permeabilidad de las formaciones rocosas presentes en cada sistema. Asimismo, la cartografía de vulnerabilidad del agua subterránea permitió la identificación y diferenciación de áreas más susceptibles a la contaminación, dentro de los sistemas hidrogeológicos delimitados. Esto último pretende servir de base para la implementación de planes de protección de las fuentes de abastecimiento, de forma compatible con el desarrollo metropolitano. Se observó que en las zonas urbanas pavimentadas se reduce la vulnerabilidad por su menor capacidad de infiltración, pero pueden presentarse episodios de contaminación que afecten el sistema de abastecimiento. El análisis de la cartografía de vulnerabilidad a la contaminación elaborada permitió identificar aquellas áreas prioritarias para la protección y conservación de las reservas de agua subterránea para la ciudad. Se identificaron siete zonas principales de recarga dentro del AMG, que incluyen Áreas Naturales Protegidas, parques urbanos y zonas con vegetación intraurbana. Además, se observó que las zonas con alta capacidad de recarga mantienen una correlación directa con las áreas más vulnerables a la contaminación.

Se plantearon distintos escenarios en la propuesta de un sistema de monitoreo de los sistemas hidrogeológicos. Por una parte, se presentaron las “condiciones ideales”, basadas en las mejores prácticas internacionales. Y, por otro lado, se mostró un segundo planteamiento más adecuado al contexto actual del AMG, que considera las condiciones actuales de gestión y los recursos disponibles para estos propósitos. De forma deseable, se sugiere un sistema de monitoreo hidrogeológico con una red de 96 piezómetros, distribuidos a razón de un pozo por cada 20/25 km<sup>2</sup>, dispuestos a lo largo de los seis sistemas hidrogeológicos definidos.

Finalmente, se pretende que los hallazgos de este estudio sirvan como un primer paso para la creación e implementación de políticas e instrumentos de planeación urbana más sustentable (*i.e.* POTmet), que considere el marco hidrogeológico presente, con miras a mejorar el conocimiento los recursos hídricos subterráneos, y así fortalecer las estrategias de protección y conservación de las fuentes de abastecimiento de agua para el desarrollo sustentable de las actividades metropolitanas.



## Abstract

Groundwater resources represent the main source of freshwater for supplying the world's population. Despite their vital importance, globally, these resources face challenges of overexploitation, pollution, and degradation. These problems are the direct result of human activities such as agriculture, livestock, mining, industrial activities, energy generation and inadequate urban planning. The widespread lack of knowledge about these water sources further exacerbates this situation.

Comprehensive groundwater management requires understanding of the characteristics and functioning of aquifer systems, as well as the implementation of strategies for their monitoring and protection. In terms of hydrology, an aquifer is a geological formation that allows the storage and transmission of water at a usable rate. However, in Mexico, the entire territory is considered an "aquifer", with different administrative attributions; concessions are only authorized in areas defined by the Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, translated as 'National Water Commission'). Extraction permits are not granted in areas considered closed, reserve or deficit zones. This administrative approach affects the assessment of water resource availability, which raises concerns. Currently, water management is based on administrative, not hydrogeological, boundaries.

In the state of Jalisco there are programs that highlight sustainable development, as they establish goals and strategies for comprehensive water management in watersheds and aquifers. The Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN, translated as 'Institute for Planning and Development Management of the Guadalajara Metropolitan Area') leads key projects for urban development and has implemented instruments such as the Metropolitan Management Plan (POTmet) to guide sustainability in the region, as well as studies for the characterization of urban aquifers, based on scientific information. In the context of the Guadalajara Metropolitan Area (AMG), a large part of the population depends directly on groundwater supply, and there is evidence of deficiencies in the management of this resource. Demographic and economic growth has increased the water demand, which in turn has contributed to an increase in the scarcity of this resource, raising concerns for the future. Particularly, the lack of control over extraction, lack of knowledge of its physical limits and the fluctuation of piezometric levels are major challenges. In this regard, the implementation of a monitoring system becomes imperative to keep the information updated and facilitate informed decision making, thus ensuring adequate management and protection of urban public supply sources.

During the preparation of this study, four main stages were conducted to achieve the established objectives: (1) define the aquifer systems using hydrogeological criteria, (2) identify vulnerable areas to contamination, (3) locate recharge zones, and (4) propose a groundwater monitoring system. In the first stage, the aquifer systems in the AMG were delimited in accordance with hydrological criteria. This task was performed by processing relevant information, such as scientific and academic papers, official reports, technical documents related to the physical and anthropic context (*e.g.*, climatology, land use, edaphology, terrain, geology, water quality, etc.), technical bibliography and, most importantly, specialized cartography from these previous studies. Stages 2 and 3 were conducted in parallel. In the second stage, a thorough assessment of the aquifers' vulnerability to contamination was conducted, using methodologies widely evaluated and used worldwide, focusing



on the intrinsic factors of the hydrogeological systems. At the same time, in the third stage, the delimitation of the areas of greatest groundwater recharge capacity was made. These two stages required an exhaustive analysis of the geographical aspects of the environment in the conurbation area. Lastly, the fourth stage was dedicated to the design and proposal of a hydrogeological monitoring system. This system was conceived as an essential tool for the constant monitoring of piezometric levels and the chemical evolution of groundwater in the region. Throughout the four stages, *in situ* work was performed to corroborate, on site, the obtained results and to confirm the collected cartographic information. The depths of the piezometric levels in numerous supply wells and different chemical properties were measured, and groundwater samples were collected and sent to a certified laboratory. This was done following current national and international regulatory guidelines, both in data acquisition methods, as well as in the preservation of samples and their subsequent hydrogeochemical analysis.

As part of the deliverable products, six hydrogeological systems were delimited: (1) Atemajac, (2) Toluquilla, (3) Los Altos, (4) San Isidro, (5) Cajitlán and (6) Ixtlahuacán de los Membrillos. These demarcations have geological foundations and permeability characteristics of the rock formations present in each system. Furthermore, the mapping of groundwater vulnerability allowed the identification and differentiation of areas more susceptible to contamination, within the delimited hydrogeological systems. The latter is intended to serve as a basis for the implementation of plans aimed at protecting the supply sources, in a compatible manner with metropolitan development. It was observed that vulnerability is reduced in paved urban areas due to their lower infiltration capacity, although pollution episodes may occur that affect the supply system. The analysis of the pollution vulnerability mapping made it possible to identify priority areas for the protection and conservation of the city's groundwater reserves. Seven main recharge zones were identified within the AMG, including Natural Protected Areas, urban parks, and zones with intra-urban vegetation. In addition, it was noted that the zones with high recharge capacity maintain a direct correlation with the most vulnerable areas to groundwater pollution.

Different scenarios were presented in the proposal of a monitoring system for hydrogeological systems. On the one hand, the "Ideal conditions" were presented, based on the best international practices. On the other hand, a second approach, more appropriate to the current context of the AMG, was presented, which considers the present management conditions and the available resources for these purposes. Ideally, a hydrogeological monitoring system is suggested with a network of ninety-six piezometers, distributed at a rate of one monitoring well per 20/25 km<sup>2</sup>, arranged along the six hydrogeological systems defined.

Finally, it is intended that the findings of this study serve as a first step for the creation and implementation of more sustainable urban planning policies and instruments (*i.e.*, POTmet) that consider the present hydrogeological framework, with the aim of improving knowledge of groundwater resources, and thus strengthening strategies for the protection and conservation of water supply sources to ensure the sustainable development of metropolitan activities.



# Índice

–

1.	Introducción .....	17
2.	Objetivos .....	20
3.	Antecedentes .....	20
4.	Metodología .....	23
4.1.	Trabajo de gabinete .....	24
4.1.1.	Revisión de fuentes de información .....	24
4.1.2.	Recopilación de información espacial .....	25
4.1.3.	Estandarización y preparación de datos por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	26
4.1.3.1.	Censo de aprovechamientos de agua subterránea .....	28
4.1.3.2.	Topografía .....	31
4.1.3.3.	Geología .....	32
4.1.3.4.	Edafología .....	33
4.1.3.5.	Datos meteorológicos .....	33
4.1.3.6.	Usos del suelo .....	40
4.1.3.7.	Hidrogeoquímica .....	40
4.1.3.8.	Hidrología superficial .....	41
4.1.3.9.	Hidrogeología .....	41
4.1.3.10.	Piezometría .....	41
4.1.4.	Área de estudio .....	47
4.2.	Trabajo de campo .....	49
4.2.1.	Acompañamiento municipal .....	49
4.2.2.	Selección de puntos de muestreo .....	50
4.2.3.	Campañas de muestreo.....	50
4.3.	Trabajo de laboratorio .....	52
4.4.	Delimitación de sistemas hidrogeológicos .....	52
4.5.	Elaboración de cartografía de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea .	58
4.5.1.	Método GOD .....	58
4.5.2.	Método DRASTIC .....	63
4.5.3.	Delimitación de zonas de recarga.....	66
4.6.	Análisis hidrogeoquímico .....	69



4.7.	Sistemas de control hidrogeológicos.....	69
4.7.1.	Antecedentes.....	69
4.7.2.	Metodología .....	73
5.	Sistemas hidrogeológicos .....	78
6.	Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca acuífera a la contaminación .....	80
6.1.	Método GOD .....	80
6.2.	Método DRASTIC .....	92
7.	Determinación espacial de recarga neta relativa .....	106
8.	Caracterización hidrogeoquímica de los sistemas hidrogeológicos delimitados .....	116
9.	Propuesta de sistema de control hidrogeológico .....	126
9.1.	Propuesta ideal.....	127
9.1.1.	Generación de piezómetros .....	129
9.2.	Propuesta factible.....	129
9.3.	Equipo de monitoreo.....	138
9.4.	Estimación económica de la implementación.....	140
9.4.1.	Sistema de monitoreo manual .....	140
9.4.2.	Sistema de monitoreo automatizado .....	141
10.	Conclusiones.....	142
11.	Recomendaciones y trabajo futuro .....	143
11.1.	Consideraciones generales.....	143
11.2.	Consideraciones al implementar el sistema de monitoreo propuesto .....	145
	<b>ACRÓNIMOS Y SIGLAS .....</b>	<b>146</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>147</b>
	<b>ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO .....</b>	<b>156</b>
	<b>ANEXO 2. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA .....</b>	<b>196</b>
	<b>ANEXO 3. TRABAJO DE CAMPO .....</b>	<b>201</b>
	<b>ANEXO 4. FICHAS TÉCNICAS DE POZOS .....</b>	<b>213</b>
	<b>ANEXO 5. RESULTADOS DEL MUESTREO .....</b>	<b>285</b>
	<b>ANEXO 6. RESULTADOS DE LABORATORIO .....</b>	<b>292</b>
	<b>ANEXO 7. SELECCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL .....</b>	<b>304</b>
	<b>ANEXO 8. EQUIPO PARA MONITOREO DE PARÁMETROS .....</b>	<b>307</b>



## Índice de figuras

Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Fuente: (Naciones Unidas, 2015) .....	20
Figura 2. Línea del tiempo del proyecto, por etapas de entrega.....	23
Figura 3. Metodología del Proyecto .....	24
Figura 4. Modelo de Geo-Información. Fuente: (ArcGIS, 2023).....	25
Figura 5. Sistema de coordenadas de las bases de datos y sistema seleccionado. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	27
Figura 6. Preparación de datos espaciales .....	28
Figura 7. Recopilación de pozos de distintas fuentes de información. ....	30
Figura 8. Pozos seleccionados con información relevante de piezometría. ....	31
Figura 9. Información geográfica utilizada para la creación de la capa geológica con información relevante.....	33
Figura 10. Mapa de las 24 de 49 estaciones meteorológicas consideradas y descartadas del AMG. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	35
Figura 11. ModelBuilder generado para identificar la mejor interpolación con la variable precipitación. Fuente: elaboración propia, Enlace Ambiental y Proyectos S.C. ....	37
Figura 12. Model Builder Validación cruzada. Fuente: elaboración propia, Enlace Ambiental y Proyectos S.C. ....	38
Figura 13. Mapa de isopiezas, hecho a mano, a partir de los datos proporcionados por SIAPA (El Chicalote). ....	42
Figura 14. Mapa de isopiezas, hecho a mano, a partir de los datos obtenidos de CONAGUA (AMG, 1996-2004). ....	43
Figura 15. Modelaciones piezométricas de los seis sistemas hidrogeológicos. ....	45
Figura 16. Isopiezas suavizadas para los seis sistemas hidrogeológicos del AMG. ....	46
Figura 17. Isopiezas con flechas ortogonales que indican el sentido del flujo para los seis sistemas hidrogeológicos del AMG. Fuente: elaborado por Enlace Ambiental y Proyectos.....	47
Figura 18. Mapa de la delimitación del área de estudio. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C. .....	48
Figura 19. Diagrama del proceso del trabajo de campo. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C. .....	50
Figura 20. Pozos muestreados por sistema hidrogeológico. Elaboración propia: Enlace Ambiental y Proyectos S.C. ....	51
Figura 21. Esquema del proceso metodológico propuesto para la delimitación de los sistemas acuíferos. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos S.C. ....	54
Figura 22. Delimitación preliminar hecha a mano. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.....	56
Figura 23. Modelación piezométrica del sistema Cajititlán. ....	57
Figura 24. Método GOD. Fuente: elaboración propia Enlace Ambiental y Proyectos S.C.....	58
Figura 25. Proceso en SIG de GOD. Fuente: (Aguero-Valverde, 2000) .....	59
Figura 26. Diagrama con la asignación de valores a las tres variables consideradas por el método GOD (modificado de (Foster et al., 2002; Rizo-Decelis, 2017). ....	60
Figura 27. Mapa del grado de confinamiento del acuífero, reclasificado en el Factor G para la metodología GOD. Elaboración de la carta de aguas subterráneas del INEGI (1980, escala 1:250:000). ....	61

Figura 28. Mapa de la litología en la zona no saturada, reclasificado en el Factor O para la metodología GOD. Elaboración propia a partir de la carta geológica del INEGI, digitalizada por IIEG (2016, escala 1:50:000). .....	62
Figura 29. Método DRASTIC. Fuente: elaboración propia Enlace Ambiental y Proyectos S.C. ....	63
Figura 30. Proceso en SIG de DRASTIC. Fuente: (Aguero-Valverde, 2000).....	64
Figura 31. Proceso de Model Builder para el cálculo del factor Fsp de la metodología de Piscopo (2001). Elaboración propia. ....	68
Figura 32. Diagrama de flujo de la metodología para diseño de un sistema de monitoreo. ....	74
Figura 33. Lineamientos para la selección de puntos del sistema de control hidrogeológico .....	75
Figura 34. Cuadrícula diseñada para selección de puntos de muestreo. ....	76
Figura 35. Área de estudio, delimitación de los sistemas hidrogeológicos. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C. ....	78
Figura 36. Mapa de la vulnerabilidad del agua subterránea por el método GOD en los sistemas hidrogeológicos delimitados. Elaboración propia mediante la metodología de Foster y Hirata (1988). ....	80
Figura 37. Proporciones de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, según el método GOD, dentro de los sistemas hidrogeológicos delimitados para el estudio. Elaboración propia a partir de los resultados de la aplicación del método GOD (Foster y Hirata, 1988). ....	81
Figura 38. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el AMG. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988). ....	82
Figura 39. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico Atemajac. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988). ....	83
Figura 40. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico Toluquilla. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988). ....	84
Figura 41. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico Los Altos. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988). ....	85
Figura 42. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico San Isidro. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988). ....	86
Figura 43. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico Cajititlán. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988). ....	87
Figura 44. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico Ixtlahuacán de los Membrillos. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988). ....	88
Figura 45. Mapa de la vulnerabilidad GOD con la ubicación de plantas de tratamiento y plantas potabilizadoras. Elaboración propia mediante la información de plantas de tratamiento, plantas potabilizadoras y la metodología de GOD (Foster y Hirata, 1988). ....	89



Figura 46. Mapa de la vulnerabilidad GOD con la infraestructura de manejo de residuos sólidos urbanos. Elaboración propia mediante información de rellenos sanitarios, infraestructura de residuos sólidos urbanos y la metodología de GOD (Foster y Hirata, 1988).....	90
Figura 47. Mapa de la vulnerabilidad GOD con la densidad de gasolineras. Elaboración propia mediante información de gasolineras PEMEX y la metodología de GOD (Foster y Hirata, 1988).....	92
48. Mapa de la vulnerabilidad del agua subterránea por el método DRASTIC en los sistemas hidrogeológicos delimitados. Elaboración propia mediante la metodología de DRASTIC.....	93
Figura 49. Proporciones de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, según el método DRASTIC, dentro de los sistemas hidrogeológicos delimitados para el estudio. Elaboración propia a partir de los resultados de la aplicación del método DRASTIC (Aller et al., 1987).....	94
Figura 50. Mapa de la vulnerabilidad del agua subterránea por el método DRASTIC en los sistemas hidrogeológicos delimitados. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987).....	95
Figura 51. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico Atemajac. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987). .....	96
Figura 52. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico Ixtlahuacán de los Membrillos. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987). .....	97
Figura 53. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico Cajititlán. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987). .....	98
Figura 54. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico Los Altos. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987). .....	99
Figura 55. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico San Isidro. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987). .....	100
Figura 56. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico Toluquilla. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987). .....	101
Figura 57. Mapa de la vulnerabilidad DRASTIC con la densidad de gasolineras. Elaboración propia mediante información de gasolineras PEMEX y la metodología de DRASTIC (Aller et al., 1987). ..	102
Figura 58. Mapa de la vulnerabilidad DRASTIC con la ubicación de plantas de tratamiento y plantas potabilizadoras. Elaboración propia mediante la información de plantas de tratamiento, plantas potabilizadoras y la metodología de DRASTIC (Aller et al., 1987).....	103
Figura 59. Mapa de la vulnerabilidad DRASTIC con la ubicación de plantas de tratamiento y plantas potabilizadoras. Elaboración propia mediante la información de plantas de tratamiento, plantas potabilizadoras y la metodología de DRASTIC (Aller et al., 1987).....	104
Figura 60. Mapa de la vulnerabilidad del agua subterránea, por el método GOD, en los sistemas hidrogeológicos delimitados. Elaboración propia mediante la metodología de GOD .....	105
Figura 61. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001).....	107

Figura 62. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea con zonas de importancia. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001). .....	108
Figura 63. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea Alta y Muy alta con zonas de importancia. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001). .....	109
Figura 64. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en la Zona “El Bajío”. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001). .....	110
Figura 65. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en las Zonas “Parque Colomos” y “El área de la Cuenca del Chicalote”. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001). .....	111
Figura 66. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en las Zonas “Parque Tucson”. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001). .....	112
Figura 67. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en las Zonas “Zona Tesistán”. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001). .....	113
Figura 68. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en las Zonas “Zona de El Salto- El Ahogado - Juanacatlán”. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001). .....	114
Figura 69. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en las Zonas “Zona de El Salto - El Ahogado - Juanacatlán”. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001). .....	115
Figura 70. Plano de ubicación con diagramas de Stiff para estudio de pozos del SIAPA en las cuencas Atemajac y Toluquilla (2003). Fuente: (GEOEX-SIAPA, 2003). .....	118
Figura 71. Diagrama de Piper con información hidrogeoquímica de pozos del SIAPA en los acuíferos Atemajac y Toluquilla (2003). Fuente: (GEOEX-SIAPA, 2003). .....	119
Figura 72. Grupos de agua identificados para el acuífero superior de los valles de Atemajac y Toluquilla (2001). Fuente: (Sánchez Díaz, 2007) .....	120
Figura 73. Diagrama de Piper con información hidrogeoquímica de pozos en los acuíferos Atemajac y Toluquilla (2011). Fuente: (Hernández-Antonio et al., 2015) .....	121
Figura 74. Distribución espacial de trazadores para relacionar grupos de agua y edades en el área de estudio. Fuente: (Hernández-Antonio et al., 2015). .....	122
Figura 75. Diagrama de Piper con información hidrogeoquímica analizada. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	124
Figura 76. Diagrama de Piper agrupados por sistemas hidrogeológicos utilizando resultados de muestreos y series de datos de estudios previos. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	125
Figura 77. Diagrama de flujo para el sistema de control hidrogeológico del AMG. Elaboración por Enlace Ambiental y Proyectos S.C. ....	127
Figura 78. Propuesta ideal del sistema de control hidrogeológico. ....	128
Figura 79. Ejemplo de lineamientos para la selección de puntos del sistema de control hidrogeológico. ....	130
Figura 80. Densidad de puntos de control del AMG. ....	131
Figura 81. Propuesta factible del sistema de control hidrogeológico. ....	132
Figura 82. Pozos seleccionados para el control del S.H. Atemajac. ....	133
Figura 83. Pozos seleccionados para el control del S.H. Toluquilla. ....	134
Figura 84. Pozos seleccionados para el control del S.H. Los Altos. ....	135



Figura 85. Pozos seleccionados para el control del S.H. San Isidro. ....	136
Figura 86. Pozos seleccionados para el control del S.H. Cajititlán.....	137
Figura 87. Pozos seleccionados para el control del S.H. Ixtlahuacán de los Membrillos. ....	138
Figura 88. Mapa de tipos de clima en el AMG, de acuerdo con modificación a la clasificación de Köppen adaptada para México (García, 1998). Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	157
Figura 89. Precipitación media mensual en el AMG a partir de promedios anuales de las 24 estaciones meteorológicas consideradas para el AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	158
Figura 90. Mapa de isoyetas generadas a partir de promedios anuales de las 24 estaciones meteorológicas consideradas para el AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	159
Figura 91. Gradiente pluviométrico del AMG con datos de precipitación media anual de las 24 estaciones consideradas en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.....	160
Figura 92. Temperatura media mensual en el AMG a partir de promedios anuales de las 24 estaciones meteorológicas consideradas para el AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	160
Figura 93. Mapa de isotermas generadas a partir de valores promedio anuales de las 24 estaciones meteorológicas consideradas para el AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	161
Figura 94. Valores de temperatura anual con respecto a la altitud del AMG, según las 24 estaciones consideradas desde 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.	162
Figura 95. Evaporación media mensual en el AMG a partir de promedios anuales de las 20 estaciones meteorológicas consideradas para el AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	163
Figura 96. Mapa de isolíneas de evaporación generadas a partir de promedios anuales de las 20 estaciones meteorológicas consideradas para la evaporación del AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	164
Figura 97. Valores de evaporación anual con respecto a la altitud del AMG, según las 24 estaciones consideradas desde 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.	164
Figura 98. Años tipo según el análisis de la estación pluviométrica del AMG a partir de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	166
Figura 99. Comportamiento histórico de la precipitación en el AMG según las 24 estaciones de monitoreo en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.....	167
Figura 100. Mapa de isoyetas generadas a partir de promedios anuales de estaciones consideradas para el año húmedo (1992) en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.....	168
Figura 101. Mapa de isoyetas generadas a partir de promedios anuales de estaciones consideradas para el año medio (2006) en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.....	169

Figura 102. Mapa de isoyetas generadas a partir de promedios anuales de estaciones consideradas para el año seco (2011) en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	170
Figura 103. Climograma del AMG, elaborado a partir de datos mensuales de temperatura y precipitación, en las 24 estaciones consideradas a partir de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	171
Figura 104. Climograma complementario del AMG, elaborado a partir de datos mensuales de temperatura, precipitación y evaporación, en las estaciones consideradas a partir de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C. ....	171
Figura 105. Mapa de las provincias y subprovincias fisiográficas del AMG .....	172
Figura 106. Mapa hipsométrico en el AMG. Fuente: Elaboración propia a partir de curvas de nivel cada 10 m de INEGI. ....	173
Figura 107. Mapa de pendientes del AMG. Fuente: Elaboración propia a partir de curvas de nivel cada 10 m de INEGI. ....	174
Figura 108. Geología de la cuenca del AMG. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C, a partir de información de IIEG (2016). ....	175
<i>Figura 109. Fallas, fracturas y vulcanismos. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C, a partir de IIEG (2016).</i> .....	176
Figura 110. Estratigrafía del AMG. Fuente: (Morán-Ramírez, et al., 2016). ....	177
Figura 111. Estratigrafía del AMG. Fuente: (Rizo-Decelis, 2017).....	178
<i>Figura 112. Hidrogeología del AMG. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.</i> .....	179
Figura 113. Mapa con valores de permeabilidad. ....	180
Figura 114. Edafología (tipo y textura del suelo) en el AMG. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.....	185
Figura 115. Uso de suelo y vegetación en el área de estudio (IMEPLAN, 2023). ....	186
Figura 116. Distribución de cuerpos de agua y escurrimientos localizados en el AMG. Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA. ....	187
Figura 117. División administrativa de los acuíferos en el AMG. Fuente: elaboración propia con información de las delimitaciones administrativas de CONAGUA. ....	188
Figura 118. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema Atemajac.....	190
Figura 119. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema Toluquilla. ....	191
Figura 120. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema Los Altos. ....	192
Figura 121. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema Cajititlán. ....	193
Figura 122. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema Ixtlahuacán de los Membrillos. ....	194
Figura 123. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema San Isidro. ....	195
Figura 124. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. Atemajac. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.....	197
Figura 125. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. Toluquilla. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.....	198
Figura 126. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. Los Altos. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.....	198



Figura 127. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. Cajititlán. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.....	199
Figura 128. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. Ixtlahuacán de los Membrillos. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.....	200
Figura 129. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. San Isidro. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.....	200
Figura 130. Visita de campo a municipios. Fuente: propia, Enlace Ambiental y Proyectos S.C. ....	201
Figura 131. Imágenes del muestreo del pozo Aguilillas, en Ixtlahuacán de los Membrillos. ....	203
Figura 132. Imágenes del muestreo del pozo Buenavista (glorieta), en Ixtlahuacán de los Membrillos. ....	203
Figura 133. Imágenes del muestreo del pozo Santa Rosa 3, en Ixtlahuacán de los Membrillos. ....	203
Figura 134. Imágenes del muestreo del pozo Villas Europa del oeste, Juanacatlán. ....	204
Figura 135. Imágenes del muestreo del pozo No.9, en El Salto. ....	204
Figura 136. Imágenes del muestreo del pozo CIMEJ, El Salto. ....	204
Figura 137. Imágenes del río Calderón, en Zapotlanejo.....	205
Figura 138. Imágenes del muestreo del pozo San Roque, en Zapotlanejo .....	205
Figura 139. Imágenes del muestreo del pozo Madrigales, en Zapotlanejo.....	205
Figura 140. Imágenes del muestreo del pozo Manantial Agua caliente (virgen), en Zapotlanejo ..	205
Figura 141. Imágenes del muestreo del pozo Manantial Agua caliente (techado), en Zapotlanejo	206
Figura 142. Imágenes del muestreo del pozo San Miguel Cuyutlán, en Tlajomulco de Zúñiga .....	206
Figura 143. Imágenes del muestreo del pozo 2 Cuexcomatlán, en Tlajomulco de Zúñiga .....	206
Figura 144. Imágenes del muestreo del pozo Cimas del Sol, en Tlajomulco de Zúñiga .....	207
Figura 145. Imágenes del muestreo del pozo Santa Cruz, en Tlajomulco de Zúñiga .....	207
Figura 146. Imágenes del muestreo del pozo Campestre Santa Cruz, en Tlajomulco de Zúñiga ....	207
Figura 147. Imágenes del muestreo del pozo Hacienda del Sur, en Tlajomulco de Zúñiga.....	208
Figura 148. Imágenes del muestreo del pozo 15 Juan de la Barrera, en San Pedro Tlaquepaque..	208
Figura 149. Imágenes del muestreo del pozo 20 Los Olivos, en San Pedro Tlaquepaque .....	208
Figura 150. Imágenes del muestreo del pozo 18 Hacienda la Candelaria, en San Pedro Tlaquepaque .....	209
Figura 151. Imágenes del muestreo del pozo El Primavera, en Zapopan.....	209
Figura 152. Imágenes del muestreo del pozo La Soledad de Nextipac, en Zapopan .....	209
Figura 153. Imágenes del muestreo del pozo La Teja, en Zapopan.....	210
Figura 154. Imágenes del muestreo del pozo La Hortaliza - SIAPA, en Tonalá .....	210
Figura 155. Imágenes del muestreo del pozo Educadores Jaliscienses - SIAPA, en Tonalá .....	210
Figura 156. Imágenes del muestreo del pozo Agua Azul 2 - SIAPA, en Guadalajara .....	211
Figura 157. Imágenes del muestreo del pozo Code - SIAPA, en Guadalajara.....	211
Figura 158. Imágenes del muestreo del pozo Górgoros - SIAPA, en Guadalajara .....	211
Figura 159. Imágenes del muestreo del pozo Tesistán - SIAPA, en Guadalajara .....	212
Figura 160. Imágenes del muestreo del pozo Lechera - SIAPA, en Zapopan.....	212
Figura 161. Resultado del muestreo de pozos: nivel dinámico .....	285
Figura 162. Resultado del muestreo de pozos: temperatura .....	286
Figura 163. Resultado del muestreo de pozos: pH.....	287
Figura 164. Resultado del muestreo de pozos: conductividad eléctrica .....	288
Figura 165. Resultado del muestreo de pozos: arsénico .....	289

Figura 166. Resultados de las muestras de laboratorio: pH.....	292
Figura 167. Resultados de las muestras de laboratorio: conductividad eléctrica.....	293
Figura 168. Resultados de las muestras de laboratorio: dureza.....	294
Figura 169. Resultados de las muestras de laboratorio: ion calcio.....	295
Figura 170. Resultados de las muestras de laboratorio: ion magnesio.....	296
Figura 171. Resultados de las muestras de laboratorio: ion sodio.....	297
Figura 172. Resultados de las muestras de laboratorio: ion potasio.....	298
Figura 173. Resultados de las muestras de laboratorio: bicarbonato.....	299
Figura 174. Resultados de las muestras de laboratorio: carbonato.....	300
Figura 175. Resultados de las muestras de laboratorio: ion nitrato.....	301
Figura 176. Resultados de las muestras de laboratorio: ion cloro.....	302
Figura 177. Resultados de las muestras de laboratorio: ion sulfato.....	303

## Índice de tablas

Tabla 1. Estaciones seleccionadas.....	34
Tabla 2. Estaciones que cumplen con el histórico mínimo 20 años para el periodo de estudio.....	35
Tabla 3 Porcentaje de datos mensuales en 30 años, en las 24 estaciones.....	36
Tabla 4. Error según método de interpolación.....	38
Tabla 5. Error con el método de Interpolación por polinomios locales.....	39
Tabla 6. Bibliografía consultada para la elaboración de una metodología propia. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.....	52
Tabla 7. Asignación de valores a las tres variables del método GOD para la cartografía de vulnerabilidad (elaborado a partir de información de Foster y Hirata, 1988). .....	59
Tabla 8. Asignación de valores a la capa de litología para la obtención del Factor O. Elaborado a partir de la reclasificación propuesta por Foster y Hirata (1988) y la capa de litología. ....	62
Tabla 9. Valores DRASTIC y clasificación de nivel de vulnerabilidad del agua subterránea a la conminación. (Aller et al., 1987). .....	65
Tabla 10. Clasificación de valores y ponderación de las variables del método DRASTIC (con información de Aller et al. -1987-). .....	65
Tabla 11. Asignación de valores para la determinación de la recarga neta. Elaboración propia, a partir de la metodología propuesta por Piscopo (2001). .....	66
Tabla 12. Equivalencias de la recarga para el método DRASTIC según el factor Rr. Elaboración a partir de las metodologías de Aller et al., (1987) y Piscopo (2001). .....	67
Tabla 13. Redes de monitoreo a nivel mundial. Fuente: varias.....	71
Tabla 14. Número de puntos recomendados por análisis de representatividad.....	128
Tabla 15. Número de pozos factibles para el análisis de representatividad.....	132
Tabla 16. Registradores automáticos, instrumentos y accesorios.....	139
Tabla 17. Costo aproximado del sistema de monitoreo manual.....	140
Tabla 18. Costo aproximado el sistema de monitoreo automatizado.....	141
Tabla 19. Tipo de clima en el AMG, de acuerdo con modificación a la clasificación de Köppen adaptada para México (García, 1998) .....	156



Tabla 20. Promedios medios anuales en el lapso de 1990-2019 en el AMG.....	165
Tabla 21. Valores de las estaciones de años tipo húmedo, secos y medios. ....	166
Tabla 22. Permeabilidad o conductividad hidráulica en el área de estudio.....	179
Tabla 23. Zona Geohidrológica Atemajac-Tesistán. Fuente: (INEGI, 1998) .....	181
Tabla 24. Zona Geohidrológica Toluquilla. Fuente: (INEGI, 1998) .....	181
Tabla 25. Zona Geohidrológica Cajititlán. Fuente: (INEGI, 1998) .....	182
Tabla 26. Zona Geohidrológica Altos de Jalisco. Fuente: (INEGI, 1998) .....	182
Tabla 27. Zona Geohidrológica Poncitlán. Fuente: (INEGI, 1998).....	183
Tabla 28. Superficie por tipo de suelo. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.....	183
Tabla 29. Área y porcentaje de textura del suelo en el AMG. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos.....	184
Tabla 30. Disponibilidad de agua subterránea por acuífero.....	188
Tabla 31. Nombres y códigos de los pozos analizados durante el trabajo de campo. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.....	196
Tabla 32. Cronograma de muestreo de pozos. Fuente: propia, Enlace Ambiental y Proyectos S.C.202	
Tabla 33. Ficha de campo del Pozo Aguillillas, Ixtlahuacán de los Membrillos .....	213
Tabla 34. Ficha de campo del pozo Buenavista (glorieta), Ixtlahuacán de los Membrillos .....	215
Tabla 35. Ficha de campo del pozo Santa Rosa 3, Ixtlahuacán de los Membrillos .....	217
Tabla 36. Ficha de campo del pozo CIMEG, El Salto .....	220
Tabla 37. Ficha de campo del pozo No.9, El Salto .....	222
Tabla 38. Ficha de campo pozo Villas Europa del Oeste y Américas, Juanacatlán .....	225
Tabla 39. Ficha de campo del pozo San Roque, Zapotlanejo .....	227
Tabla 40. Ficha de campo del pozo Madrigales, Zapotlanejo.....	229
Tabla 41. Ficha de campo del pozo manantial agua caliente (virgen), Zapotlanejo.....	232
Tabla 42. Ficha de campo del pozo manantial agua caliente (techado), Zapotlanejo.....	234
Tabla 43. Ficha de campo del pozo San Miguel Cuyutlán, Tlajomulco de Zúñiga .....	237
Tabla 44. Ficha de campo del pozo 2 Cuexcomatitlán, Tlajomulco de Zúñiga .....	239
Tabla 45. Ficha de campo del pozo Cimas del Sol, Tlajomulco de Zúñiga .....	242
Tabla 46. Ficha de campo del pozo Santa Cruz, Tlajomulco de Zúñiga .....	245
Tabla 47. Ficha de campo del pozo Campestre Santa Cruz, Tlajomulco de Zúñiga .....	247
Tabla 48. Ficha de campo del pozo Hacienda del Sur, Tlajomulco de Zúñiga.....	250
Tabla 49. Ficha de campo del pozo 15 Juan de la Barrera, San Pedro Tlaquepaque.....	252
Tabla 50. Ficha de campo del pozo 20 Los Olivos, San Pedro Tlaquepaque .....	255
Tabla 51. Ficha de campo del pozo 18 Hacienda la Candelaria, San Pedro Tlaquepaque.....	257
Tabla 52. Ficha de campo del pozo El Primavera, Zapopan.....	260
Tabla 53. Ficha de campo del pozo La Soledad de Nextipac, Zapopan .....	263
Tabla 54. Ficha de campo del pozo La Teja, Zapopan.....	265
Tabla 55. Ficha de campo del pozo La Hortaliza - SIAPA, Tonalá .....	268
Tabla 56. Ficha de campo del pozo Educadores Jaliscienses - SIAPA, Tonalá.....	271
Tabla 57. Ficha de campo del pozo Agua Azul 2 - SIAPA, Guadalajara .....	273
Tabla 58. Ficha de campo del pozo CODE - SIAPA, Guadalajara .....	276
Tabla 59. Ficha de campo del pozo Górgoros - SIAPA, Guadalajara .....	278
Tabla 60. Ficha de campo del pozo Tesistán - SIAPA, Guadalajara .....	280



Tabla 61. Ficha de campo del pozo Lechera - SIAPA, Zapopan .....	282
Tabla 62. condición del pozo y otras anotaciones. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C. ....	290
Tabla 63. Pozos propuestos para el sistema de control hidrogeológico.....	305
Tabla 64 Monitoreo in situ automático (GEOEX-SIAPA, 2003). .....	307
Tabla 65. Monitoreo in situ manual (AMVA, 2017). .....	307
Tabla 66. Métodos de análisis de laboratorio. Laboratorio de Calidad Ambiental de CORANTIOQUIA (AMVA, 2017) .....	309

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Gradiente Termométrico para el AMG.....	39
Ecuación 2. Índice GOD .....	59
Ecuación 3. Índice DRASTIC.....	64
Ecuación 4. Índice de recarga .....	66



## 1. Introducción

El agua subterránea, proveniente de la precipitación, circula a través del subsuelo y se almacena en espacios porosos, fracturas, espacios intergranulares y conductos presentes en los acuíferos, que son formaciones geológicas subterráneas con ciertas propiedades hidrogeológicas (*e.g.*, permeabilidad, transmisividad, porosidad eficaz, etc.), capaces de almacenar y transmitir el agua a una tasa aprovechable (González de Vallejo *et al.*, 2002; Custodio & Llamas, 1976).

Los recursos hídricos subterráneos representan la principal fuente de agua dulce disponible. No obstante, la cantidad que puede renovarse en el periodo de una vida humana es finita, lo que lo convierte un bien limitado. Su distribución es heterogénea y depende de las condiciones hidrogeológicas, topográficas y climáticas, entre otras. Además, desempeña un papel fundamental en el bienestar humano, así como para numerosos ecosistemas acuáticos y terrestres (UNESCO, 2022).

El agotamiento, contaminación y deterioro de los recursos hídricos, es un fenómeno global de gran relevancia. Este fenómeno se atribuye, a la continua exposición de los acuíferos a diversas formas de contaminación derivadas de procesos antropogénicos, como la urbanización, el desarrollo industrial, actividades agrícolas, emprendimientos mineros, entre otros (Foster & Chilton, 2003; UNICEF, 2021; UNESCO, 2022). Los impactos antropogénicos sobre los regímenes del agua subterránea llegan incluso a repercutir en la propia infraestructura de las zonas urbanas, por ejemplo: la extracción excesiva y la subsecuente caída del nivel freático, llevaría a hundimientos o daños en construcciones; las variaciones en estos niveles podrían generar humedad en cimientos y sótanos (Foster, 2020).

El diagnóstico de la situación actual y la proyección de escenarios futuros de las aguas subterráneas dependerá de la cantidad de información sólida sobre las condiciones del acuífero, del monitoreo de los niveles del agua y su calidad. La estimación precisa de la capacidad y vulnerabilidad de un acuífero es un proceso que implica mapear diversas características. Entre estas, se destacan la determinación de su capacidad de almacenamiento, transmisividad, conductividad hidráulica y porosidad. Estas variables son esenciales para comprender cómo el acuífero responderá a través del tiempo ante situaciones como el bombeo excesivo de agua o la presencia de contaminantes. Además, son la base para el desarrollo de modelos numéricos de aguas subterráneas, permitiendo un análisis más completo (Smith *et al.*, 2016).

La gestión sostenible del agua subterránea representa un desafío que requiere una coordinación y colaboración efectiva entre todos los actores involucrados, incluyendo a usuarios locales, especialistas técnicos y políticos, para definir el mejor uso del recurso y garantizar su protección. Esta gobernanza dependerá también de políticas, leyes, acuerdos institucionales y mecanismos de implementación y cumplimiento. Ante la variación de los sistemas acuíferos y sus distintas respuestas frente a diversas presiones, resulta fundamental identificar aquellos acuíferos que presentan una mayor susceptibilidad, riesgo de contaminación o sobreexplotación. Para lograr esto, es necesario llevar a cabo una zonificación y establecer polígonos de protección que garantice la compatibilidad de los usos del suelo con la preservación de zonas vulnerables (Smith *et al.*, 2016).



Existen diversas medidas que se pueden emplear para el uso sustentable del agua subterránea, como priorizar zonas recientemente urbanizadas por cobertura de drenaje, para proteger la degradación de su calidad de agua; además de fortalecer los controles para el manejo y la descarga de efluentes industriales y el vertido de residuos sólidos para reducir el riesgo de contaminación del acuífero (Foster, 2020).

La declaración de áreas de recarga juega un papel clave para establecer zonas de protección para las aguas subterráneas, con el objetivo de promover su uso sostenible y su potencial aprovechamiento como fuente de agua potable. No obstante, ante los posibles obstáculos administrativos que puedan surgir, es crucial anticipar soluciones mediante arreglos de gobernanza efectivos, instrumentos de políticas públicas y esquemas de incentivos que permitan superar dichos desafíos. Dada la naturaleza cambiante del uso del recurso, se destaca la importancia de adoptar un enfoque de “gestión adaptativa” de las aguas subterráneas. Esto debe basarse en la implementación de un sistema de monitoreo continuo de los niveles freáticos, la calidad del agua, su uso y el volumen que se extrae, lo que permitirá tomar decisiones informadas y oportunas para salvaguardar y optimizar el uso sostenible de este valioso recurso (Foster, 2020). La integración de zonas de protección, a partir de análisis de vulnerabilidad acuífera, en la planeación urbana se ha adoptado en diversos países a nivel internacional. En China, se ha desarrollado el concepto de ‘ciudad esponja’ como modelo de planeación urbana para aumentar la infiltración, detención, almacenamiento, tratamiento y drenaje del agua, al mismo tiempo que mejora la habitabilidad urbana (Fluence news team, 2022). Los acuíferos urbanos desempeñan un rol importante como componentes de las ‘ciudades esponja’, al favorecerse la infiltración directa para su recarga. Lo anterior es obtenido una vez que ciertas zonas con superficie impermeable son modificadas a permeables, luego del análisis hidrogeológico para el mapeo de áreas de recarga (Jin *et al.*, 2021). En Colombia, se ha realizado una evaluación de vulnerabilidad acuífera intrínseca a la contaminación, principalmente mediante el uso de la metodología GOD, aunque también se han empleado otras como DRASTIC. Gracias a esta evaluación, se han desarrollado mapas, a distintas escalas, que van desde una escala regional (1:500,000), hasta más detalladas como 1:250,000 o 1:100,000 e incluso otras con mayor resolución. Estos mapas tienen como objetivo apoyar en la toma de decisiones de las autoridades ambientales y de ordenamiento territorial (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). En México, en el estado de Michoacán, se han llevado a cabo evaluaciones de vulnerabilidad acuífera, con el propósito de definir programas de protección para acuíferos y manantiales amenazados por diversas actividades humanas. Un ejemplo concreto es la ampliación de la zona de amortiguamiento del área natural de Chorros del Varal, basada en un mapa de vulnerabilidad acuífera generado a través del método SINTACS (Silva *et al.*, 2010). En el entorno urbano de Mérida, Yucatán, se han establecido reservas hidrogeológicas para proteger la principal fuente de agua de la ciudad. Esta fuente es un sistema acuífero kárstico que abastece tanto a la población como a la industria y agricultura de la región. El área seleccionada para esta reserva es un polígono de 900 km<sup>2</sup> ubicado al suroeste de la ciudad, en una zona conocida como “anillo de cenotes” que se caracteriza por su alta permeabilidad. La delimitación de este polígono se ha realizado mediante una metodología integral, que considera datos climatológicos, geología, variables hidráulicas, hidrogeoquímica, demanda de agua potable y riesgo de contaminación (Escolero *et al.*, 2000).

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) alberga el mayor porcentaje de la población de Jalisco, con cinco millones de habitantes distribuidos en nueve municipios: El Salto, Guadalajara, Ixtlahuacán



de los Membrillos, Juanacatlán, San Pedro Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga, Tonalá, Zapopan y Zapotlanejo. En total, el área abarca una extensión territorial de 3,265.46 km<sup>2</sup>. De esta superficie, 724 km<sup>2</sup> están urbanizados, y más de la mitad de los cinco millones de habitantes, residen en los centrales de Guadalajara y Zapopan (IMEPLAN, 2018). El agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento para los habitantes de la metrópoli que se encuentran fuera de la cobertura del Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA) (IMEPLAN, 2016). Dentro del AMG, se han identificado algunas carencias en la gestión del agua subterránea, que requieren atención inmediata. En primer lugar, la delimitación de los acuíferos es imprecisa, lo que dificulta una administración adecuada. Además, existe una falta de control sobre el número de captaciones y del nivel piezométrico de los sistemas hidrogeológicos. Estas deficiencias reflejan la necesidad urgente de llevar a cabo estudios científicos para determinar la disponibilidad y estado de los recursos hídricos subterráneos. Es importante conocer los puntos y volúmenes de extracción, así como los periodos de retorno y los sitios principales de recarga. A través de esta información, será posible proponer medidas efectivas para la protección y, en su caso, recuperación de los acuíferos.

Se espera que la escasez de agua aumente en el futuro, debido a las crecientes demandas asociadas con el crecimiento demográfico y el desarrollo económico (Maliva, 2016). Por lo tanto, es imprescindible ejecutar acciones para la protección y administración adecuada de los acuíferos. Para ello, es necesario iniciar identificando los sistemas subterráneos desde un enfoque hidrogeológico. La investigación del agua subterránea es de vital importancia, ya que no se puede hablar del aprovechamiento de los recursos naturales sin considerar su protección. Conocer las características de estos sistemas subterráneos es crucial para comprenderlos y proponer una gestión más efectiva del recurso. Diversos estudios se han enfocado en delimitar zonas hidrogeológicas, especialmente en regiones que son fuentes de abastecimiento para grandes ciudades, como el AMG. Por este motivo, el Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN), como Organismo Público Descentralizado Intermunicipal, funge como instancia de Coordinación Metropolitana desde 2014, liderando proyectos clave dentro de la metrópoli (IMEPLAN, 2021).

Se han desarrollado pocos estudios hidrogeológicos a nivel regional, lo que ha limitado el conocimiento detallado del sistema de aguas subterráneas del AMG. Con el propósito de abordar esta situación, el IMEPLAN ejecutó el “Estudio aguas subterráneas primera etapa, caracterización de los acuíferos del Área Metropolitana (2021)”. El objetivo de este estudio fue realizar un análisis diagnóstico del panorama actual del conocimiento hidrogeológico del AMG, basado en una investigación documental. El presente documento corresponde al proyecto “Elaboración del estudio de hidrología subterránea en el Área Metropolitana De Guadalajara”<sup>1</sup>. Este estudio tiene el fin de desarrollar bases técnicas para realizar una correcta delimitación de los sistemas hidrogeológicos que abastecen el AMG, identificar su vulnerabilidad a la contaminación, así como tener una zonificación de las zonas de recarga; además de desarrollar una propuesta para la implementación de un sistema de monitoreo que abone a la actualización constante de información en el área de estudio.

---

<sup>1</sup> inició su proceso de licitación en marzo del 2023 y se seleccionó a la consultoría Enlace Ambiental y Proyectos, S.C. para realizar el proyecto

## 2. Objetivos

Realizar una delimitación de los sistemas hidrogeológicos que abastecen al Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), con objeto de contribuir a su caracterización; además de desarrollar una estrategia para establecer zonas de protección a la contaminación del agua subterránea, identificar las zonas de recarga, así como proponer un sistema de control o monitoreo.

### Objetivos específicos:

- Proponer una delimitación de los sistemas hidrogeológicos del área de estudio mediante criterios hidrogeológicos.
- Delimitar las zonas con vulnerabilidad a la contaminación de los sistemas hidrogeológicos propuestos del área de estudio.
- Identificar las zonas de recarga.
- Elaborar una propuesta para el monitoreo de aguas subterráneas con ruta de implementación

## 3. Antecedentes

En el ámbito internacional, se han establecido los lineamientos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), aprobados en 2015. Estos objetivos representan un modelo para alcanzar un futuro mejor y más sostenible, ya que abordan los desafíos globales que enfrentamos. Los 17 Objetivos están interconectados y están proyectados para lograrse en el año 2030 (véase Figura 1).



Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Fuente: (Naciones Unidas, 2015)

El objetivo 6, titulado "Agua limpia y saneamiento", es particularmente relevante para el tema del agua subterránea. Su propósito es garantizar el acceso universal y equitativo al agua potable, a un precio asequible para todos (Naciones Unidas, 2015). Además, se enfatiza la importancia de



mantener un ambiente sano, libre de fuentes de contaminación y promover un consumo responsable del agua, adaptado al clima local. Asimismo, se destaca la necesidad de identificar zonas adecuadas para la recarga del agua subterránea. Estos ODS representan un compromiso global para proteger y gestionar de manera sostenible los recursos hídricos.

En México, la planeación se estructura a nivel nacional, regional y local, siendo fundamentales el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 y el Programa Nacional Hídrico 2022-2024. En el contexto de este estudio, destaca el Programa de Desarrollo de Jalisco, que enfatiza la importancia de un esfuerzo conjunto de la sociedad y el gobierno para un bienestar poblacional. Este programa, reconoce la sobreexplotación de las aguas subterráneas como un desafío clave y aboga por un enfoque integral y sostenible. La inclusión de estos programas de planeación a distintos niveles permitirá guiar las acciones hacia una gestión adecuada de los recursos hídricos, incluida la protección y uso responsable del agua subterránea, asegurando así el bienestar y desarrollo sostenible en el área de estudio y en toda la región (Gobierno de Jalisco, 2013. Actualización 2016).

La planeación hídrica en Jalisco se orienta con el Programa Hídrico Visión 2030, que prioriza el desarrollo humano sostenible y establece metas, estrategias y acciones para lograrlo. Uno de sus objetivos específicos es fomentar el manejo integrado y sustentable del agua en cuencas y acuíferos, además de preservar y mejorar la calidad del agua superficial y subterránea. Lograr esto requiere aumentar la comprensión de los sistemas de aprovechamiento. La mejora en el manejo de estos sistemas implica una colaboración estrecha entre el gobierno estatal y municipal, involucrando estratégicamente a los diversos sectores de la sociedad usuaria. De esta forma, se fomenta la participación de la comunidad y se promueve una gobernanza hídrica más eficiente y coordinada en beneficio de la preservación y uso sostenible del recurso hídrico en Jalisco (CONAGUA, 2009).

El Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN) cumple un papel fundamental como instancia de Coordinación Metropolitana del AMG y lidera proyectos clave para un desarrollo urbano integral en la región (IMEPLAN, 2021). Ha desarrollado varios instrumentos clave para facilitar la planeación metropolitana, entre ellos se encuentran: el Atlas Metropolitano de Riesgos, la Ruta 2042, el Programa de Desarrollo Metropolitano 2.0 (PDM) y el Plan de Ordenamiento Metropolitano (POTmet). Este último, aprobado en 2016, destaca por ser una guía de ordenamiento que establece estrategias para restaurar el orden, la cercanía, la compacidad, la conectividad y el equilibrio en el territorio metropolitano, a través de la definición del Modelo Policéntrico de Ciudad y Estructura Urbana Metropolitana (IMEPLAN, 2016). Dentro de los componentes estratégicos del POTmet, se destaca la importancia de la sustentabilidad ambiental, que incluye la implementación de un sistema verde periurbano. Una de las políticas clave es la generación de áreas de protección, las cuales comprenden: (1) Áreas que requieren un alto nivel de protección debido al estado de sus ecosistemas, la importancia de sus actividades productivas o su capacidad de recarga de acuíferos, zonas donde es fundamental evitar la urbanización y cualquier uso que no esté alineado con su vocación; (2) Áreas definidas en base a políticas de protección, que incluyen ordenamientos ecológicos, clasificación de Áreas Naturales Protegidas (que aún no cuentan con decreto), áreas de prevención ecológica y protección de acuíferos. A pesar de estas medidas, se ha identificado que la falta de información actualizada o su ausencia ha limitado su efectividad. En este contexto, y en el marco de la actualización del POTmet, surge la necesidad de generar áreas de protección específicas en las zonas con un alto potencial de recarga de aguas subterráneas. El



objetivo es evitar la impermeabilización de estas áreas y prevenir la entrada de contaminantes al acuífero.

En 2003, se hizo un acuerdo entre SIAPA y GEOEX, donde se desarrolló una red de monitoreo en los acuíferos Atemajac y Toluquilla, con el objetivo de identificar tendencias del comportamiento de los niveles piezométricos, temperatura y conductividad eléctrica del agua subterránea, a mediano y largo plazo; con la intención de que esta información fuese un soporte adicional para los trabajos de gestión del recurso. Asimismo, estas acciones permitirían dar seguimiento a las condiciones de normatividad establecidas en las concesiones de aguas nacionales, y finalmente proveer de un sistema permanente de alerta para el funcionamiento adecuado de las fuentes de abastecimiento de agua potable (GEOEX-SIAPA, 2003).

Actualmente, es importante establecer un sistema de control hidrogeológico o sistema de monitoreo del agua subterránea. Esto permitirá evaluar las fluctuaciones de los niveles piezométricos del sistema, y comprender los procesos que influyen en la evolución química del agua subterránea (AMVA, 2017; IGRAC, 2020). Implementar un sistema de control hidrogeológico para los sistemas del Área Metropolitana de Guadalajara es esencial para garantizar una gestión adecuada del recurso hídrico y avanzar hacia una metrópoli más resiliente y sustentable.

## 4. Metodología

El proyecto se llevó a cabo durante un periodo de cuatro meses, distribuidos en las siguientes cuatro etapas, establecidas de acuerdo con los plazos de entrega: Etapa 1 - Delimitación de los sistemas hidrogeológicos; Etapa 2 y 3 - Evaluación de la vulnerabilidad acuífera intrínseca a la contaminación y delimitación de zonas de recarga; Etapa 4 - Propuesta de un sistema de monitoreo. Los tiempos estimados para cada etapa se presentan en la Figura 2.

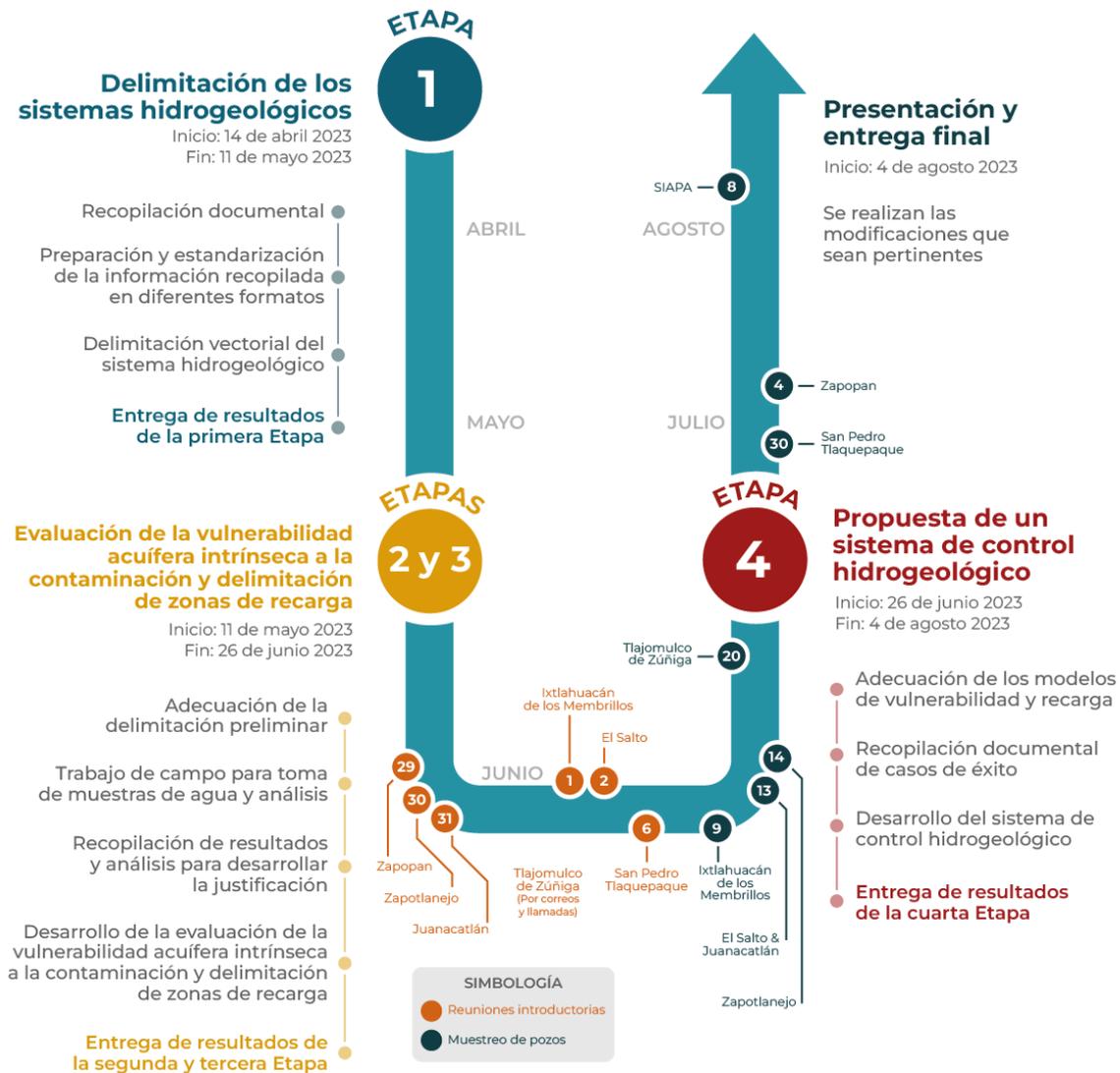


Figura 2. Línea del tiempo del proyecto, por etapas de entrega

Para realizar este estudio fue necesario ejecutar un análisis amplio y minucioso para comprender el medio físico, a partir del procesamiento de información bibliográfica y cartográfica. El trabajo realizado se enfocó en siete categorías: (1) trabajo de gabinete, (2) trabajo de campo, (3) trabajo de laboratorio, (4) delimitación de sistemas hidrogeológicos, (5) procesos de evaluación de vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos e identificación de zonas de recarga, (6) análisis hidrogeológico, y (7) diseño y propuesta de sistema de control hidrogeológico (véase Figura 3).

Cada una de estas categorías fue fundamental para obtener una visión completa y detallada de los sistemas hidrogeológicos del AMG, permitiendo generar un estudio completo y sólido que servirá como base para una adecuada gestión de los recursos hídricos.



Figura 3. Metodología del Proyecto

## 4.1. Trabajo de gabinete

Se realizó una revisión de numerosos trabajos relacionados con el estudio presentado, abarcando diferentes aspectos del medio físico y del ámbito urbano, relevantes para la evaluación e investigación hidrogeológica. La revisión bibliográfica fue esencial para recopilar información y crear una base de datos, considerando las siguientes fuentes de información:

- Instituciones gubernamentales
- Empresas privadas
- Referencias científicas y académicas

De acuerdo con el tipo de información recopilada se pudo diferenciar entre fuentes de información como artículos científicos, tesis de universidades, o información espacial; es decir, datos representados con valores de magnitud y ubicación geoespacial, los cuales pudieran ser modificados y procesados para generar resultados de interés. A partir de la información bibliográfica se realizaron diferentes análisis para entender el medio físico del área de estudio seleccionada. En el apartado de anexos (véase Anexo 1. Descripción del medio físico) se detalla cada una de las variables de topografía, geología, edafología, hidrogeología, hidrología, climatología, uso de suelo, entre otras, mencionadas en la metodología propuesta.

### 4.1.1. Revisión de fuentes de información

Se compiló y analizó información del medio físico que fue de interés hidrogeológico para el presente estudio. Por ello, se consultaron distintas instituciones académicas y organismos públicos del ámbito nacional, entre los cuales destacan el Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEG), Servicio Geológico Mexicano (SGM), Secretaría del Medio para el Desarrollo Territorial de Jalisco (SEMADET), Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA), Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), además de los gobiernos municipales del AMG: El Salto, Guadalajara, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán, San Pedro Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga, Tonalá, Zapopan y Zapotlanejo, entre otras fuentes. Asimismo, se consultaron artículos y

tesis publicados por distintas universidades nacionales e internacionales, así como libros relacionados con hidrogeología, hidrogeoquímica y modelos de evolución hidrogeoquímica.

La documentación oficial, los artículos científicos y los trabajos académicos consultados se complementaron con otros informes técnicos, que fueron solicitados a entes públicos como la Secretaría de Gestión Integral del agua (SEGIA), y gobiernos municipales (Juanacatlán, El Salto, Ixtlahuacán de los Membrillos, Zapopan, Zapotlanejo, San Pedro Tlaquepaque, Guadalajara y Tlajomulco), así como aquellos redactados por empresas privadas de consultoría.

#### 4.1.2. Recopilación de información espacial

Se creó una base de datos de información geográfica con las capas recopiladas de: censo de aprovechamientos de agua subterránea (pozos administrados por municipios), características climáticas, diseño del muestreo de agua, edafología, geología, hidrogeoquímica, hidrología superficial, hidrogeología, litología, piezometría, topografía, uso de suelo y vegetación, entre otras. Mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que son sistemas espaciales que crean, administran, analizan y representan cartográficamente todos los datos (Esri, 2021), se procesó y adaptó la información, para poder manejar los datos espaciales en formato vectorial y ráster.

Los archivos vectoriales son aquellos formatos que son representados por entidades geométricas, y se conforman por tres tipos de componentes: puntos, líneas y polígonos. A diferencia de la información vectorial, el componente principal del formato ráster es el píxel. Los píxeles, celdas o cuadrículas forman una red, en la cual cada celda presenta una cualidad o propiedad espacial (Escobar, 2022) (véase Figura 4).

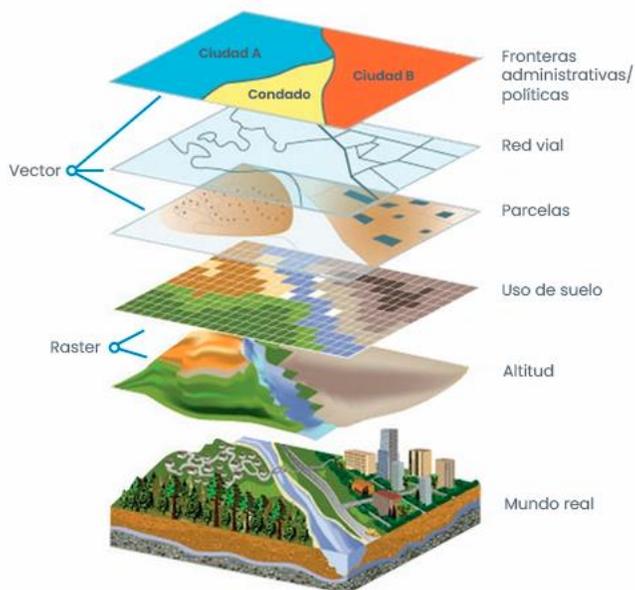


Figura 4. Modelo de Geo-Información. Fuente: (ArcGIS, 2023).

En México, existen una variedad amplia de posibles fuentes bibliográficas y de descarga para la información geoespacial. Se hizo una búsqueda y descarga de información de este tipo de diferentes sitios. La información recopilada fue, principalmente, de las bases de datos del Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN) y del Instituto de Estadística y Geografía (INEGI); mientras que la información obtenida se complementó con el



Instituto de Información Estadística y Geográfica (IIEG) y fuentes especializadas en la correspondiente área complementaria.

### ***Limitantes de la información geoespacial***

Existen algunas limitantes que deben de tomarse en cuenta al recopilar la información geoespacial, de las cuales se destacan tres:

1. Disponibilidad
2. Escala o precisión geográfica
3. Temporalidad o actualidad

La disponibilidad de la información se refiere a si existen capas para el tema de interés, y que estas estén disponibles para su descarga. Estas pueden ser descargadas de portales públicos, aunque muy posiblemente estén dispersas en diversas fuentes. La escala o precisión geográfica de la información indica la cobertura espacial o la exactitud de la capa comparada con lo observable en el campo. En México, comúnmente se manejan escalas de 1:50,000<sup>2</sup> para coberturas municipales, y de 1:250,000 para estudios regionales y nacionales. Por último, la temporalidad o actualidad de la información se refiere a la fecha de publicación de la información, así como a su cobertura temporal.

#### ***4.1.3. Estandarización y preparación de datos por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG)***

El análisis, estandarización, preparación de datos espaciales y elaboración de cartografía se realizaron mediante SIG. Estos conectan datos a un mapa, integrando datos de ubicación con todo tipo de información descriptiva, lo cual sirve como base para la representación cartográfica. Un SIG ayuda a los usuarios a comprender los patrones, relaciones y contexto geográfico. Entre sus ventajas se encuentran la mejora de la comunicación y eficiencia, así como de la gestión y toma de decisiones (Esri, 2021). Para iniciar el trabajo con SIG, se utilizó la información espacial recopilada, que fue adaptada a los formatos de la plataforma principal de trabajo, para usarse en el programa *ArcGIS 10.8*, *ArcMap* y sus complementos, y *ArcGIS Pro-3.1*. Entre la información se incluyeron mapas, escenas, capas en diferentes formatos, imágenes satelitales, modelos analíticos y aplicaciones. Se trabajó con archivos en formato *shapefile (.shp)* y *ráster* en el formato *GRID (.grid)*, y se combinaron numerosas capas de cartografía disponible, con distintas escalas del área de estudio (e.g., 1:10,000, 1:50,000, 1:250,000, etc.). Es importante resaltar que cada capa cartográfica fue procesada, pues estas pueden tener un sistema de coordenadas distinto, según el guardado en la base de datos; por lo que es imprescindible definir el sistema de coordenadas proyectadas con el que se va a trabajar, antes de manipular la información, dependiendo del área de interés. El sistema de coordenadas recomendado es el GCS WGS 1984 y, dependiendo de la amplitud de la zona, se sugiere enfocar el UTM (*Universal Transversal de Mercator*). La proyección UTM tiene la ventaja de que ningún punto está demasiado alejado del meridiano central de su zona, por lo que las distorsiones son mínimas. Para este estudio se seleccionó el *WGS 1984 UTM Zona 13N*. Por lo tanto, se cambiaron todas las capas al sistema de coordenadas seleccionado, para omitir los posibles errores que puedan ocurrir al trabajar con sistemas no compatibles (véase Figura 5).

---

<sup>2</sup> 1:50,000 indica que 1 cm en el mapa representa 500 m en la realidad.

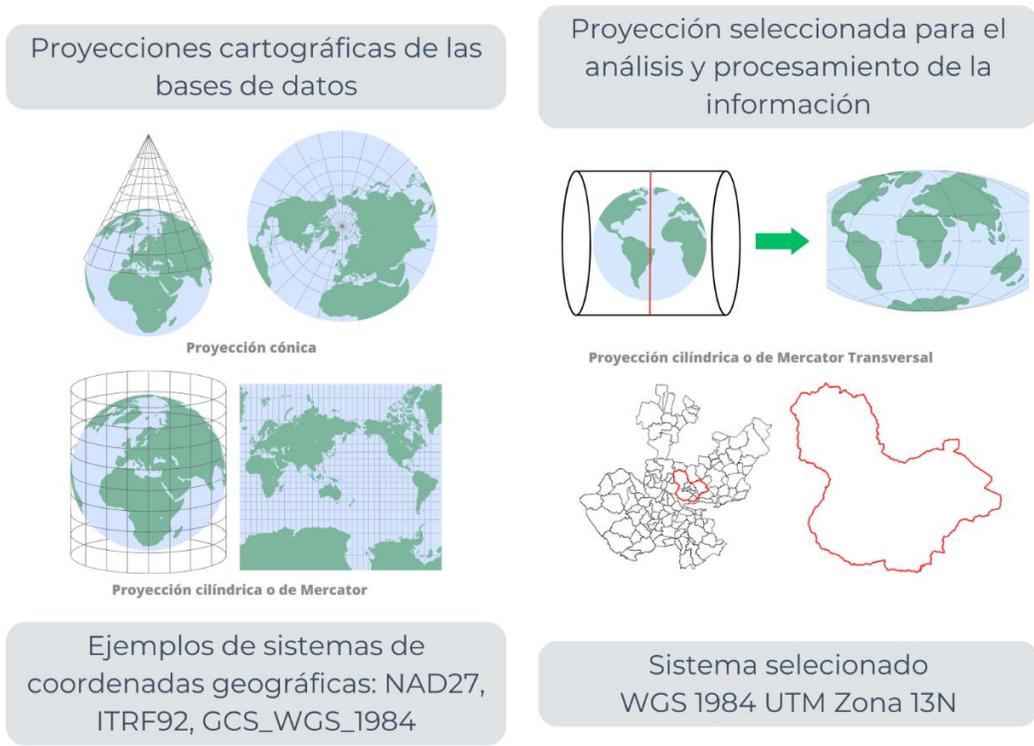


Figura 5. Sistema de coordenadas de las bases de datos y sistema seleccionado. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Las variables consideradas en la elaboración de cartografía corresponden a la información extraída de capas de información geográfica relevantes para el estudio. Sin embargo, aparte de la estandarización, se prepararon los datos específicos para cada variable, para su posterior análisis. Las variables más representativas del análisis se enlistan a continuación. Por su parte, la Figura 6 resume la información inicial y el procesamiento realizado.

1. Censo de aprovechamiento de aguas subterráneas
2. Topografía
3. Geología (fallas, fracturas, espesores, perfiles estratigráficos y permeabilidad, geomorfología)
4. Edafología (tipo de suelo y texturas)
5. Datos meteorológicos (precipitación, temperatura, evaporación)
6. Uso de suelo y vegetación
7. Hidrogeoquímica
8. Hidrología superficial
9. Hidrogeología (geolocalización, manantiales, zonas de recarga y descarga)
10. Piezometría

## PREPARACIÓN DE DATOS

### CENSO DE APROVECHAMIENTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Busqueda de información en diferentes fuentes de información como SIAPA, GEOEX, IMEPLAN. Apoyo fundamentan con las capas compartidas por los municipios.

### TOPOGRAFÍA

Curvas de nivel, cada 10 metros, de INEGI. Procesamiento en ArcMap con las herramientas *TIN* y *Raster* para obtener el Modelo Digital de Elevación. Con la herramienta *Slope*, se obtiene la pendiente.

### EDAFOLOGÍA

### GEOLOGÍA

Análisis manual de la compatibilidad rasgos de la superficie, agregando a la capa de IIEG del continuo vectorial geológico 2016, escala 1:50,000 información de INEGI, SGM del conjunto de datos vectoriales geológicos 1988 y 2002, escala 1:250,000 y la carta de agua subterránea del INEGI 1981 y 1979, escala 1:250,000. Procesamiento en ArcMap con las herramientas *Split* y *Trace*. Se utilizó la capa de IIEG como base, al tener la mejor escala (1:50,000 vs 1:250,000).

### DATOS METEOROLÓGICOS

Estaciones climatológicas de CONAGUA. Se seleccionan aquellas con una distancia máxima de 15km del AMG (49). Tratamiento en Excel, eliminando los años con menos de 6 meses de información. Se depuran las estaciones con menos de 20 años de información mensual para el periodo de 1990 a 2019 (30 años). 24 estaciones cumplen los requerimientos. Se obtienen los valores promedios mensuales de temperatura, precipitación y evaporación. Para años tipo, se interpola la información faltante por el método de razón de valores normales. Procesamiento en ArcMap con las herramientas *Local Polynomial Interpolation* y *Contour para Precipitación y Evaporación*. Con la herramienta *Raster Calculator* y el gradiente termométrico se obtiene la temperatura.

### USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

Se utilizó la capa de INEGI serie VII como referencia si como la capa de SEMADET-FIPRODEFO (2020) se agregó la categoría de vegetación intraurbana con el NDVI, de la imagen satelital SENTINEL-2 del día 8 de noviembre del 2022. La capa de INEGI requirió procesamiento adicional.

### HIDROGEOQUÍMICA

Información de diferentes fuentes, para generar diagrama de Piper de diferentes parámetros hidrogeoquímicos (representación gráfica de la composición química del agua).

### HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

De INEGI, la Red Hidrográfica, escala 1:50,000, Procesamiento en ArcMap de *merge*, para unir las cuencas. Generación de una capa con los ríos más importantes.

### HIDROGEOLOGÍA

Se revisaron las propiedades de permeabilidad y transmisividad, con la cartas de aguas subterráneas de INEGI (1:250,000), GEOEX-SIAPA, 2003 y JVC, 2003

### PIEZOMETRÍA

Información bibliográfica de la ubicación de los pozos, así como su medición piezométrica. Se comparó con la medición en campo. Se modela la piezometría en ArcMap.

Figura 6. Preparación de datos espaciales

### 4.1.3.1. Censo de aprovechamientos de agua subterránea

La recopilación de los aprovechamientos de agua subterránea se basó en datos obtenidos de diversas fuentes, como CONAGUA, SEGIA, SIAPA, INEGI, IMEPLAN y otras instituciones responsables de la gestión del agua en algunos municipios del AMG. Es importante señalar que la mayoría de esta información no estaba previamente filtrada ni procesada. En su mayoría, consistía en tablas y documentos que contenían datos no estructurados, lo que requirió un proceso de filtrado y tratamiento. En la mayoría de los casos, solo se disponía de información sobre profundidad del nivel dinámico de los pozos, por lo que fue necesario realizar un procesamiento adicional para obtener las altitudes del nivel piezométrico.

Se realizó la geolocalización de todos los puntos de aprovechamiento. Estos datos fueron contrastados con el modelo digital de elevación, derivado de las curvas de nivel de INEGI escala 1:50,000. El objetivo de este proceso fue determinar la altitud correspondiente al lugar de acceso a pozos y manantiales. Posteriormente, se realizó una resta entre los valores de profundidad y las altitudes de los puntos. Esta operación resultó en la obtención de valores que representan la altitud del nivel piezométrico, atributo esencial para los conjuntos de datos utilizados en las modelaciones



piezométricas. Al estandarizar los datos crudos de esta manera, se logró establecer un punto de referencia uniforme para el nivel piezométrico en los diferentes sistemas hidrogeológicos.

En el caso de ciertas fuentes bibliográficas, como GEOEX-SIAPA (2003), se presentaba información en forma de tablas dentro de artículos con formato PDF. En estos casos, se requirió crear un archivo en blanco con formato CSV, en el cual se ingresaron manualmente todas las filas del documento, de manera que la información de cada uno de los pozos quedara en una sola celda. Después, se empleó la función *Texto en Columnas*, para separar los distintos atributos presentes en las tablas publicadas. Una vez que cada atributo se encontraba en su propia columna, el archivo CSV se importó al software de información geográfica *ArcGIS Pro*. A través de la función *Display XY Data* se asignaron las coordenadas correspondientes, resultado un archivo vectorial tipo SHP, con toda la información filtrada.

Después de estandarizar todos los valores obtenidos de las fuentes mencionadas anteriormente, se integraron todos los archivos SHP en el software de información geográfica utilizado: *ArcGIS Pro*. Este paso se realizó con el propósito de establecer un punto de partida para las próximas etapas del proyecto, donde se pretende utilizar dichos datos en diversas modelaciones. En total, se recopilaron 1,390 registros de pozos y manantiales, procedentes de 14 fuentes distintas<sup>3</sup>. Estos datos abarcan niveles piezométricos dentro del AMG, como se ilustra en la Figura 7.

---

<sup>3</sup> Cartas de Aguas Superficiales (INEGI, 1986), Cartas de Aguas Subterráneas (INEGI, 1980), SGIA (a través de IMEPLAN, 2018), CONAGUA (2004), GEOEX-SIAPA (2003), Geología 1:250,000 (INEGI, 1971), Gobiernos municipales (a través de IMEPLAN, 2023), Mahlkecht et al. (2017), SIAPA (Chicalote, 2020), Tlajomulco (2023), Tlaquepaque (2023), Zapopan (2023), zona Hidrogeológica Tesistán-Toluquilla (INEGI, 2012) y elaboración propia a partir de trabajo de campo

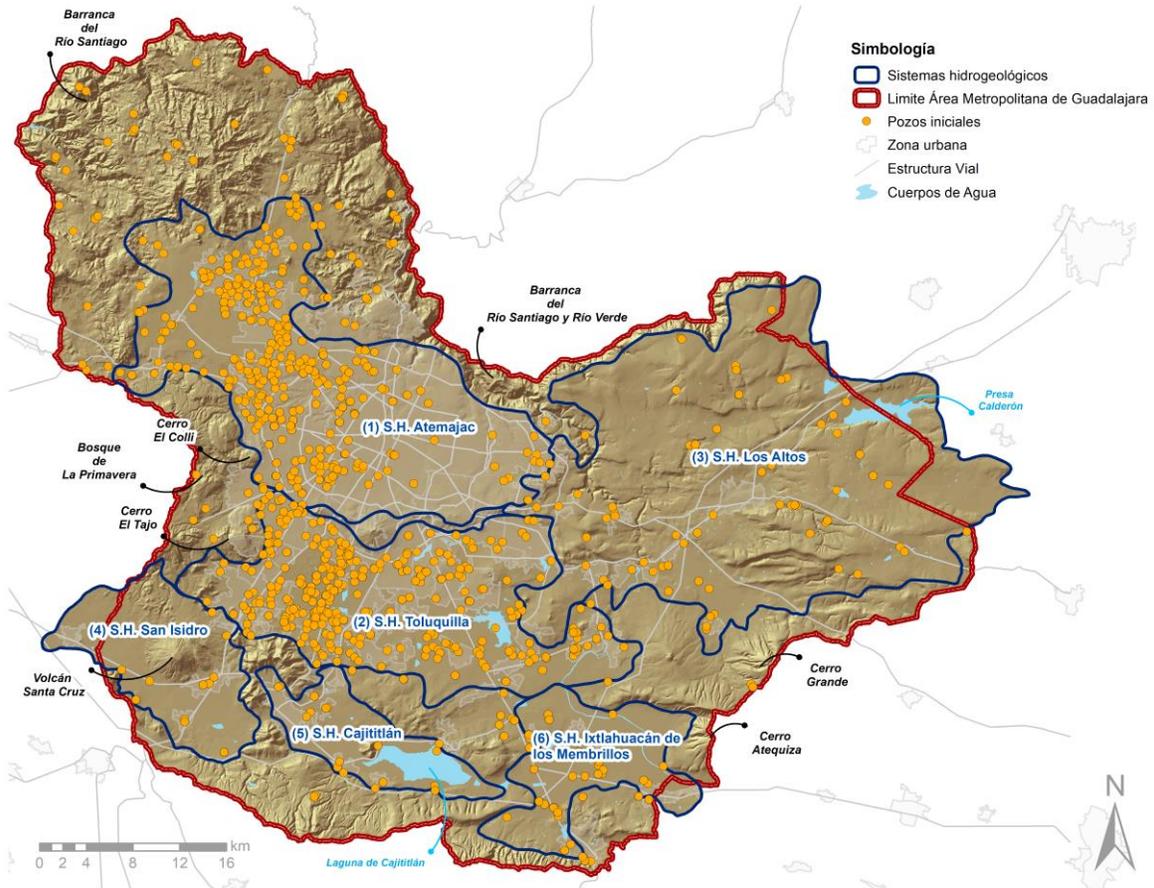


Figura 7. Recopilación de pozos de distintas fuentes de información.

La recopilación de datos sobre los niveles estáticos y dinámicos en los sistemas correspondientes permitió llevar a cabo la modelación de la piezometría dentro del AMG. Sin embargo, para obtener estos resultados se realizaron múltiples procesos de filtrado, los cuales se describen en detalle en las secciones 4.1.3.10. Después de aplicar dichos filtrados, se obtuvo un conjunto residual de 294 puntos, los cuales se consideraron como aquellos que mejor reflejan el funcionamiento actual de los sistemas hidrogeológicos (Figura 8).

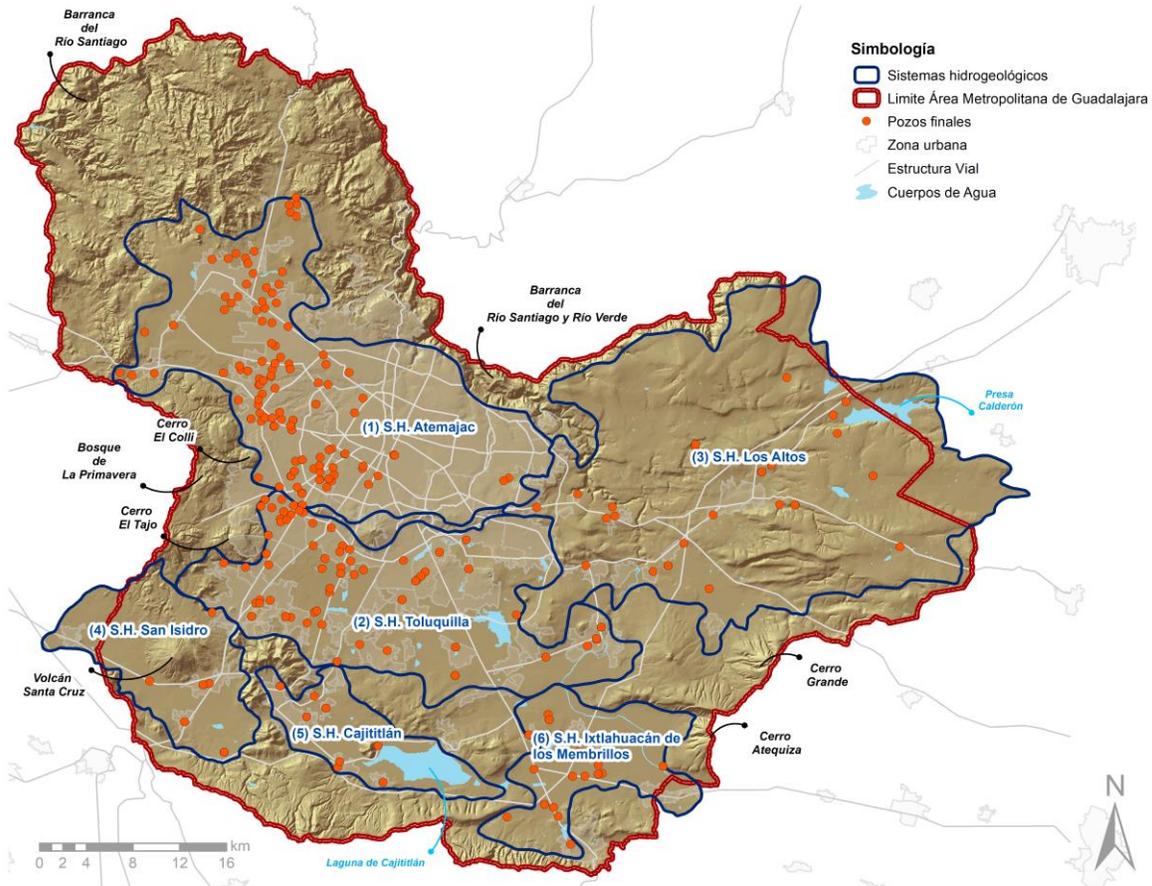


Figura 8. Pozos seleccionados con información relevante de piezometría.

#### 4.1.3.2. Topografía

La topografía es la ciencia que estudia el conjunto de principios y procedimientos que tienen por objeto la representación gráfica de la tierra, con sus formas y detalles; tanto naturales como artificiales (INEGI, 2023). El INEGI cuenta con información topográfica de las curvas de nivel a cada 10 metros. Con esta información se realizaron diferentes procedimientos, utilizando ArcMap, para obtener modelos digitales del terreno y, a partir de estos, mapas de altitudes, pendientes y relieve.

Para obtener el Modelo Digital de Elevación (MDE), se generó una red irregular de triángulos (TIN, por sus siglas en inglés), a partir del *shapefile* de curvas de nivel. Este archivo TIN es una superficie basada en vectores, utilizada para representar la morfología de la superficie. El proceso utilizado fue con la herramienta de *Toolbox* de ArcMap > *3D Analysts Tools* > *Data Management* > *TIN* > *create TIN*. Una vez generado el TIN, se convirtió al MDE. Igualmente, en *Toolbox* de ArcMap > *Conversion* > *From TIN* > *TIN to Raster*. En las especificaciones se seleccionó el método lineal, con un tamaño de celda correspondiente a la información inicial de las curvas de nivel; es decir, 10 m. Por su parte, para obtener el mapa de pendientes, se realizó un procedimiento similar, con *Arctoolbox* de ArcMap > *Spatial analyst tools* > *Surface* > *Slope*. El resultado fue una capa ráster de pendientes, expresada en porcentaje, la cual fue reclasificada con *Arctoolbox* de ArcMap > *Spatial Analyst Tools* > *Reclass* > *Reclassify*. Finalmente, para obtener el relieve, se utilizó *Arctoolbox* de ArcMap > *Spatial analyst tools* > *Surface* > *Hillshade*. El relieve permitió darles textura a los mapas, para facilitar la interpretación,



en cuenta a la conformación del terreno. Gracias a estas herramientas, fácilmente se pudo manipular información vectorial, de modo que se generara información más compleja.

#### 4.1.3.3. Geología

La geología del área de estudio condiciona el funcionamiento de los acuíferos, ya que las aguas subterráneas se mueven en el interior de las formaciones rocosas (González de Vallejo *et al.*, 2002). Para realizar un análisis completo de la geología del AMG se realizó una búsqueda bibliográfica de la información disponible. Algunos de los sitios visitados fueron: Atlas Estatal de Riesgos<sup>4</sup>, Datos Jalisco<sup>5</sup>, IIEG<sup>6</sup>, IMEPLAN<sup>7</sup>, INEGI<sup>8</sup>, SEMADET<sup>9</sup> y SGM<sup>10</sup>. Se descubrió una gran cantidad de información relevante para el análisis en los portales mencionados. Sin embargo, la información localizada se encontró a diferentes escalas y formatos, por lo cual fue necesaria su homogeneización. Entre todas las fuentes destaca la información de las Cartas Geológicas, escala 1:50,000, digitalizadas por IIEG en 2016 a partir de datos de INEGI (1971-1973). También se evaluaron los conjuntos de datos vectoriales geológicos de INEGI (1:250,000) y las Cartas geológico-mineras de SGM (1:250,000), pero se optó por trabajar con la información de IIEG, debido a la mayor resolución que proporciona. Además, se incorporaron las cartas de aguas subterráneas de INEGI (1:250,000) de la región como información adicional. Para el procesamiento de toda esta información geográfica, se utilizó el software *ArcGIS Pro*. Durante el primer análisis, se identificó una notable falta de información detallada en el AMG. Específicamente, se destacó que la información proporcionada por IIEG (generada por INEGI) solo ofrecía datos básicos sobre las rocas. Como parte del alcance del estudio, se buscó complementar y mejorar la información geológica existente, mediante una revisión manual de la distribución espacial de los datos disponibles. Para este propósito, se utilizó como referencia la información con la escala más detallada disponible (1:50,000) para delimitar los polígonos. Enseguida, se agregó información adicional al atributo de cada polígono, incluyendo detalles sobre el origen de las rocas, el tipo de material y la permeabilidad. Este proceso permitió realizar comparaciones con los polígonos de las cartas geológicas y de aguas subterráneas de INEGI, ambas con escala 1:250,000, y agregar manualmente la información faltante a cada polígono. Cabe mencionar que algunos polígonos no eran compatibles en su totalidad, ya que presentaban delimitaciones muy diferentes a las mostradas por los polígonos de IIEG, que en ocasiones eran mucho más grandes. Para solucionar esto, se utilizó la herramienta *Split*, con la función *Trace*, para recortar los polígonos más grandes y lograr una mejor coincidencia con los de INEGI, permitiendo asignar características específicas a cada uno de los recortados.

Se utilizaron las cartas de INEGI a escala 1:250,000 para realizar comparaciones de distintos atributos. Las cartas geológicas proporcionaron información valiosa sobre el origen de las rocas, incluyendo la era, periodo y época de su formación, el tipo de roca (*e.g.*, extrusiva, sedimentaria, etc.) y el orden del polígono (*e.g.*, unidad estratigráfica, depósito o cuerpo de agua). Por otro lado, las cartas de agua subterránea suministraron datos sobre el tipo de material (consolidado o no) y la

---

<sup>4</sup> <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>

<sup>5</sup> <https://datos.jalisco.gob.mx/search/type/dataset>

<sup>6</sup> <https://iieg.gob.mx/ns/>

<sup>7</sup> <https://sigmetro.imeplan.mx/mapa>

<sup>8</sup> <https://www.inegi.org.mx/temas/>

<sup>9</sup> <http://sigat.semadet.jalisco.gob.mx/mxsig/>

<sup>10</sup> <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>

permeabilidad relativa (alta, media o baja). Gracias a esta combinación de fuentes, se logró generar una capa de geología con una alta resolución (1:50,000), que incluye una mayor cantidad de información geológica proveniente de tres fuentes distintas. En la Figura 9, se pueden apreciar las capas utilizadas para esta primera circunscripción, mientras que los resultados obtenidos durante la creación de la capa con información geológica se presentan más adelante, en el apartado de resultados.

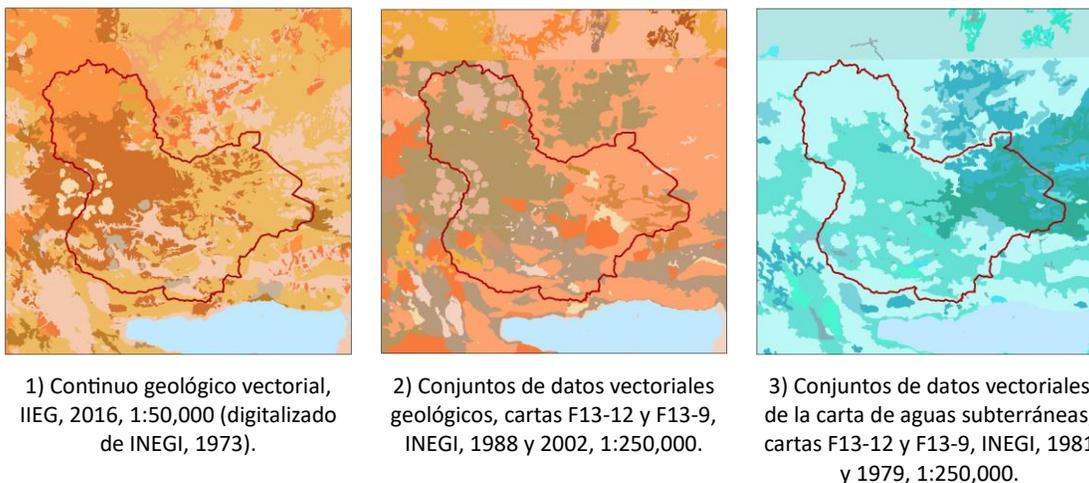


Figura 9. Información geográfica utilizada para la creación de la capa geológica con información relevante.

Para obtener datos de estratigrafía de la zona, se utilizaron los resultados de la construcción de los pozos y las pruebas de bombeo, presentados por GEOEX-SIAPA y JVC, ambos estudios del año 2003, así como los resultados de las Manifestaciones de Impacto Ambiental disponibles, principalmente del municipio de Zapopan. Esta información se analizó y procesó en *Excel* y *ArcMap* para, posteriormente, obtener los estratos de algunas zonas (véase Anexo 1. Descripción del medio físico).

#### 4.1.3.4. Edafología

La calidad de los suelos depende del tipo de rocas que los forman, del clima, de los organismos vivos, principalmente las plantas, de la geomorfología y su localización (Porta *et al.*, 2019). Para el estudio, la información edafológica se elaboró a partir de archivos vectoriales, escala 1:50,000 de las cartas digitalizadas por IIEG (2016), a partir de información de INEGI, y una carta complementaria escala 1:250,000 de INEGI (2002). Esta información sirvió para describir el medio físico y servirá para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la etapa 2 y 3 del proyecto.

#### 4.1.3.5. Datos meteorológicos

Para la determinación de tipos de clima, se utilizó un archivo vectorial (.shp) de unidades climatológicas de INEGI, donde se clasificaron los climas de acuerdo con la modificación hecha por Köppen para México (García Amaro, 1998, re-edición 2004). Además, se elaboraron rásters de temperatura, precipitación y evaporación, a partir de la información de las estaciones meteorológicas del SMN. Estas estaciones recopilan diariamente información sobre diversos parámetros, como días con granizo, niebla y tormenta, evaporación mensual, lluvia máxima en 24

horas, lluvia total diaria, temperatura máxima extrema y temperatura mínima extremas. La página del SMN proporciona datos desde marzo de 1900 hasta abril del 2020 (SMN, 2021).

Para el análisis se utilizaron los datos mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima, temperatura promedio y evaporación, correspondientes a un periodo de 29 años (1990 a 2019). Con objeto de realizar el análisis hidroclimático, se establecieron dos criterios para seleccionar las estaciones meteorológicas adecuadas: (1) Relevancia espacial, y (2) Disponibilidad de información relevante en el tiempo. Para cumplir con el primer criterio, se seleccionaron las estaciones ubicadas dentro de un radio de 15 km del AMG (véase Anexo 1. Descripción del medio físico). En relación con el segundo criterio, se tomó en cuenta la normativa "NOM-011-CONAGUA-2015. Conservación del recurso agua - Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales", donde se menciona que la información pluviométrica de la cuenca debe abarcar un periodo mínimo de 20 años. Por tanto, se seleccionaron las estaciones que contaban con al menos el 50% de la información requerida para dicho periodo (véase Tabla 1).

*Tabla 1. Estaciones seleccionadas*

Estaciones compatibles para el AMG					
Estación	Operando	Estación	Operando	Estación	Operando
14001	No	14104	Sí	14294	Sí
14002	Sí	14111	No	14295	No
14012	No	14113	Sí	14307	No
14016	Sí	14115	No	14329	Sí
14038	Sí	14121	No	14338	No
14039	Sí	14132	Sí	14351	Sí
14040	Sí	14136	Sí	14356	No
14055	No	14154	No	14362	No
14057	No	14162	No	14373	No
14065	Sí	14163	No	14379	Sí
14066	Sí	14169	Sí	14380	No
14072	Sí	14171	No	14386	Sí
14073	No	14173	No	14388	Sí
14077	No	14200	Sí	14396	Sí
14087	Sí	14278	No	14397	Sí
14088	No	14279	No		
14090	Sí	14292	No	<b>Total</b>	<b>49</b>

*Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.*

En la Tabla 2 y Figura 10, se presentan las estaciones seleccionadas. Por su parte, se descartaron 25 estaciones que no cumplían con el mínimo de 20 años de monitoreo en el periodo buscado. Como resultado, se consideraron 24 estaciones para el análisis. Dichas estadísticas se observan en la Tabla 2.



Tabla 2. Estaciones que cumplen con el histórico mínimo 20 años para el periodo de estudio.

Análisis de estaciones para el AMG			
Condición	Estaciones	Fracción	Resultado
Rechazadas	25	51%	24 estaciones utilizadas
Con información parcial	8	16%	
Con información total	16	33%	
<b>TOTAL</b>	<b>49</b>	<b>100%</b>	<b>49%</b>

Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

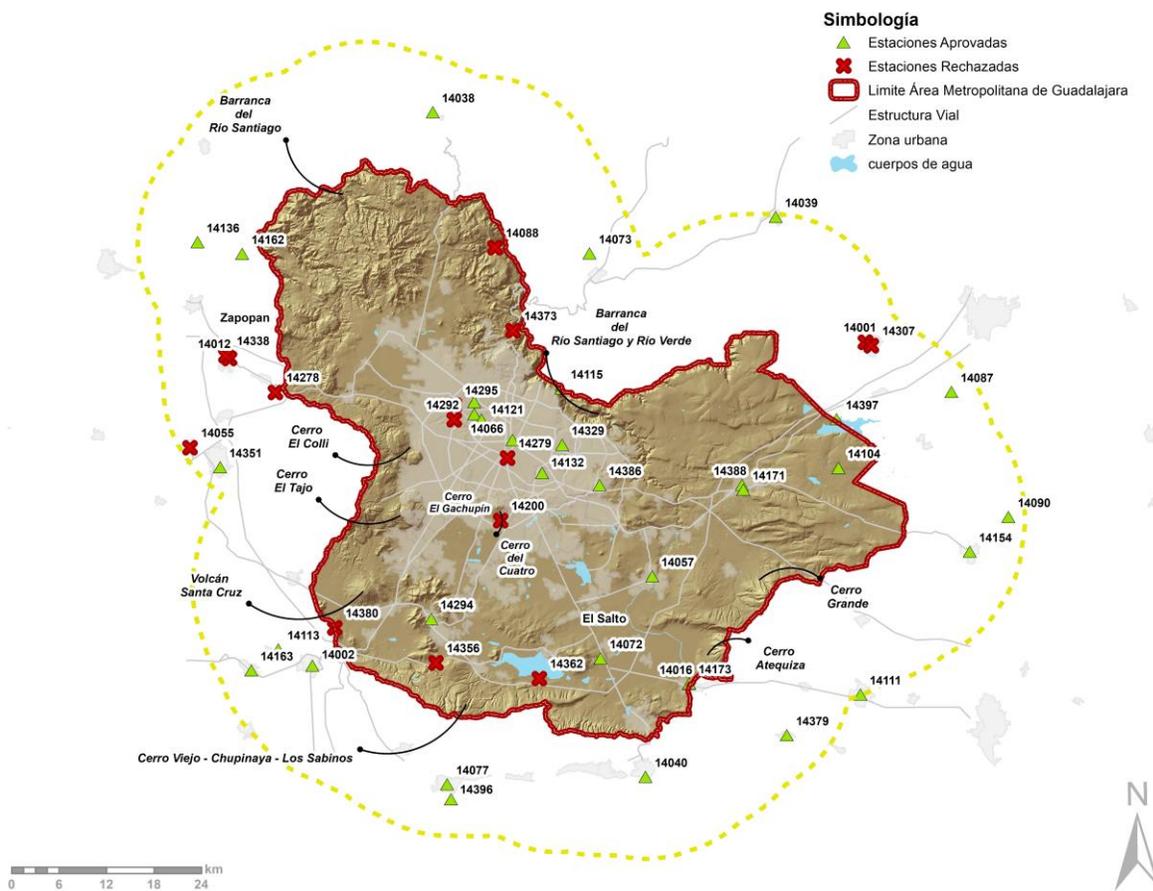


Figura 10. Mapa de las 24 de 49 estaciones meteorológicas consideradas y descartadas del AMG. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Una vez seleccionadas las 24 estaciones, se realizó un filtrado previo, eliminando los años que no contenían información relevante; es decir, aquellos años con cinco meses o menos de datos disponibles. En el caso de la variable precipitación, se verificó que se tuviera información de los seis meses correspondientes al periodo de lluvias, ya que, de lo contrario, los valores anuales no reflejarían adecuadamente la precipitación en la zona. En la Tabla 3 se detallan los porcentajes de

información mensual recopilada por estación para el periodo de 29 años, abarcando desde 1990 hasta 2019.

*Tabla 3 Porcentaje de datos mensuales en 30 años, en las 24 estaciones.*

Porcentaje de datos climáticos de 1931-2019 en el AMG					
Estación	Nombre	Evaporación	Precipitación	Temperatura	Promedio
14002	Acatlán De Juárez	99%	99%	91%	96%
14016	Atequiza	97%	97%	91%	95%
14038	Cuixtla	99%	100%	91%	97%
14039	Cuquio	83%	96%	83%	87%
14040	Chapala	100%	100%	91%	97%
14065	Guadalajara (Obs)	96%	100%	73%	89%
14066	Guadalajara (DGE)	97%	100%	91%	96%
14072	Huerta Vieja	63%	100%	85%	83%
14087	La Red	99%	99%	90%	96%
14090	La Yerbabuena	99%	99%	91%	96%
14104	Palo Verde	ND	66%	63%	45%
14111	Poncitlán	60%	64%	58%	61%
14113	Presa Hurtado	97%	98%	53%	83%
14132	Tlaquepaque	ND	99%	91%	64%
14136	Santa Rosa	83%	86%	80%	83%
14169	Zapopan	ND	91%	86%	59%
14171	Zapotlanejo (SMN)	88%	87%	83%	86%
14329	La Experiencia	97%	98%	91%	95%
14351	Tala	92%	99%	91%	94%
14379	Mezcala	77%	96%	88%	87%
14386	Tonalá	ND	82%	75%	53%
14388	Zapotlanejo (DGE)	64%	65%	60%	63%
14396	Piedra Barrenada	91%	91%	84%	89%
14397	Presa Calderón	93%	93%	85%	90%

*Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.*

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los valores para asegurarse de que no fueran inconsistentes. Aquellos valores que se encontraron anómalos, es decir, que diferían significativamente de los valores típicos (más de dos veces la desviación estándar), fueron examinados y comparados con los datos de estaciones cercanas del mismo año. Las 24 estaciones seleccionadas fueron sometidas a un proceso de relleno de datos utilizando el método de razón de valores normales. Este método se aplica cuando no se conoce el valor de la precipitación de un mes o año específico en una estación, pero se cuenta con datos del mismo mes o año en otras estaciones que son consideradas representativas debido a sus características fisiográficas y climatológicas. Mediante el cálculo de la media geométrica de las estaciones conocidas, utilizando tanto el valor de precipitación anual como el acumulado en el periodo (media aritmética), se determinaron los valores faltantes de manera precisa y confiable (HIMAT, 1990). Una vez completada la información de las 24 estaciones, se utilizó el programa ArcMap 10.8 para procesar la información y obtener modelos climatológicos (e.g., precipitación, años tipo, isoyetas, etc.). Se han empleado distintas



técnicas de interpolación<sup>11</sup> espacial para generar estos modelos. Entre las herramientas utilizadas se encuentran *IDW*, *Kriging*, *Natural Neighbor*, *Spline*, *Spline with Barriers*, *Topo to raster*, *Tendencia*, entre otras (ArcGIS, 2023B). Cada una de estas técnicas ofrece ventajas particulares según la naturaleza de los datos y la distribución espacial de los puntos de muestra, permitiendo obtener estimaciones precisas y confiables en diferentes áreas del territorio estudiado.

Para llevar a cabo las interpolaciones en ArcMap, se utilizaron los archivos shapefile de puntos de precipitación de cada año tipo, así como los promedios anuales de precipitación. Para automatizar el proceso, se empleó *ModelBuilder*, que es un lenguaje de programación visual, diseñado para crear flujos de trabajo de geoprocésamiento. Los modelos de geoprocésamiento nos permiten automatizar y documentar los análisis espaciales y la gestión de datos. Se representan como diagramas que conectan secuencias de procesos y herramientas de geoprocésamiento, utilizando la salida de un proceso como entrada de otro (ArcGIS, 2023C). La Figura 11 muestra un ejemplo de un modelo creado en el *ModelBuilder*. Para este estudio, se utilizó la herramienta *Local Polynomial Interpolation* para las interpolaciones. En esta herramienta, la variación en la interpolación depende principalmente de si se pondera o no la altitud.

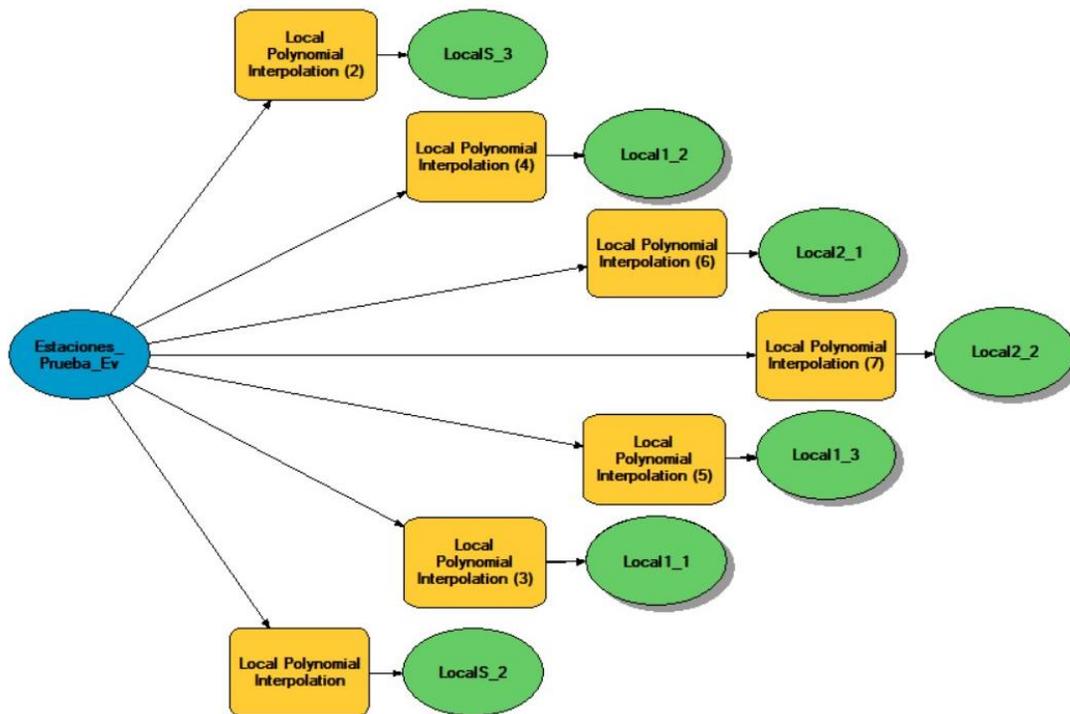


Figura 11. ModelBuilder generado para identificar la mejor interpolación con la variable precipitación. Fuente: elaboración propia, Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

En la Tabla 4 se muestran las magnitudes de error encontradas entre el punto y el resultado ráster, obtenido a través de un proceso de validación cruzada con los datos, para cada método de

<sup>11</sup> La interpolación es una técnica que permite predecir valores para las celdas de un ráster utilizando una cantidad limitada de datos de muestra. Esta herramienta puede estimar valores desconocidos de diversas variables geográficas (e.g. elevación, precipitaciones, concentraciones químicas, niveles de ruido, etc.) (ArcGIS, 2023B)

interpolación. Una vez que se generaron los datos en formato ráster, se compararon con los valores de las estaciones, como se muestra en la Figura 12.

Tabla 4. Error según método de interpolación

Métodos de interpolación							
Método	Precipitación (valor a comparar)	Precipitación (valor del ráster)	Diferencia	Método	Precipitación (valor a comparar)	Precipitación (valor del ráster)	Diferencia
Spline	884.7	1037.5	17%	Local1_3	884.7	883.7	0%
Spline	870.8	1170.7	34%	Local1_3	870.8	889.4	2%
Spline	888.5	1111.3	25%	Local1_3	888.5	947.6	7%
Local4_2	884.7	887.7	0%	Local1_2	884.7	888.2	0%
Local4_2	870.8	885.4	2%	Local1_2	870.8	888.6	2%
Local4_2	888.5	961.5	8%	Local1_2	888.5	958.3	8%
Local4_1	884.7	883.4	0%	Local1	884.7	886.2	0%
Local4_1	870.8	886.7	2%	Local1	870.8	888.5	2%
Local4_1	888.5	951.1	7%	Local1	888.5	957.6	8%
Local4	884.7	885.9	0%	Kriging	884.7	876.1	1%
Local4	870.8	884.4	2%	Kriging	870.8	896.6	3%
Local4	888.5	959.4	8%	Kriging	888.5	954.9	7%
Local3	884.7	877.8	1%	IDW	884.7	889.2	1%
Local3	870.8	2783.1	220%	IDW	870.8	925.4	6%
Local3	888.5	1026.9	16%	IDW	888.5	955.0	7%
Local2_1	884.7	878.5	1%	Local4_c	884.7	884.2	0%
Local2_1	870.8	947.4	9%	Local4_c	870.8	881.9	1%
Local2_1	888.5	973.5	10%	Local4_c	888.5	947.2	7%
Local2	884.7	875.6	1%	Local2_c	884.7	880.9	0%
Local2	870.8	951.8	9%	Local2_c	870.8	931.7	7%
Local2	888.5	971.5	9%	Local2_c	888.5	974.0	10%
Local1_4	884.7	884.0	0%	Local1_5	884.7	884.0	0%
Local1_4	870.8	887.2	2%	Local1_5	870.8	887.2	2%
Local1_4	888.5	945.2	6%	Local1_5	888.5	945.2	6%

Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

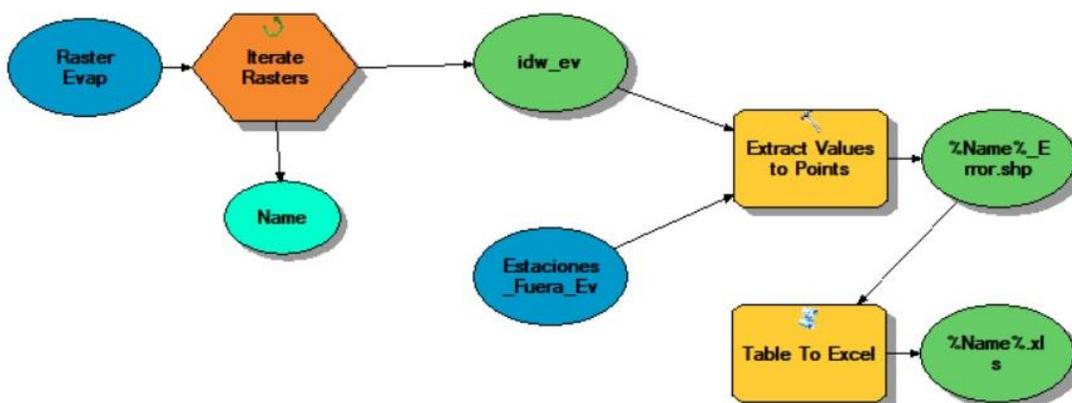


Figura 12. Model Builder Validación cruzada. Fuente: elaboración propia, Enlace Ambiental y Proyectos S.C.



Después de identificar que la herramienta *Local Polynomial Interpolation* producía el menor error, se evaluó con qué función se obtendrían los mejores resultados, como se muestra en la Tabla 5. Se puede observar que el orden 1 con la función constante de Kernel, ya sea con o sin altitud, generó los mejores resultados.

Tabla 5. Error con el método de Interpolación por polinomios locales

Interpolación por polinomios locales					
Orden	Ponderación	Control de salida	Función Kernel	Predicciones	Error
Orden 1	Sin ponderación	Suavizado <i>Smooth</i>	Cuartico	Control de predicciones y errores	3.4%
Orden 1	Sin ponderación		Exponencial		3.0%
Orden 1	Sin ponderación		Exponencial		3.2%
Orden 3	Altitud		Exponencial		78.7%
Orden 2	Altitud		Polinomial 5		6.4%
Orden 2	Altitud		Exponencial		6.6%
Orden 1	Altitud		Exponencial		3.0%
Orden 1	Altitud		Polinomial 5		3.4%
Orden 1	Altitud		Exponencial		3.3%
Orden 1	Sin ponderación		Constante		2.6%
Orden 2	Altitud		Constante		5.7%
Orden 1	Altitud		Constante		2.8%

Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

La herramienta *Local Polynomial Interpolation* se utilizó para analizar la variable precipitación, y ofreció la ventaja de incorporar la altitud mediante un método determinístico para simular barreras. Se realizó una interpolación del orden polinomial 1, utilizando el método *Smooth*, para buscar al vecino más cercano, y se eligió la función de Kernel constante. También se marcó la casilla de condición espacial al número límite para ejecutar la interpolación con las 24 estaciones. Posteriormente, se utilizó la herramienta *Arc Toolbox > Spatial analyst tools > Surface > Contour*, con intervalos de diez metros, para generar los modelos de isoyetas para la variable de precipitación. Para la variable de evaporación, se utilizó la misma herramienta, pero en este caso, se optó por la función de Kernel exponencial, debido a que mostró un porcentaje menor de error. También se utilizó la herramienta *Arc Toolbox > Spatial analyst tolos > Surface > Contour*, pero con intervalos de 50 metros, y se realizaron algunas ediciones manuales para mejorar la representación de la AMG en la capa resultante.

En cuanto a la variable de temperatura, se identificó una alta correlación logarítmica entre la pendiente y la altitud, lo que llevó a un procesamiento diferente. Se utilizó la herramienta *Arc Toolbox > Spatial analyst tools > Map algebra > Raster Calculator* para calcular la temperatura mediante la ecuación obtenida en el gradiente termométrico (Ecuación 1). Posteriormente, se utilizó la herramienta *Arc Toolbox > Spatial analyst tolos > Surface > Contour* con intervalos de 0.5 °C, para obtener el modelo de isotermas para la variable de temperatura.

$$\text{Temperatura} = \ln (\text{Altitud})$$

Ecuación 1. Gradiente Termométrico para el AMG



En esta etapa, es importante destacar que se trabajó con la información en formato ráster para generar las isoyetas y obtener los resultados necesarios. Todos los resultados obtenidos se encuentran detallados en el Anexo 1. Descripción del medio físico.

#### 4.1.3.6. Usos del suelo

La clasificación e identificación de los distintos usos del suelo y vegetación presentes en el AMG resulta crucial para determinar zonas relevantes para el estudio, como áreas de recarga o posibles fuentes de contaminación. Se refiere como “vegetación” a las unidades que representan comunidades de plantas compartiendo un espacio específico. Por otro lado, las diversas formas en que se utiliza el terreno y su cubierta vegetal, incluyendo cambios en el entorno como nuevas áreas urbanas o usos agrícolas, se denominan "usos del suelo" (SEMARNAT, 2000). Para representar el uso de suelo y vegetación se utilizó la capa de SEMADET-FIPRODEFO (2020), que cuenta con 6 categorías: agrícola, cuerpos de agua, forestal, pastizales cultivados e inducidos, suelo sin vegetación aparente, y urbano. Además, se incorporó la categoría de vegetación intraurbana, obtenida a partir de un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) generado desde una imagen satelital SENTINEL-2 del 8 de noviembre de 2022, que fue suministrada por IMEPLAN. En el contexto de este proyecto, es posible analizar mecanismos como la infiltración y posterior recarga de los sistemas hidrogeológicos, teniendo en cuenta el aumento de áreas asfaltadas en el área metropolitana.

#### 4.1.3.7. Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica explora los procesos (químicos, físicos y biológicos) que controlan la composición química del agua subterránea, la cual influencia el potencial aprovechamiento que se le pueda dar al agua (Appelo & Postma, 2010). En este rubro, se procesó una gran cantidad de información recopilada en estudios previos como GEOEX-SIAPA (2003), Hernández-Antonio *et al.* (2015), Hernández-Antonio & Mahlkecht (2014), Mahlkecht *et al.* (2017), Sánchez Díaz (2007), JVC (2003), entre otros.

Es común estudiar la hidrogeoquímica a través de los valores iónicos, mismos que fueron desplegados en diagramas de Piper y Stiff, mediante hojas de cálculo y aplicaciones de software especializado (Microsoft Excel, Google Earth y ArcGIS), con objeto de interpretar los datos previos, así como los resultados obtenidos mediante el análisis de muestras recogidas en campo. Los diagramas de Piper y Stiff son herramientas utilizadas en la hidrogeoquímica para representar y analizar la composición química de aguas subterráneas o superficiales. Estos diagramas permiten visualizar la distribución de diferentes componentes químicos y clasificar las muestras de agua en función de sus características químicas. Son especialmente útiles para identificar patrones y relaciones entre distintos iones y minerales presentes en el agua. El diagrama de Piper es una representación gráfica que muestra la composición química de una muestra de agua a través de la distribución de iones principales en una base triangular. La base triangular se divide en tres partes para representar los tres cationes principales:  $\text{Ca}^{2+}$  (calcio),  $\text{Mg}^{2+}$  (magnesio) y  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  (sodio más potasio). El vértice inferior del triángulo representa el ion calcio, el vértice superior izquierdo representa el ion magnesio y el vértice superior derecho representa el conjunto de los iones sodio y potasio. Para trazar un punto en el diagrama de Piper, se deben calcular las concentraciones molares de los iones mencionados anteriormente y ubicar el punto en el triángulo correspondiente. Además,



es común representar las concentraciones de aniones como  $\text{SO}_4^{2-}$  (sulfatos),  $\text{HCO}_3^-$  (bicarbonatos) y  $\text{Cl}^-$  (cloruros) mediante círculos fuera del triángulo, y luego conectar estos círculos con el punto correspondiente de cationes. Esto permite obtener una representación completa de la composición iónica del agua. El diagrama de Piper es útil para clasificar las muestras de agua en diferentes tipos hidrogeoquímicos, como aguas bicarbonatadas, cloruradas, sulfatadas, etc., lo que puede proporcionar información sobre la fuente y la geoquímica del agua subterránea o superficial. El diagrama de Stiff es otra herramienta gráfica utilizada en hidrogeoquímica. A diferencia del diagrama de Piper, el diagrama de Stiff representa la concentración de iones de una muestra de agua en dos ejes cartesianos perpendiculares. Un eje representa la concentración de cationes, como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , mientras que el otro eje representa la concentración de aniones, como  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Cada punto en el diagrama de Stiff representa una muestra de agua, y su posición está determinada por las concentraciones de los iones mencionados anteriormente. Esto facilita la identificación de tendencias y agrupaciones en función de la composición química. El diagrama de Stiff también se puede utilizar para observar correlaciones y relaciones entre diferentes iones, y proporciona una representación visual rápida y clara de las variaciones en la composición química del agua.

#### 4.1.3.8. Hidrología superficial

La información hidrológica se obtuvo de INEGI, específicamente de sus archivos publicados como “Red Hidrográfica”, escala 1:50,000, Edición 2.0. Dado que esta información estaba dividida en diferentes cuencas y subcuencas, fue necesario recopilar todas aquellas que pertenecieran a la región hidrológica RH12 Lerma - Santiago, que es la zona donde se encuentra el área de estudio. Esto permitió generar una sola capa que cubriera por completo el área, mediante el uso de la herramienta *Merge*. Una vez unida toda la red hidrográfica, que incluye escorrentías, arroyos, ríos, y otros cuerpos de agua, se procedió a clasificar todos los cauces según su orden y se les asignó simbología distintiva. Esto facilitó el análisis geoespacial, permitiendo visualizar y comprender mejor la distribución y jerarquía de los elementos hidrológicos.

#### 4.1.3.9. Hidrogeología

Se entiende por hidrogeología al estudio de la distribución y evolución en el tiempo del agua subterránea, de acuerdo con las estructuras geológicas regionales que se presentan en los acuíferos. El análisis de las propiedades hidrogeológicas resulta esencial para la identificación de zonas con propiedades acuíferas, zonas de recarga o vulnerables (Custodio & Llamas, 1976).

Se obtuvo información de las características hidrogeológicas de la zona de GEOEX-SIAPA (2003), JVC (2003), Vanegas-Espinosa *et al.* (2022) y cartas de aguas subterráneas de INEGI (1:250,000). La recopilación de estos datos se hizo en hojas de Excel y posteriormente se trabajó en *ArcMap*.

#### 4.1.3.10. Piezometría

La piezometría es fundamental para comprender los acuíferos en una región. Esta se define como la cota o altitud en la que se encuentra el nivel piezométrico en una zona específica, y representa el



realizar un primer filtrado de los datos crudos, se creó un archivo *shapefile* para el AMG con un radio (*buffer*) de 15 km. Luego, se aplicó la herramienta *Clip* para retener los datos dentro de esta área, obteniendo 39 puntos para modelar manualmente el nivel y flujo piezométrico en el AMG. No obstante, la altitud de los pozos de la información de CONAGUA no estaba disponible, por lo que se estimó usando curvas de nivel de las cartas topográficas de INEGI a escala 1:50,000. Con estos valores estimados, se generó el modelo de elevación del nivel piezométrico a nivel AMG (véase Figura 14). Sin embargo, este segundo modelo reveló inconsistencias, como fechas de medición diferentes y pocos registros en el AMG (16 pozos). Para mejorar la comprensión de los sistemas hidrogeológicos, es necesario comparar estos resultados con factores abióticos como geología (*e.g.*, tipo de roca, fallas, fracturas), hidrografía (*e.g.*, manantiales) y orografía (*e.g.*, valles, montañas, llanuras), mejorando así la precisión de los modelos.

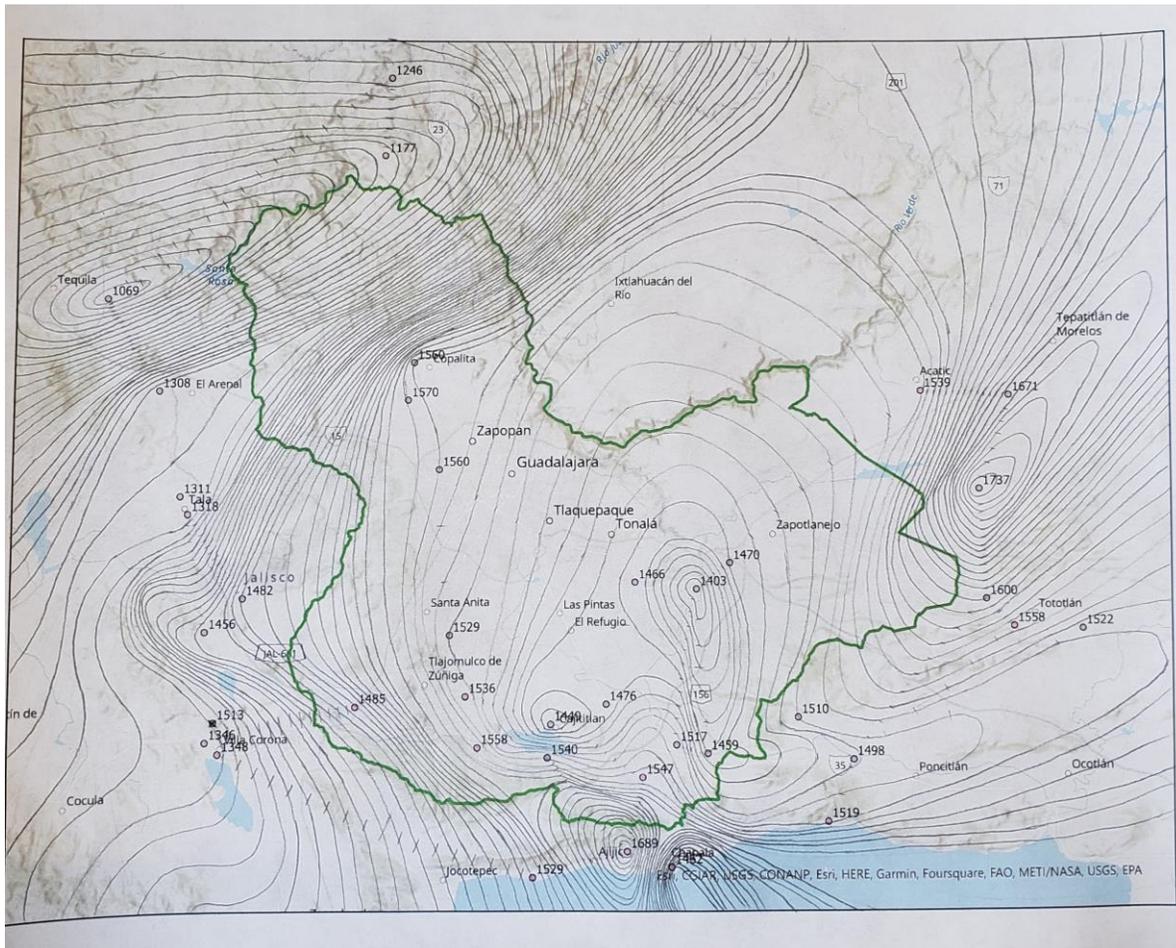


Figura 14. Mapa de isopiezas, hecho a mano, a partir de los datos obtenidos de CONAGUA (AMG, 1996-2004).

Para calibrar el modelo manual de isopiezas, se usaron las cartas de aguas subterráneas de INEGI para las áreas relevantes del proyecto (F13-09 y F13-12), publicadas en 1979 y 1981. Se enfocó en la capa "aprovechamientos muestreados", que contiene datos de manantiales con cota topográfica igual a cota piezométrica. Sin embargo, manantiales muestreados por INEGI no tenían registros de altitud. Por lo tanto, fue necesario relacionarlos con las curvas de nivel en las cartas topográficas de INEGI y agregar una altitud en la tabla de atributos. Este paso fue esencial para calibrar el modelo



de isopiezas manual del AMG, permitiendo su comparación con otros factores ambientales en la región.

Para obtener modelos con mayor exactitud, se utilizó información geográfica recopilada de pozos registrados por SIAPA y otras dependencias hasta 2018, proporcionada por IMEPLAN. Se contó con 244 pozos con profundidad del nivel estático. Repitiendo el procedimiento mencionado, se calculó la altitud y altitud piezométrica de cada pozo. Se incorporaron datos cartográficos relevantes como pozos adicionales del REPDA (2018), registros de la zona hidrogeológica Tesistán-Toluquilla de INEGI (2012), más datos de manantiales de la misma zona hidrogeológica de INEGI, junto con cartas de geología (1971) y aguas superficiales (1986) de INEGI. Tras estimar las cotas piezométricas, se verificó la georreferenciación de todas las capas al sistema de coordenadas *WGS 1984 UTM Zona 13N* y se depuraron los registros sin información. Luego, se fusionaron todos los puntos (pozos y manantiales) utilizando la herramienta *Merge*, conservando altitud del nivel piezométrico y la fuente bibliográfica. Se creó una única capa con toda esta información, la cual se usaría para modelar. Utilizando las delimitaciones preliminares de los sistemas hidrogeológicos, se separaron los puntos por sistema, con el objetivo de demostrar su funcionamiento independiente. Las modelaciones se hicieron en *ArcGIS Pro*, donde se modeló cada conjunto de pozos y manantiales por sistema, usando herramientas de interpolación con: *IDW*, *Kriging*, *Spline*, *Topo to Raster* y *Spline with Barriers*, con celdas de 10 metros por lado, y *Contour*, para generar isopiezas con intervalos de 10 metros.

Después de las primeras modelaciones piezométricas, se detectaron formas inusuales en los trazos de las isopiezas en los sistemas Cajititlán y Los Altos, lo que motivó una revisión detallada de sus delimitaciones. En Los Altos se identificaron zonas al norte (entre el sistema y el río Verde) con Toba Tala y alta permeabilidad, que no habían sido incluidas, debido a que están rodeadas por basaltos poco permeables. En cambio, Cajititlán mostró un flujo dual (presentaba un flujo hacia el norte y otro hacia el oriente), llevando a dividirlo en dos sistemas (Cajititlán e Ixtlahuacán de los Membrillos), redefiniendo límites y reiniciando las modelaciones. La precisión de los modelos depende de la cantidad y calidad de la información disponible. Se recibió información adicional de diversas fuentes, algunas actualizadas de IMEPLAN (2021), Mahlkecht *et al.* (2017), INEGI, GEOEX-SIAPA (2003) y JVC (2003). Toda esta información fue tratada para eliminar valores anómalos. Se recopilaron un total de 914 puntos con datos útiles, 601 dentro del área de estudio. Las visitas a municipios del AMG: El Salto, Guadalajara, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán, San Pedro Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga, Tonalá, Zapopan y Zapotlanejo, proporcionaron datos y enriquecieron la base de pozos (véase **ANEXO 3. TRABAJO DE CAMPO**).

En algunos casos, la información recopilada fue limitada, lo que llevó a la clasificación de pozos según la cantidad y calidad de datos disponibles. Discrepancias entre valores de entidades y los medidos llevaron a una última modelación más precisa, usando datos recientes (<10 años) ante posibles cambios en el comportamiento hidrogeológico a lo largo de las décadas.

Los pozos se reorganizaron, según su vinculación con cada sistema, y se usó la herramienta *Spline with Barriers* para modelar la piezometría en cada sistema hidrogeológico. Durante este proceso, se identificaron anomalías puntuales, que llevaron a eliminar datos poco precisos. De este modo, se generaron modelos de interpolación (véase Figura 15) renovados junto a sus correspondientes isopiezas, generadas con la herramienta *Contour*. Los resultados se contrastaron con las características geográficas, hidrográficas y topográficas de los sistemas y sus alrededores, resultando

en las más aproximadas y precisas. Por ejemplo, en los sistemas cercanos al Río Santiago se destacó un patrón evidente de descenso del nivel piezométrico conforme se acerca al curso del río.

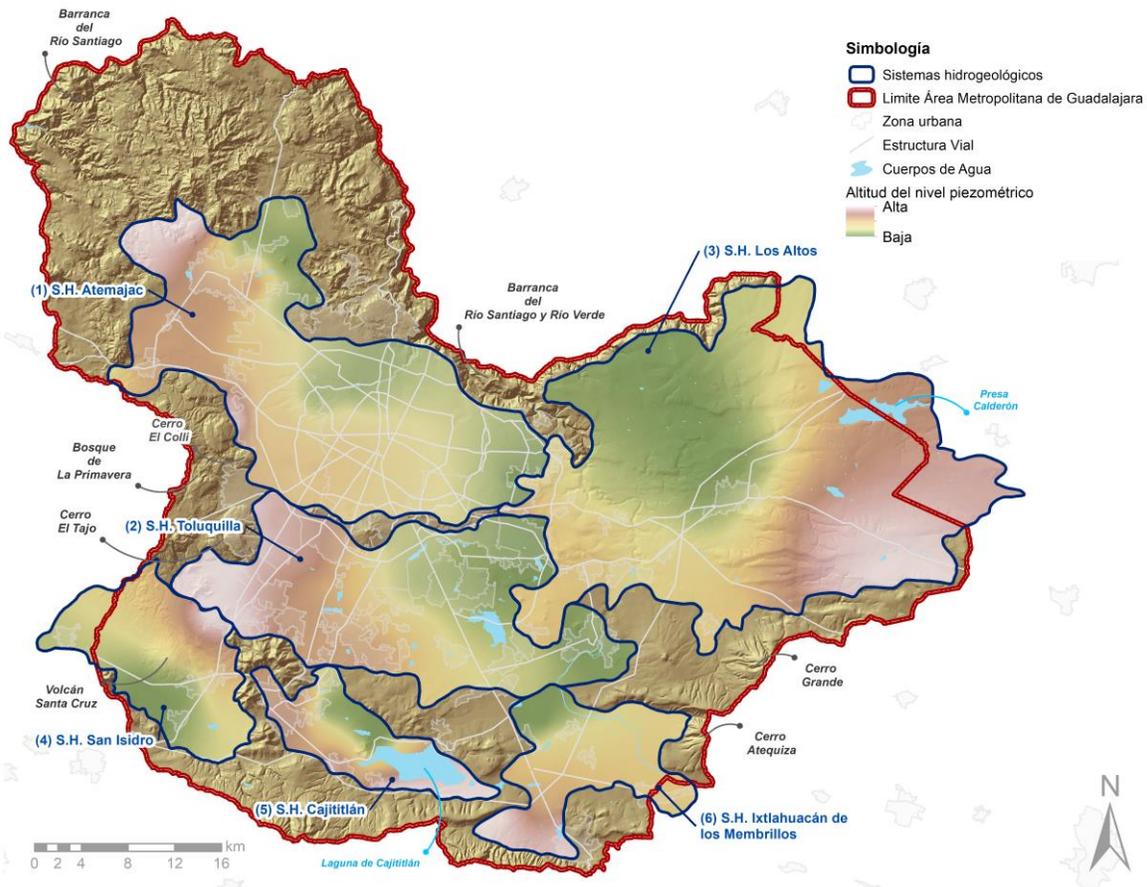


Figura 15. Modelaciones piezométricas de los seis sistemas hidrogeológicos.

Tras obtener el nuevo conjunto de isopiezas por sistema hidrogeológico, se requirió una edición para mejorar su comprensión y representar de manera más general el movimiento del agua subterránea. Se exploró la posibilidad de conectar las líneas con iguales valores de altitud del nivel piezométrico, reajustando algunas isopiezas, pero manteniendo su dirección original en la medida de lo posible. Este enfoque permitió reducir la cantidad de isopiezas repetitivas y aisladas generadas durante la modelación, resultando en una representación más homogénea del flujo subterráneo y contribuyendo a la comprensión del funcionamiento del sistema hidrogeológico. Además, se editaron ciertas irregularidades, empleando la herramienta *Smooth* con una tolerancia de 15 km. El resultado fue un trazo mucho más suave y armónico en las isopiezas, añadiendo coherencia visual y mejorando la interpretación general de los resultados (véase Figura 16).



Figura 16. Isopiezas suavizadas para los seis sistemas hidrogeológicos del AMG.

Para visualizar el sentido del flujo mostrado en las modelaciones de piezometría, se agregaron flechas ortogonales a las isopiezas generadas. Estas flechas se incorporaron como archivos vectoriales independientes, trazados a mano. Este enfoque permitió una mejor apreciación de la dirección del flujo de agua subterránea en cada sistema hidrogeológico (véase Figura 17). En algunos casos, estas flechas coincidieron con la topografía e hidrografía de la región, respaldando la fidelidad de las modelaciones. Es esencial resaltar la relevancia de esta sección, dado que aquí se origina una variable importante para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los sistemas hidrogeológicos. Además, la piezometría contribuye de manera significativa a obtener una comprensión precisa y actualizada del funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos que suministran agua al AMG.



Figura 17. Isopiezas con flechas ortogonales que indican el sentido del flujo para los seis sistemas hidrogeológicos del AMG. Fuente: elaborado por Enlace Ambiental y Proyectos.

#### 4.1.4. Área de estudio

El área de estudio se conforma por el AMG. De acuerdo con las delimitaciones administrativas<sup>15</sup> de CONAGUA, la mayor superficie de la zona se encuentra dentro de los polígonos de los Acuíferos: Altos Jalisco, Atemajac, Toluquilla, Cajititlán, Arenal y San Isidro, que delimitan, en gran medida, el área de interés, observando solamente un pequeño porcentaje del AMG que se encuentra dentro de los acuíferos Poncitlán, Huejotitlán, Ameca, Chapala, Cuquío, Ocotlán y San Martín de Bolaños (véase Figura 18).

No se consideró necesario ampliar la zona de estudio más allá del AMG, debido a que, al evaluar las características, se concluyó que se encuentra delimitada por elementos físicos que actúan como límites naturales, mismos que fueron respetados al establecer los límites municipales. Es decir, que el área metropolitana se encuentra delimitada por barreras naturales, topográficas, geológicas (fallas y fracturas) y por parámetros hidrogeológicos que hacen su circunscripción un área de estudio apropiada para este primer planeamiento.

<sup>15</sup> Según la CONAGUA, todo el territorio mexicano está considerado como acuífero, con diferentes atribuciones de carácter administrativo, es decir, que estas delimitaciones administrativas denominadas “acuíferos” no contemplan las características litológicas del territorio.

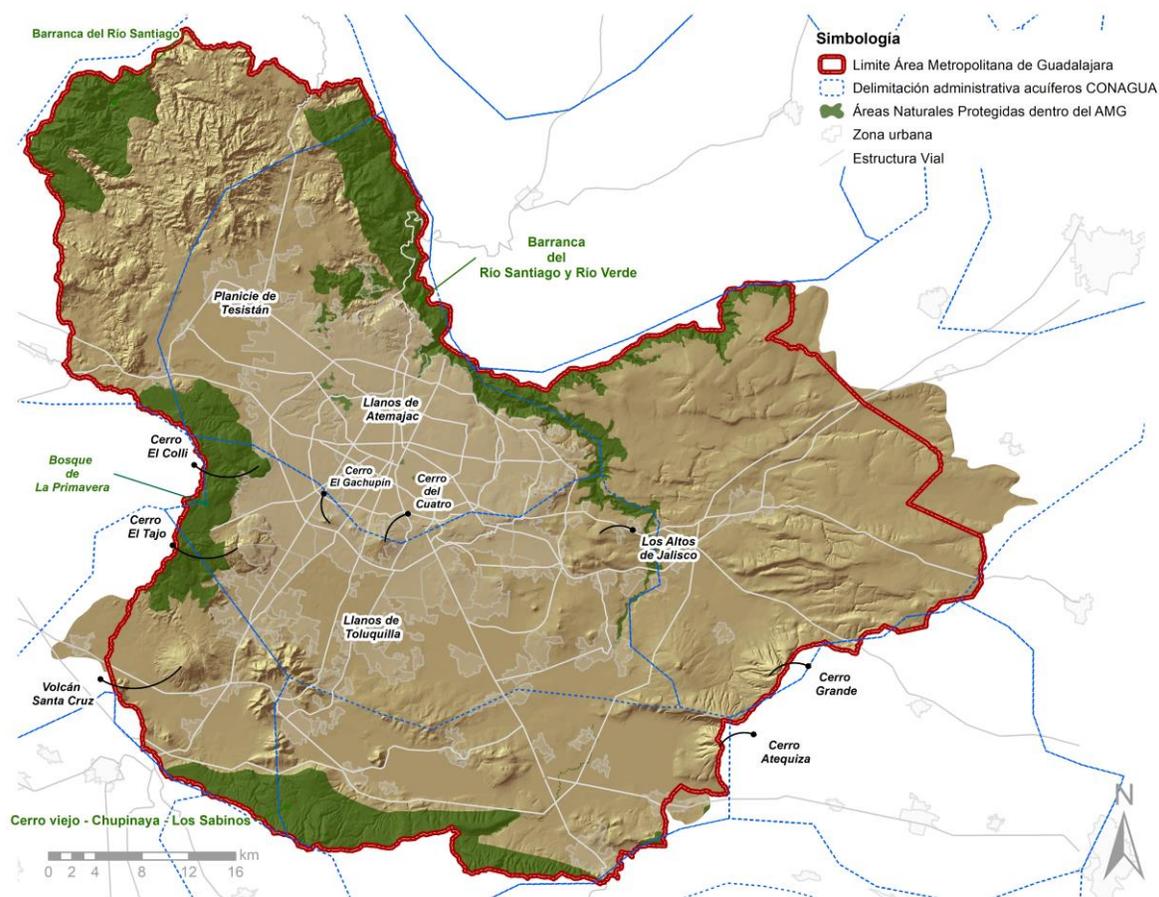


Figura 18. Mapa de la delimitación del área de estudio. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

En cuanto al relieve del AMG y sus cauces naturales, se puede observar que se encuentra delimitada por diferentes formaciones topográficas, observando que en todos los extremos se puede identificar una conformación rocosa que termina en el centro de Guadalajara como un valle (Barrera Rodríguez & Zaragoza Vargas, 2003):

- Al norte: Barranca de los ríos Santiago y Verde
- Al noroeste: Sierra de Tesistán y Barranca del río Santiago
- Al oeste: Área Natural Protegida del Bosque de La Primavera, anteriormente una caldera volcánica
- Al sur: Cerro Viejo-Chupinaya-Los Sabinos
- Al este: Altos de Jalisco, parte de las estructuras de la Sierra Madre Occidental
- Al centro: Planicie de Tesistán, de los llanos de Atemajac (erróneamente llamado valle de Atemajac) y los Llanos de Toluquilla

La Sierra de Tesistán se compone por montañas riolíticas, conformadas de rocas ácidas y de origen volcánico, y cuerpos efusivos, formados entre el Oligoceno Superior y Mioceno Superior (Barrera Rodríguez & Zaragoza Vargas, 2003). Además, en las inmediaciones del AMG se tiene una formación llana con componentes riolíticos y ácidos.



Las fallas y fracturas existentes pueden suponer barreras o vías preferenciales para la circulación del agua, ya que, se generan distintos comportamientos en función de los diferentes materiales y su permeabilidad en cada lado de la falla. También los diques, cavidades, rellenos arcillosos, entre otros, dependiendo de su construcción y propiedades, pueden ser barreras para el flujo de agua subterránea. (González de Vallejo *et al.*, 2002; Maliva, 2016; Barrera Rodríguez & Zaragoza Vargas, 2003).

## 4.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo ha sido esencial para complementar y verificar la información bibliográfica y cartográfica recopilada, así como para generar nuevos datos con mayor precisión de los puntos de interés. Estos datos han sido de gran ayuda para los análisis posteriores de hidrogeoquímica y piezometría.

La recolección de muestras de agua subterránea tiene como propósito proporcionar datos representativos acerca de la calidad, cantidad y propiedades de los sistemas hidrogeológicos (IGME, 2002). Dado que resulta inviable abordar todas las variables en la caracterización de un sistema hidrogeológico, es esencial tomar muestras que den una idea general de su comportamiento (IDEAM, 2013). Para obtener más información sobre el trabajo de campo, se puede consultar el apartado de anexos (véase [ANEXO 3. TRABAJO DE CAMPO](#)).

### 4.2.1. Acompañamiento municipal

Se estableció comunicación con los municipios que no forman parte de la demarcación de SIAPA con el propósito de recabar información sobre sus pozos abastecimiento. Durante las reuniones presenciales con los encargados de agua en cada municipio, se gestionó de manera específica la obtención de la información necesaria y se solicitó su colaboración para el trabajo de campo. Dado que la posibilidad de llevar a cabo visitas a los pozos dentro de sus jurisdicciones depende de la colaboración de los ayuntamientos, se organizó un calendario de muestreo en función de las respuestas proporcionadas por los encargados de cada pozo (véase *Figura 19*).

## TRABAJO DE CAMPO

Inicio: 29 de mayo 2023  
Fin: 4 de julio de 2023



Figura 19. Diagrama del proceso del trabajo de campo. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

### 4.2.2. Selección de puntos de muestreo

Para la selección de los puntos de muestreo se tomaron en cuenta los siguientes lineamientos:

1. Distribución espacial adecuada de los puntos en cada sistema hidrogeológico.
2. Revisión de la accesibilidad al punto y toma de muestras.
3. Disponibilidad de información reciente del punto.
4. Pozos de extracción existentes, con información de su infraestructura, niveles, calidad de agua, entre otros. Entre más información se tenga, más propenso es para su selección.
5. Evaluación de la ubicación del punto y actividades cercanas que puedan ser potenciales fuentes de contaminación, aguas arriba de la zona de interés.
6. Cercanía a cuerpos de agua superficiales, como manantiales, norias, nacientes y ríos, que puedan tener relación con el sistema hidrogeológico analizado.

Se escogieron 29 pozos de abastecimiento que cumplieran con los lineamientos de selección, para llevar a cabo los muestreos.

### 4.2.3. Campañas de muestreo

Se llevaron a cabo visitas a los municipios del AMG: Juanacatlán, Ixtlahuacán de los Membrillos, Zapotlanejo, El Salto, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tlajomulco, Guadalajara y Tonalá, del 9 de junio al 8 de agosto, con el objetivo de llevar a cabo muestreos de algunos de sus pozos de abastecimiento. Con el fin de asegurar una representación adecuada de los sistemas hidrogeológicos, se seleccionaron un total de 29 pozos. Estos pozos se distribuyen de la siguiente manera: cinco pozos en el S.H. Los Altos, tres pozos en el S.H. Ixtlahuacán de los Membrillos, tres en

el S.H. Cajititlán, dos en el S.H. San Isidro y seis para el S.H. Toluquilla y diez para el S.H. Atemajac (véase Figura 20).

Las campañas de muestreos se llevaron a cabo durante la época de estiaje, que generalmente abarca desde octubre a mayo, e incluso se extiende a junio en algunas ocasiones. Realizar los muestreos en este período favorece a obtener parámetros más representativos, dado que durante esta temporada no se producen fases de dilución en el sistema de aguas subterráneas. Esto permite distinguir las diferentes familias de agua, sin influencia del agua de lluvia. En cada pozo, se midió el nivel piezométrico y se tomaron mediciones *in situ* de propiedades fisicoquímicas (*i.e.*, pH, conductividad, temperatura y concentración de arsénico). Para ello, se emplearon dos equipos multiparamétricos portátiles, un termómetro y un kit de detección de arsénico. Las muestras de agua se tomaron en recipientes nuevos, siguiendo procedimientos que incluyen el llenado de cadena de custodia, etiquetado adecuado de muestras y luego se almacenaron en frío (4°C). Además, se implementaron blancos de campo, que son envases de agua desionizada que se incluyen en las muestras enviadas al laboratorio para identificar posibles fuentes de contaminación y asegurar la calidad del muestreo.

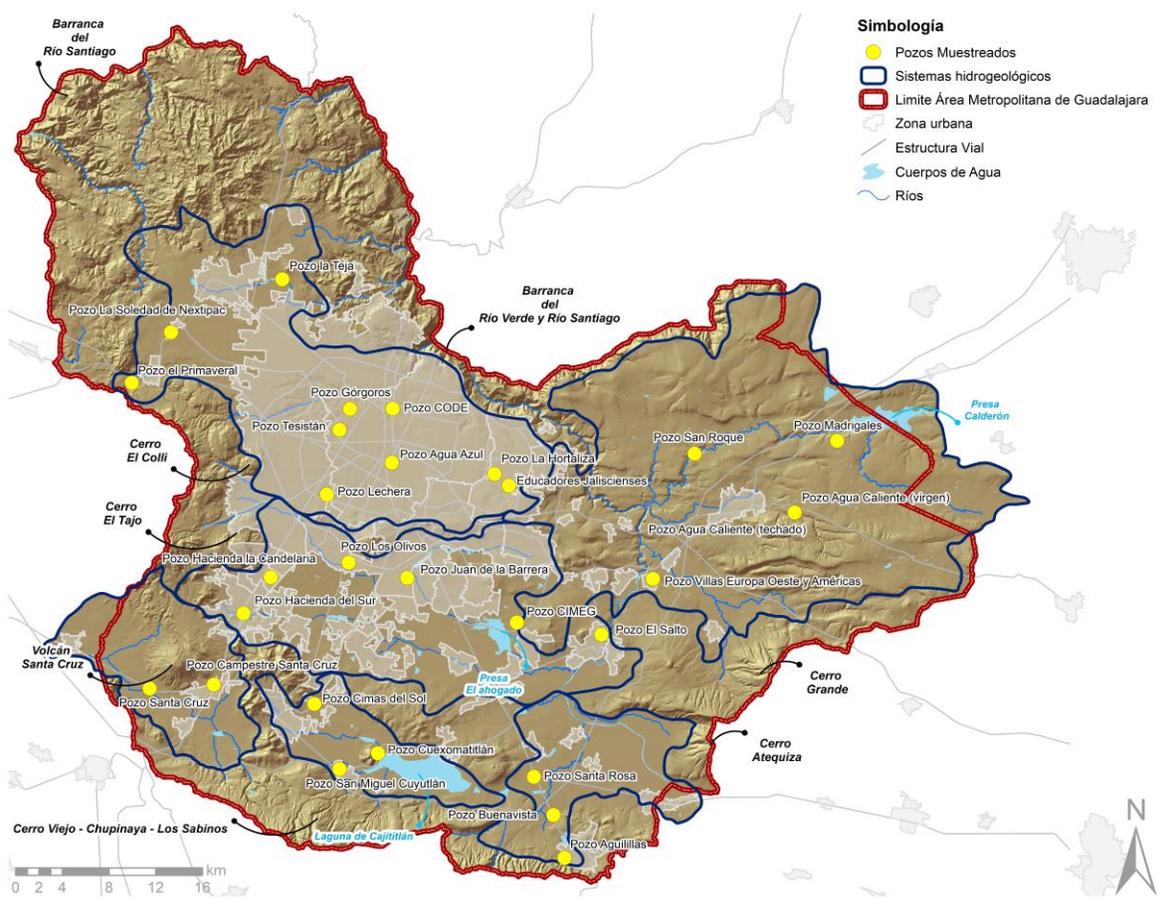


Figura 20. Pozos muestreados por sistema hidrogeológico. Elaboración propia: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

### 4.3. Trabajo de laboratorio

Las muestras recolectadas durante el trabajo de campo fueron entregadas a un laboratorio certificado ante la Entidad Mexicana de Acreditación, número AG-111-017/12, y ante CONAGUA, número de aprobación CNA-GCA-2456. Tras entregar las muestras al laboratorio, se esperó un periodo de dos semanas para recibir los resultados de forma paulatina. Una vez obtenida la información, se llevó a cabo un proceso de análisis de datos y comparación de los resultados con la bibliografía de hidrogeoquímica previamente recopilada.

Las variables que se analizaron en laboratorio fueron: concentraciones de calcio, magnesio, sodio, potasio, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, cloro libre, nitratos, al igual que conductividad eléctrica y pH.

### 4.4. Delimitación de sistemas hidrogeológicos

Se analizaron diversas metodologías utilizadas para definir sistemas hidrogeológicos de forma especial, con el fin de utilizar las referencias más adecuadas. Se consultaron artículos, informes técnicos y trabajos académicos (*e.g.*, tesis, libros, reportes), que han utilizado diferentes enfoques para delimitar territorios, en función de sus características hidrogeológicas. Posteriormente, se recopiló, estandarizó y procesó la información relevante para la delimitación espacial de los sistemas hidrogeológicos. Cada uno de estos artículos adaptó metodologías en función de las particularidades de sus áreas de estudio propuestas, ya que cada región presenta características distintas (véase Tabla 6). Por lo tanto, se extrajeron y consideraron factores relevantes de cada una de estas metodologías para adaptarlos a las particularidades del AMG y desarrollar así una metodología propia y ajustada al contexto local.

Tabla 6. Bibliografía consultada para la elaboración de una metodología propia. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Fuente	Metodología
<b>(El Bouqdaoui &amp; Achib, 2018)</b>	Análisis del perímetro de protección - Método basado en las características hidrogeológicas del lugar. Busca la integración de variables geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas, para mejorar la precisión de los resultados. Con ello, se modela el flujo de agua subterránea, incluyendo dirección, velocidad, trayectos, etc.
<b>(Escolero <i>et al.</i>, 2000)</b>	Estudiar las características hidrogeológicas presentadas en la literatura, para determinar las áreas con mayor vulnerabilidad de la región. Entre estas variables se encuentran permeabilidades, estructuras geológicas y la influencia antropogénica.
<b>(Russell &amp; Stivers, 2020)</b>	Modificar el marco hidrogeológico existente para describir la naturaleza de cada unidad hidrogeológica. Las características modificadas y estudiadas incluyen datos topográficos, estratigrafía, estructuras litológicas y geológicas lineales, y permeabilidades. Con

Fuente	Metodología
	ello, se modeló la posible estructura de los acuíferos en dos y tres dimensiones.
<b>(Rizo-Decelis, 2017)</b>	Se localizaron las zonas con mayor potencial para clasificarse como acuíferas, por medio del análisis y comparación de información relacionada con hidrología subterránea (litología, consolidación, zonas saturadas y no saturadas, etc.), contactos geológicos (estratigráficos, fallas), ubicación de manantiales, mapas hidrogeológicos y geológicos, y sondeos (pozos), por mencionar los más importantes.
<b>(Hernández-Antoniot &amp; Mahlkecht, 2014)</b>	Se tomaron muestras de agua subterránea, a las cuales se les hicieron análisis de calidad del agua, con el fin de obtener una correlación entre la hidroquímica, la profundidad y la distribución geoespacial. Con ello, se clasificaron las aguas en grupos y se demostró que existe una interacción entre los sistemas termales y fríos debajo del AMG.
<b>(Hernández-Antonio et al., 2015)</b>	Primero se realizaron muestreos de agua en distintos pozos representativos de la región y se analizaron químicamente para su posterior análisis. Después, se clasificaron los puntos de muestreo según sus características hidroquímicas, y se calibraron los modelos con información publicada. Estos modelos se corrieron en softwares especializados, y se generaron resultados del funcionamiento hidrogeológico.
<b>(Morán-Ramírez et al., 2016)</b>	Se utilizan modelos de evolución geoquímica para la evaluación de los procesos químicos que suceden en los acuíferos del AMG. Dicho modelo ayuda a generar un modelo conceptual, así como a estimar el flujo de agua subterránea y sus interacciones con el entorno, y determinar la influencia antropogénica en los recursos naturales hídricos.

Se presenta, a continuación, un esquema de la metodología seguida para delimitar los sistemas hidrogeológicos (véase Figura 21).

## Delimitación de sistemas hidrogeológicos



Figura 21. Esquema del proceso metodológico propuesto para la delimitación de los sistemas hidrogeológicos. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos S.C.



Para definir los sistemas hidrogeológicos se aplicó el enfoque propuesto por El Bouqdaoui & Aachib (2018). Dicho enfoque enfatiza la relación entre la precisión de la modelación y la cantidad de parámetros hidrogeológicos considerados en el entorno. En consecuencia, se tomaron diversas características del AMG, como el tipo de roca, topografía, hidrografía y permeabilidad, siendo esta última un factor fundamental en la delimitación de las zonas hidrogeológicas. Se dio prioridad a características geológicas, debido a su importancia en diversas metodologías, como las de Escolero *et al.* (2000), Russell & Stivers (2020) y Rizo-Decelis (2017). Además, Morán-Ramírez *et al.* (2016) y Hernández-Antonio *et al.* (2015) enfatizan la importancia de considerar la hidrogeoquímica y aspectos litológicos (*e.g.*, tipo de roca, fallas y fracturas).

Una vez recolectada la información geográfica clave, se creó un mapa inicial para la delimitación preliminar de los sistemas hidrogeológicos, utilizando la demarcación administrativa de los acuíferos de CONAGUA. Aunque esta no considera las propiedades hidrogeológicas, fue útil como punto de partida para la recopilación de información y caracterización posterior (Rizo-Decelis, 2017; CONAGUA, 2005; CONAGUA, 2019). En este mapa se incorporó información de múltiples fuentes como las cartas geológicas (IIEG, escala 1:50,000), permeabilidades de las cartas de agua subterránea (INEGI, escala 1:250,000), red hidrográfica (INEGI, escala 1:50,000) y cartas topográficas (INEGI, escala 1:50,000). Además, se añadieron manantiales e información de pozos de diversas fuentes, como SIAPA, REPDA (2011), aquellos proporcionados por IMEPLAN, correspondientes a la primera etapa del Estudio de Aguas Subterráneas, elaborado por la Universidad de Guadalajara, y de investigaciones previas como Hernández-Antonio & Mahlknecht (2014), Hernández-Antonio *et al.* (2015) y Morán-Ramírez *et al.* (2016). El objetivo de este mapa fue establecer una división preliminar de los sistemas hidrogeológicos del AMG. Para ello, se realizó un análisis minucioso de cada variable y se obtuvieron, preliminarmente, cinco sistemas con propiedades acuíferas: Los Altos, Atemajac, Toluquilla, Cajititlán y San Isidro; manteniendo en cuenta que los sistemas deben tener la capacidad de almacenar y transmitir agua a una tasa aprovechable. Se identificaron también áreas que no cumplen con las características necesarias para ser consideradas sistemas hidrogeológicos, por cuestiones como el tipo de roca, permeabilidad, pendiente y ubicación de pozos de extracción. La propuesta preliminar de estos sistemas se puede observar en la Figura 22. Los cinco sistemas se catalogaron como “sistemas hidrogeológicos”, y conservaron los nombres asignados por CONAGUA a sus respectivas divisiones administrativas (denominadas inadecuadamente “acuíferos”, como ya se ha destacado) para facilitar la transición de una demarcación administrativa hacia una delimitación hidrogeológica de acuíferos.

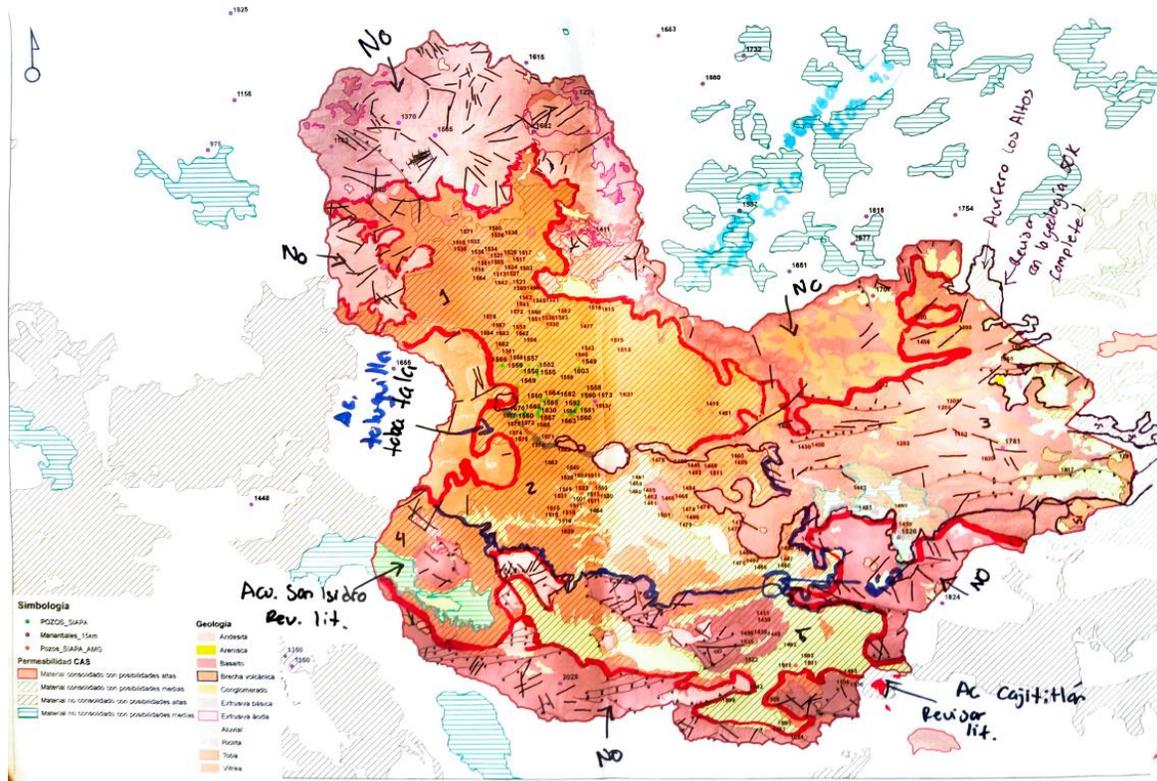


Figura 22. Delimitación preliminar hecha a mano. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos. S.C

Una vez finalizada la delimitación preliminar a mano, se vectorizó, analizó y procesó la información plasmada, con el fin de mejorar la precisión de los polígonos. Se llevó a cabo un nuevo "recorte" de todos los sistemas hidrogeológicos, con ayuda de la herramienta *Reshape*, lo que permitió un análisis detallado y fundamentado para incluir o excluir áreas relevantes en cada sistema. Posteriormente, se utilizaron herramientas como *Generalize* y *Smooth* para suavizar los polígonos y lograr una mayor uniformidad en sus fronteras. Finalmente, se decidió conservar los resultados obtenidos con *Smooth*, utilizando una tolerancia de 2,000 metros, resultando en la creación de los polígonos preliminares de los sistemas hidrogeológicos. De manera simultánea, se realizó una revisión de estudios e información hidrogeológica, con el objetivo de obtener resultados más precisos. Además, se desarrollaron modelos piezométricos que permitieron identificar los flujos de cada sistema. Durante este análisis, se identificaron anomalías en el sistema Cajititlán, ya que en la parte oeste mostraba un claro flujo general del nivel piezométrico en dirección sur a norte, mientras que la parte este presentaba un curso del agua subterránea hacia el noroeste (véase Figura 23). Esta variación en el sistema llevó a la decisión de separarlo en dos sistemas independientes, considerando las características litológicas e hidrográficas de la región, lo que resultó en los nuevos sistemas hidrogeológicos de "Cajititlán" e "Ixtlahuacán de los Membrillos".

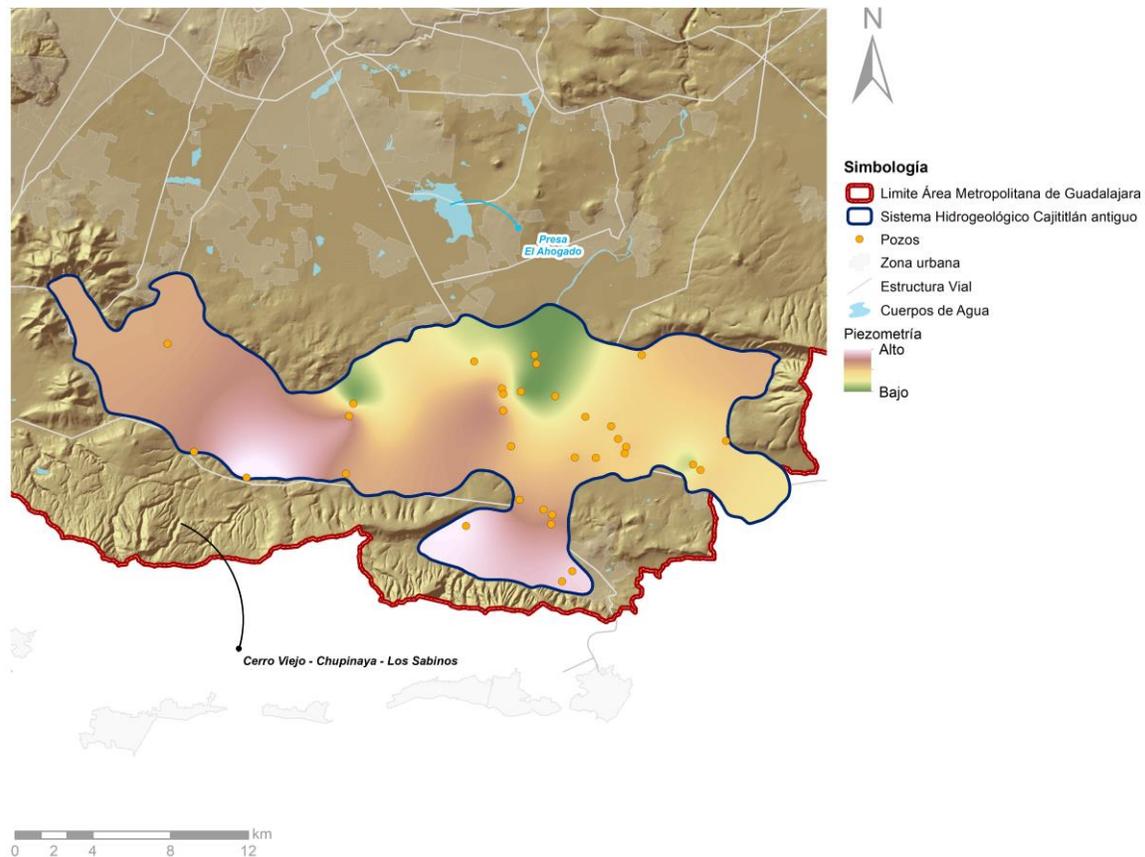


Figura 23. Modelación piezométrica del sistema Cajititlán.

Dentro de la nueva delimitación de los sistemas hidrogeológicos “Cajititlán” e “Ixtlahuacán de los Membrillos” se excluyó una zona ubicada en el centro del antiguo acuífero "Cajititlán", adyacente a la laguna del mismo nombre, la cual estaba conformada por roca basáltica con permeabilidad relativamente baja. La frontera entre la laguna y estos basaltos se utilizó para establecer el límite oriental del nuevo sistema hidrogeológico "Cajititlán", el cual ahora tiene una extensión menor de 98 km<sup>2</sup>. Es importante mencionar que, para todas las nuevas delimitaciones establecidas, se utilizaron las herramientas de ArcMap, como *Reshape* y *Edit vertices*, con el apoyo de la función *Trace* en cada una de ellas. Además, una vez recortadas las nuevas formas, se aplicó la herramienta *Smooth* con los mismos parámetros considerados anteriormente, tomando precauciones para evitar superposiciones con los antiguos sistemas hidrogeológicos y evitar problemas en futuras modelaciones.

La delimitación final de los sistemas hidrogeológicos del AMG resultó en seis componentes con propiedades acuíferas: Los Altos, Atemajac, Toluquilla, Cajititlán, Ixtlahuacán de los Membrillos y San Isidro. Como se ha mencionado, cada uno de estos cuenta con la capacidad de almacenar y transmitir agua a una tasa aprovechable.

## 4.5. Elaboración de cartografía de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea

La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del agua subterránea se refiere a la posibilidad de que los contaminantes penetren en el subsuelo y afecten la calidad del agua en los sistemas hidrogeológicos. Estos presentan, naturalmente, cierta capacidad de atenuación ante los contaminantes, gracias a diversos mecanismos físicos, químicos y/o biológicos que ocurren en el suelo, en la zona no saturada y la zona saturada. Por lo tanto, la susceptibilidad de un acuífero es inversamente proporcional a su capacidad de proteger el agua subterránea (Faybishenko *et al.*, 2015; Chenini *et al.*, 2018; Foster & Hirata, 1988; Maliva, 2016). Dado que los acuíferos son una fuente esencial para el abastecimiento de agua potable en muchas regiones, se resalta la importancia de comprender y evaluar su vulnerabilidad frente a distintas fuentes de contaminación, con el fin proteger y asegurar la calidad del agua subterránea (UNESCO, 2022; IMEPLAN, Resilient Cities Network, 2022). La cartografía de vulnerabilidad se presenta como una herramienta para delimitar el territorio en zonas donde, en caso de ocurrir un episodio de contaminación, podría afectar al agua subterránea (Rizo-Decelis, 2017). Para ello, se eligieron las metodologías de GOD y DRASTIC, las cuales se adaptaron a las características del área de estudio, con el propósito de entender cómo pueden ser empleadas para evaluar los recursos hídricos subterráneos en una zona de gran importancia como el AMG.

### 4.5.1. Método GOD

La primera metodología utilizada para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea fue la de GOD, propuesta por Foster y Hirata (1988). Esta se utiliza para identificar zonas que, por sus características litológicas y piezométricas, son propensas a la infiltración de contaminantes hacia el agua subterránea. La información que alimenta este cálculo consta del grado de confinamiento del sistema hidrogeológico (G), la litología en la zona no saturada del subsuelo (O) y la profundidad del agua subterránea (D), como se muestra en la Figura 24 (Foster & Hirata, 1988).

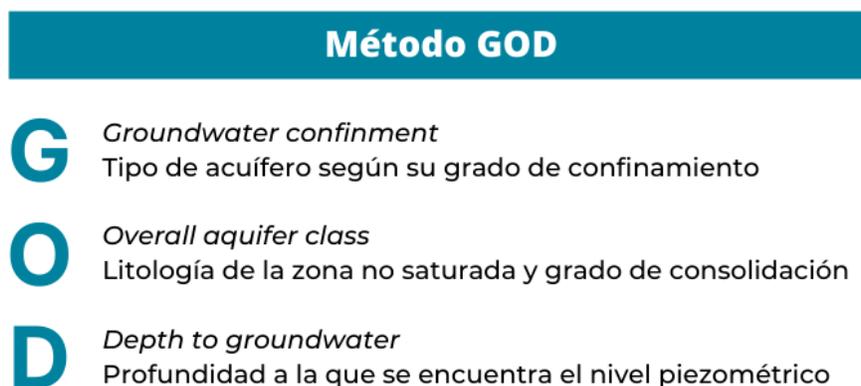


Figura 24. Método GOD. Fuente: elaboración propia Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

El método GOD es útil y aplicable a zonas con escasa información hidrogeológica que impida cuantificar las características de transmisividad de agua a través del medio (Almasri & Kaluarachchi, 2004), como es el caso del estado de la información del AMG (Rizo-Decelis, 2017). Suele ser la



primera aproximación a la caracterización de la vulnerabilidad acuífera, debido a su simplicidad, aunque su aplicabilidad puede estar limitada al tratarse de un análisis que no considera la contaminación específica de los acuíferos (Almasri & Kaluarachchi, 2004). La Figura 25 muestra el proceso en SIG que se realizó en SIG para obtener la vulnerabilidad de un acuífero por la metodología GOD.

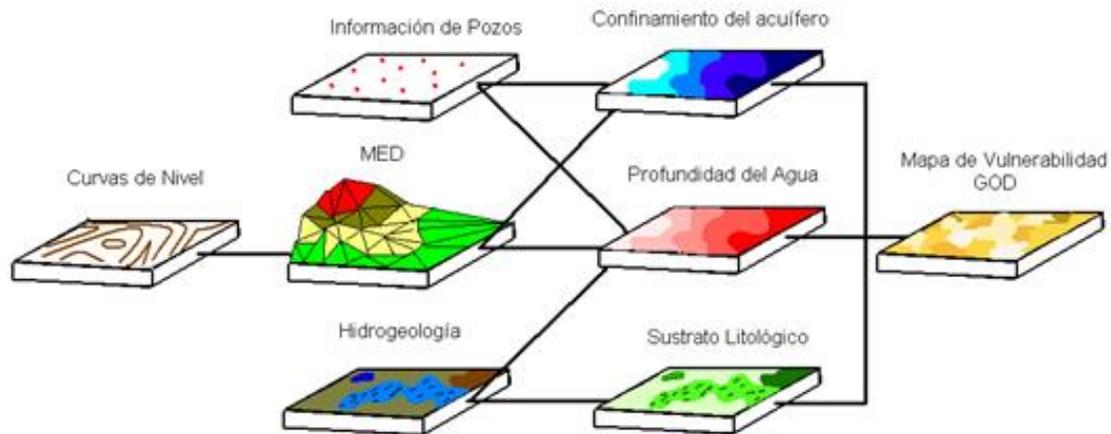


Figura 25. Proceso en SIG de GOD. Fuente: (Aguero-Valverde, 2000)

Estas variables se ponderan, de manera independiente, con valores entre el cero y el uno, a través de SIG, en donde se realiza un análisis multicriterio por superposición de capas, para determinar la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea. Las variables se relacionan como se muestra en la Ecuación 2. La asignación de valores a las tres variables del método GOD para la cartografía de vulnerabilidad se realiza conforme a la Tabla 7 (Foster & Hirata, 1988; Oroji, 2018; Sukmawati *et al.*, 2019; Houria & Naima, 2023; Taazzouzte, 2020).

$$GOD = G * O * D \approx 0 - 1$$

Ecuación 2. Índice GOD

Tabla 7. Asignación de valores a las tres variables del método GOD para la cartografía de vulnerabilidad (elaborado a partir de información de Foster y Hirata, 1988).

Valor	G	O			D
		No consolidado	Consolidado (rocas porosas)	Consolidado (rocas)	
0	Ninguno surgente confinado	-	-	-	-
0.2	-	Arcillas lacustres y de estuarios	-	-	-
0.3	-				
0.4	Semiconfinado	Suelos residuales	-	-	-
0.5	-	Limos aluviales	Arcillas y lutitas	-	-
0.6	No confinado (cubierto) [USV]	Arenas eólicas	Limolitas y tobas volcánicas	Formaciones ígneas / metamórficas	> 50 m
0.7	-	Arenas aluviales y fluvioglaciares	-	-	20-50 m
0.8	-	Gravas coluviales	Calizas blandas, calcarenitas	Lavas volcánicas recientes	5-20 m

Valor	G	O			D
		No consolidado	Consolidado (rocas porosas)	Consolidado (rocas)	
0.9				-	< 5 m
1.0	No confinado	-	-	Calizas karstificadas	Cualquier profundidad

En el esquema de la Figura 26 se muestra el rango de puntuaciones de cada variable y las categorías de valoración de la vulnerabilidad, consideradas por el método GOD. Al multiplicar las tres variables de la Ecuación 2, se obtiene un valor del índice de vulnerabilidad, comprendido entre 0.0 y 1.0 (clase Muy baja a clase Muy alta, respectivamente).

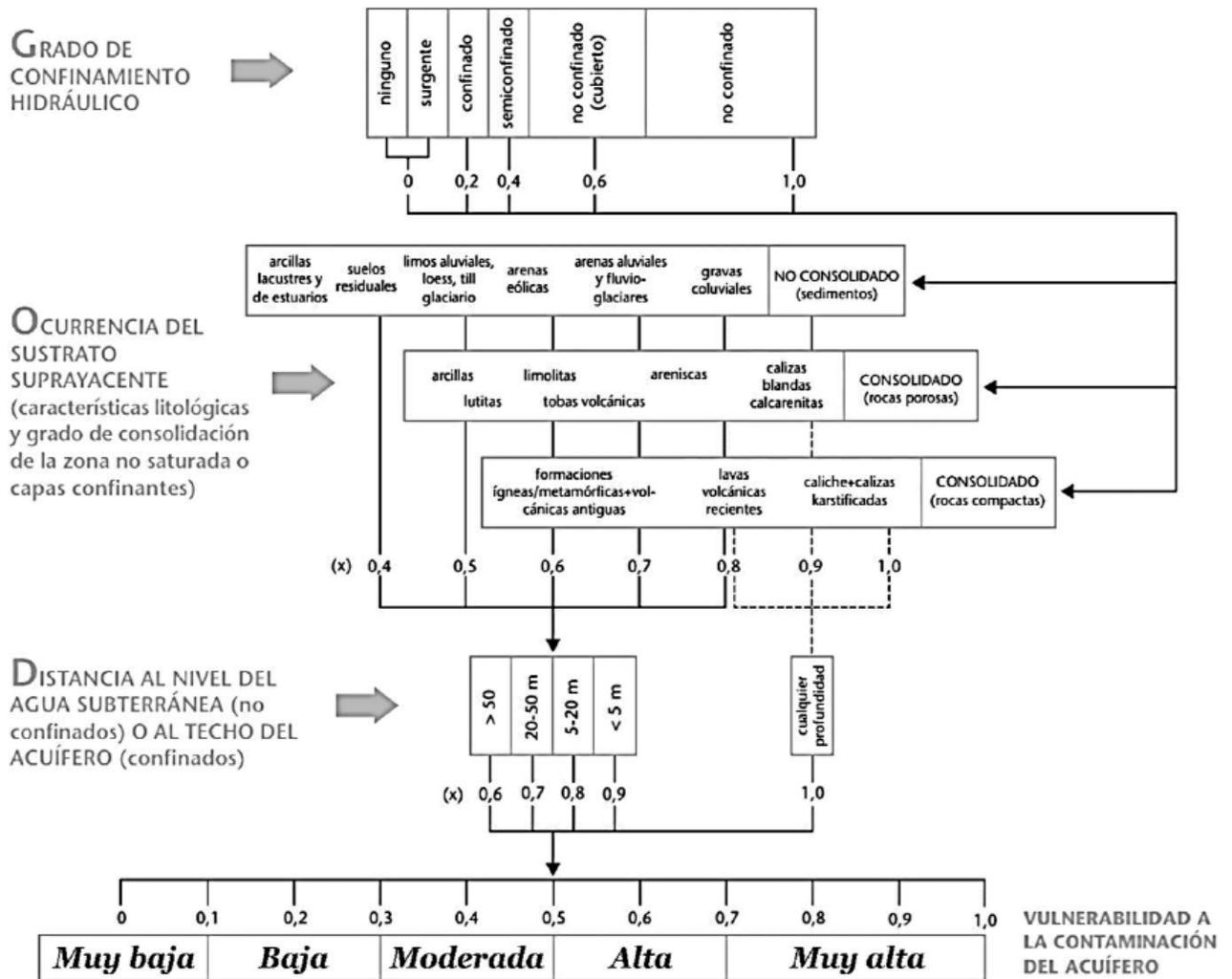


Figura 26. Diagrama con la asignación de valores a las tres variables consideradas por el método GOD (modificado de Foster et al., 2002; Rizo-Decelis, 2017).

El grado de confinamiento (G) del sistema hidrogeológico influye en la movilidad y filtración de los contaminantes hacia la zona saturada. Si el sistema es de carácter confinado se le asigna el valor de 1.0, si es semi confinado se le asigna el 0.4, y 0.2 cuando se trate de uno confinado. En el caso en el



que se encuentre una capa cubierta, o de menor permeabilidad (sobre un estrato no confinado) se le asigna el valor de 0.6 (Foster & Hirata, 1988).

Las capas que se encuentran sobre el sistema hidrogeológico, o la litología en la zona no saturada (O) desempeñan un papel importante en la vulnerabilidad del agua subterránea, ya que pueden actuar como una barrera protectora que impide o retrasa la infiltración de los contaminantes hacia el sistema hidrogeológico. Estas capas se ponderan según el tipo de material y su grado de consolidación, lo cual determina la capacidad que tiene el medio para transferir, filtrar o retener los contaminantes en el subsuelo.

El nivel piezométrico (D), o la profundidad del agua subterránea, es otro factor crucial para evaluar la vulnerabilidad de un sistema hidrogeológico. Revela la distancia vertical que hay entre el suelo y el nivel freático, en donde mientras más cerca se encuentre, habrá mayor posibilidad de que los contaminantes se filtren y lleguen al sistema hidrogeológico. Las profundidades que sean menores a los cinco metros son asignadas con el valor de 1.0, y se clasifican hasta aquellas que son mayores a los 50 m con valor de 0.6. Para los casos en los que no se cuente con información piezométrica detallada, el valor D en el método GOD permanece constante con el valor 1.0 (Foster & Hirata, 1988; Sukmawati *et al.*, 2019). Los siguientes mapas (véase Figura 27 y Figura 28) muestran la reclasificación de los factores G y O, y la extensión de los sistemas hidrogeológicos. Los cálculos para obtener estas capas se realizaron a partir de las ponderaciones especificadas en la Tabla 7 (Foster & Hirata, 1988).

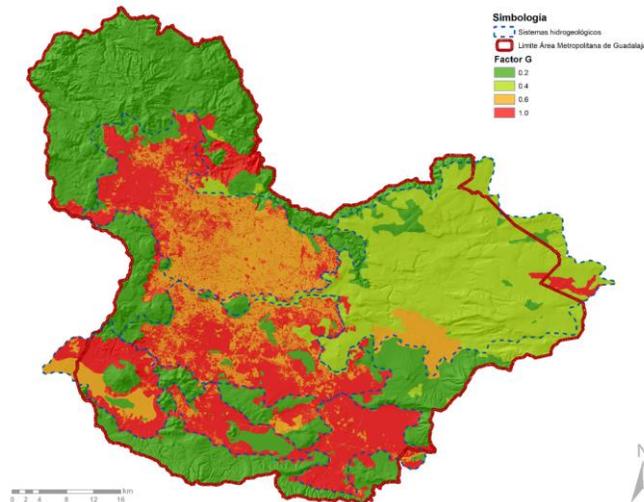


Figura 27. Mapa del grado de confinamiento del sistema hidrogeológico, reclasificado en el Factor G para la metodología GOD. Elaboración de la carta de aguas subterráneas del INEGI (1980, escala 1:250:000).

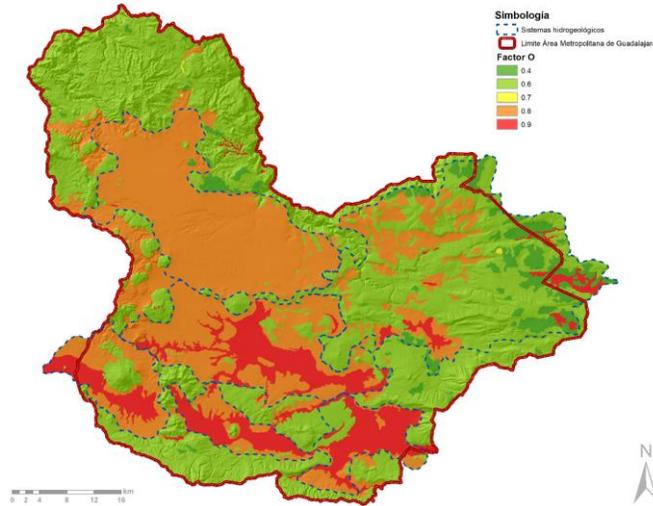


Figura 28. Mapa de la litología en la zona no saturada, reclasificado en el Factor O para la metodología GOD. Elaboración propia a partir de la carta geológica del INEGI, digitalizada por IIEG (2016, escala 1:50:000).

Para la obtención del factor G, se utilizó el conjunto de datos vectoriales de las cartas de Aguas subterráneas, escala 1:250 000, Serie I, Jalisco (1979) de INEGI, clasificando como zonas no confinadas aquellas que mostraran altas posibilidades de contener agua y poco consolidadas, y como confinadas las zonas que presentaran litología aflorante, cuerpos de aguas y zonas consolidadas con baja posibilidad de permear agua. El factor O se obtuvo mediante la reclasificación de la capa de litología (IIEG, 2016), de acuerdo con su tipo de material y grado de consolidación (véase Tabla 8). Debido a que se cuenta con información piezométrica limitada, se optó por utilizar un factor D igual a 1 para toda el área de estudio, lo que da como resultado una cartografía de vulnerabilidad dependiente únicamente de las características físicas del medio. Esto se llevó a cabo con el propósito de trabajar en un enfoque más conservador, considerando que el nivel piezométrico se encontraba más somero.

Tabla 8. Asignación de valores a la capa de litología para la obtención del Factor O. Elaborado a partir de la reclasificación propuesta por Foster y Hirata (1988) y la capa de litología.

Grado de consolidación	Factor O						
	0.4	0.5	0.6		0.7	0.8	0.9
<b>Roca consolidada</b>	-	-	Andesita	Extrusiva básica	-	-	-
			Basalto	Riolita			
			Brecha volcánica	Vítrea			
			Extrusiva ácida				
<b>Roca porosa</b>	-	-	-	-	Arenisca	Arenisca - Conglomerado	-
						Lutita - Arenisca	
						Toba	
<b>Sedimentos</b>	Residual	-	-	-	Brecha	-	Aluvial
					Conglomerado		

Se realizó la superposición de capas mediante una multiplicación del factor G con el O y el D (*i.e.*, 1), por medio de SIG, y el resultado se clasificó para caracterizar la vulnerabilidad del agua subterránea desde muy baja hasta muy alta. En este análisis, se realizó la combinación del medio físico en el que se le asigna un peso relativo a las zonas que tienen mayor probabilidad de transportar un contaminante desde la superficie al sistema hidrogeológico.

#### 4.5.2. Método DRASTIC

El método DRASTIC, desarrollado por Aller *et al.* en 1987 para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), es un enfoque empírico ampliamente utilizado, que resulta muy útil al crear mapas de vulnerabilidad. Este método se basa en varios factores clave, como la profundidad del agua subterránea, recarga neta, litología del sistema hidrogeológico, tipo de suelo, topografía, naturaleza de la zona no saturada y conductividad hidráulica, los cuales representan las variables mostradas a continuación (véase Figura 29). Esta metodología trabaja con el supuesto de que un contaminante puede ser introducido al sistema hidrogeológico por la precipitación (*i.e.*, recarga) y, al diluirse en esta, se mueve con las mismas propiedades (Aller *et al.*, 1987). Las variables se multiplican por un factor de ponderación, por lo que los valores finales van desde 64 a 188 (Aller *et al.*, 1987; Khosravi *et al.*, 2018; Chenini *et al.*, 2018; Faybishenko *et al.*, 2015; Oroji, 2018; Shirazi *et al.*, 2012).

Método DRASTIC	
<b>D</b>	<i>Depth to groundwater</i> Profundidad a la que se halla el nivel piezométrico
<b>R</b>	<i>Recharge</i> Distribución de la recarga del acuífero por agua de lluvia
<b>A</b>	<i>Aquifer media</i> Material de la zona saturada
<b>S</b>	<i>Soil media</i> Características del suelo
<b>T</b>	<i>Topography</i> Pendiente topográfica
<b>I</b>	<i>Impact of vadose zone</i> Materiales de la zona no saturada
<b>C</b>	<i>Hydraulic conductivity</i> Permeabilidad o conductividad hidráulica

Figura 29. Método DRASTIC. Fuente: elaboración propia Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

A diferencia del método GOD, el método DRASTIC considera una gama más amplia de variables relevantes para evaluar la vulnerabilidad de un sistema hidrogeológico. Estos aspectos adicionales proporcionan una visión más completa de las características del sistema hidrogeológico y permiten una evaluación más precisa de los riesgos potenciales para la calidad del agua subterránea. Para evaluar el potencial de contaminación del agua subterránea, dentro del marco hidrogeológico, se

utilizó una clasificación numérica para las variables representadas en las siglas DRASTIC (Piscopo, 2001). Esta metodología utiliza siete variables (véase Figura 30), a las que se le asigna un rango de puntuación (véase Tabla 10) que va de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad). Asimismo, a cada variable se le asigna un peso relativo, de acuerdo con la influencia que tiene en la vulnerabilidad, donde al más significativo se le asigna un valor de 5 y al menos significativo el valor de 1. Una vez que se clasifican las capas, se multiplica cada aspecto del medio físico, como se muestra en la Ecuación 3, donde los subíndices  $r$  representan rangos de puntuación, mientras que los  $w$  determinan la ponderación (*weight*) de la variable correspondiente.

$$\text{Índice DRASTIC} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

Ecuación 3. Índice DRASTIC

La Figura 30 muestra el proceso en SIG que se realiza para obtener la vulnerabilidad de un sistema hidrogeológico por la metodología DRASTIC.

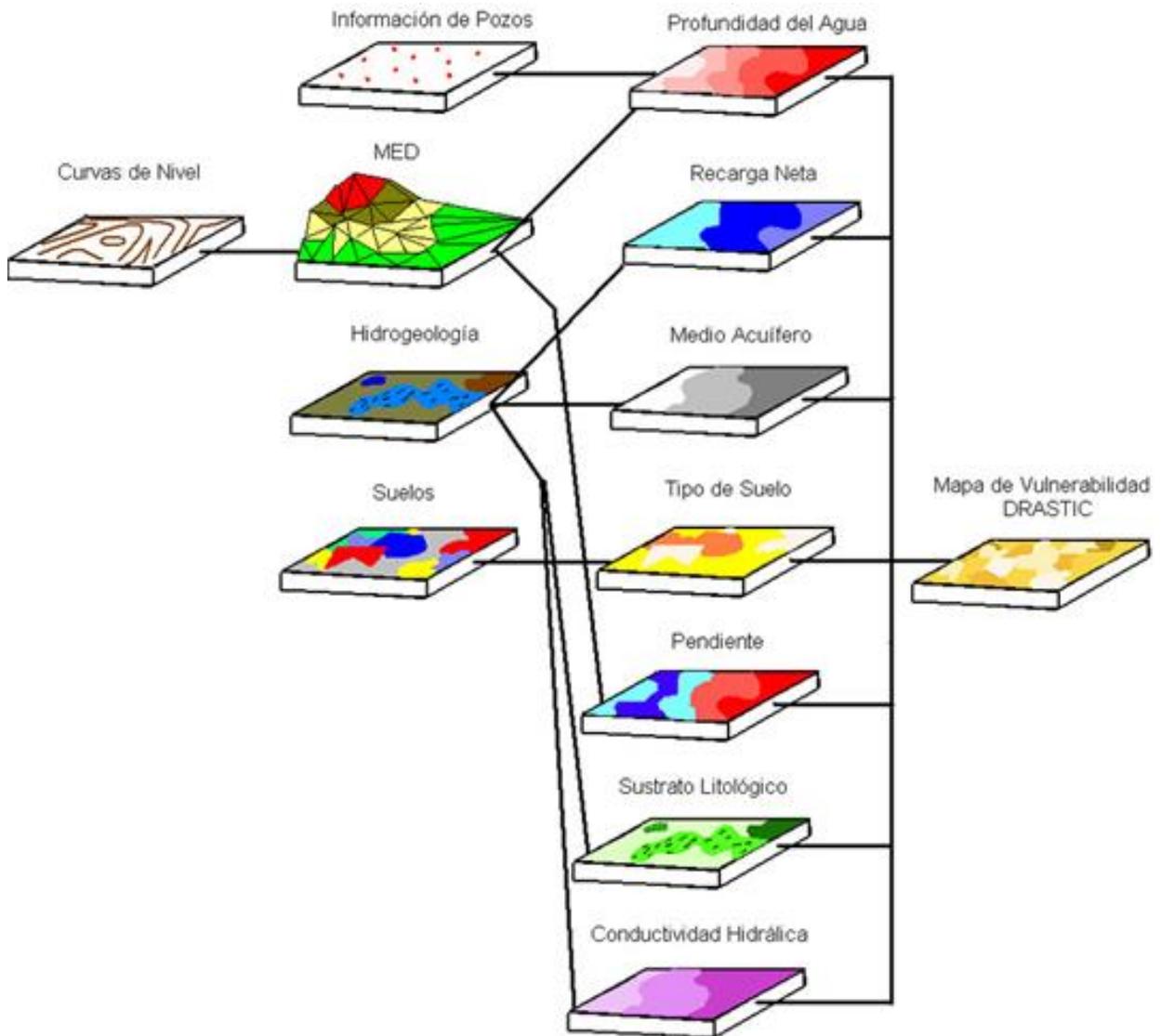


Figura 30. Proceso en SIG de DRASTIC. Fuente: (Aguero-Valverde, 2000)

Los valores que adoptan los factores de clasificación y ponderación para cada variable se muestran en la Tabla 10, mientras que en la Tabla 9 se detallan los rangos de clasificación del nivel de vulnerabilidad.

Tabla 9. Valores DRASTIC y clasificación de nivel de vulnerabilidad del agua subterránea a la conminación. (Aller et al., 1987).

Valor DRASTIC	Nivel de vulnerabilidad
≤ 64	Muy baja
65 – 105	Baja
106 – 146	Moderada
147 – 187	Alta
≥ 188	Muy alta

Tabla 10. Clasificación de valores y ponderación de las variables del método DRASTIC (con información de Aller et al. - 1987-).

D (w = 5)		R (w = 4)		A (w = 3)	
Profundidad del agua subterránea [m]	Dr	Recarga neta [mm/año]	Rr	Litología del sistema hidrogeológico	Ar
0 – 0.15	10	0 – 50	1	Lutita	2
1.5 – 4.6	9	50 – 103	3	Metamórficas/ígneas	3
4.6 – 9.1	7	106 – 178	6	Metamórficas/ígneas más meteorizadas	4
9.1 – 15.2	5	178 – 254	8	Depósitos glaciales	5
15.2 – 22.9	3	>254	9	Secuencias de areniscas, calizas y lutitas	6
22.9 – 30.5	2			Areniscas	6
>30.5	1			Calizas	6
				Arena/Grava	8
				Basaltos	9
				Calizas kársticas	10
S (w = 2)		T (w = 1)		I (w = 5)	
Textura del suelo	Sr	Pendiente [%]	Tr	Atenuación de la zona no saturada	Ir
Delgado/ausente	10	0 – 2	10	Capa confinante	1
Gruesa	10	2 – 6	9	Cieno – arcilla	3
Media	9	6 – 12	5	Lutita	3
Fina o compacta	7	12 – 18	3	Caliza	6
Arenisca	6	>18	1	Arenisca	6
Margas	5			Arena/grava con alto contenido de arcilla	6
Limo margoso	4				
Arcilla margosa	3				
Estiércol/cieno	2				
		C (w = 3)			
		Permeabilidad [m/día]	Cr		
		0.04 – 4.1	1		
		4.1 – 12.2	2		
		12.2 – 28.6	3		

D (w = 5)	
Profundidad del agua subterránea [m]	Dr
Arcilla no compactada	1

R (w = 4)	
Recarga neta [mm/año]	Rr
28.6 – 40.8	6
40.8 – 81.5	8
>81.5	10

A (w = 3)	
Litología del sistema hidrogeológico	Ar
Grava/arena	4
Metamórfica/ígneas	8
Basalto	9
Caliza karstificada	10

#### 4.5.3. Delimitación de zonas de recarga

La recarga se define como la cantidad del agua que penetra a través del subsuelo y circula hasta alcanzar la zona saturada de un sistema hidrogeológico (Awawdeh *et al.*, 2014). Al llevar a cabo la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los sistemas hidrogeológicos, el agua de recarga es un transporte del contaminante al sistema hidrogeológico, aunque podría diluirse conforme atraviesa el medio subterráneo. Para conocer las zonas de recarga de agua subterránea en el área de estudio, se utilizó la metodología propuesta por Piscopo (2001), la cual surgió con el fin de generar la variable (R), correspondiente a la recarga neta, del método de vulnerabilidad DRASTIC (Rizo-Decelis, 2017). Esto supone ciertas limitaciones, debido a que el método de Piscopo reclasifica las tres variables utilizadas para su cálculo, en variables semi-cualitativas, que se traducen a cuantitativas por medio de relaciones numéricas (adimensionales) entre métodos (Piscopo, 2001). Las tres variables que utiliza Piscopo (2001) para el cálculo de la recarga (Rr) son, (Fp) el factor de precipitación, (Fs) factor de pendiente y (Fsp) factor de capacidad de infiltración del suelo, que se relacionan de la siguiente forma:

$$Rr = F_p + F_s + F_{sp}$$

Ecuación 4. Índice de recarga

Las variables representadas en capas de información geográfica son reclasificadas de acuerdo con la Tabla 11.

Tabla 11. Asignación de valores para la determinación de la recarga neta. Elaboración propia, a partir de la metodología propuesta por Piscopo (2001).

Pendiente (%)	Fs	Precipitación [mm/año]	Fp	Capacidad de infiltración	Fsp
<2	4	>850	4	Alta	5
2-10	3	700-850	3	Moderada-Alta	4
10-33	2	500-700	2	Moderada	3
>33	1	<500	1	Lenta	2
-	-	-	-	Muy lenta	1

Los valores obtenidos por la Ecuación 3, estiman la variable de recarga R para la metodología DRASTIC, según las equivalencias de la Tabla 12.

Tabla 12. Equivalencias de la recarga para el método DRASTIC según el factor Rr. Elaboración a partir de las metodologías de Aller et al., (1987) y Piscopo (2001).

Rr Piscopo	Recarga (DRASTIC)	Recarga neta (mm)	Recarga cualitativa
3 - 5	1	0 - 50	Muy lenta
5 - 7	3	50 - 103	Lenta
7 - 9	6	103 - 178	Moderada
9 - 11	8	178 - 254	Alta
11 -13	9	> 254	Muy alta

Para el factor  $F_s$ , se generó una capa de pendiente, a partir del Modelo Digital de Elevación de 10 m de resolución, mediante la herramienta de análisis superficial de ArcMap, la cual se clasificó de acuerdo con los valores mostrados en la tabla anterior (véase Tabla 12).

El factor  $F_p$  se creó utilizando la capa de precipitación calculada para un año tipo húmedo en la región, explicado en el Anexo 1. Descripción del medio físico. Es importante señalar que esta metodología sirve para estimar los sitios potenciales de recarga y se desarrolló de manera empírica en una región cuyo régimen climático es distinto al de la zona de estudio, por lo que, la variable  $F_p$  se calibró con las modelaciones realizadas de años tipo, seleccionando el año tipo húmedo (véase Anexo 1. Descripción del medio físico). La precipitación media en un año tipo húmedo para la región es de, aproximadamente, 1,150 mm, con un mínimo de 1,020 mm y un máximo de 1,260 mm. La desviación estándar de los datos es de 40 mm, con un coeficiente de variación de 0.035. Por ende, se puede inferir que hay poca variabilidad en la distribución de los datos<sup>16</sup>. El factor  $F_p$ , utilizando la clasificación propuesta por Piscopo (2001), presenta poca variabilidad al cálculo de las zonas potenciales de recarga. La variable  $F_p$  mantuvo un valor de índice 4, por contener valores de precipitación por encima de los 850 mm, así como se especifica en la Tabla 11. En el factor  $F_{sp}$ , se muestran las distintas capacidades de infiltración en el territorio. En los análisis realizados por Piscopo (2001), este factor se calcula únicamente con un factor de permeabilidad del suelo. En un estudio similar, Abu-hashim *et al.* (2003) realizaron el análisis sobre un acuífero basáltico, en donde categorizan la capacidad de infiltración como la permeabilidad del tipo de suelo clasificado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés).

La capacidad de infiltración es un factor fundamental para determinar la cantidad de agua que puede infiltrarse hasta llegar a un sistema hidrogeológico. Debido a que dicho factor se aborda de modo cualitativo en la metodología de Piscopo (2001), está sujeto a cierta subjetividad. Para ello se tomaron tres variables territoriales que pueden influir en la cantidad de agua que puede infiltrarse desde la superficie: la vegetación y uso de suelo, la textura del suelo y la litología no confinada y aflorante. En la investigación del impacto que tiene el uso de suelo y vegetación sobre la infiltración por (Abu-hashim *et al.*, 2011) se muestra cómo influyen las actividades y la vegetación sobre la superficie en la cantidad de agua que puede infiltrarse hacia el subsuelo, así como la capacidad que tienen tipos de suelos sobre el mismo proceso hidrológico. Estas variables se combinaron con la

<sup>16</sup> Los datos estadísticos de la precipitación se obtienen de la capa de distribución estadística para un año tipo húmedo, mediante interpolación polinómica local de estaciones meteorológicas en el software ArcMap, tal como se describe en el apartado de metodología.

compacidad del medio del sistema hidrogeológico no confinado, para determinar el factor  $F_{sp}$  de la metodología de Piscopo (2001). Finalmente, se realizó la combinación de las capas; cada una se ponderó según su capacidad de infiltrar agua hacia el subsuelo.

En el caso de los usos del suelo y vegetación, entre más densa sea la vegetación, como sucede en zonas forestales, mayor es la capacidad de infiltración; mientras que, en suelos agrícolas, pastizales y suelos desnudos disminuye la capacidad de infiltración. En el caso de zonas urbanizadas y cuerpos de agua, la capacidad de infiltración es casi nula, por lo que, la recarga se considera muy lenta (Villalba-Murrieta *et al.*, 2021). La capa textural del suelo se ponderó según el tamaño de partícula. Entre más grueso sea el grano del suelo, mayor capacidad de infiltración tiene. Además, la litología aflorante de la región se ponderó según su grado de confinamiento en el subsuelo. Las capas que contienen materiales porosos, depósitos aluviales o suelos sedimentarios se ponderaron con una capacidad de infiltración mayor.

La superposición de capas para el cálculo del factor  $F_{sp}$  se realizó con la herramienta de *Model Builder* de *ArcMap*, detallada en la Figura 31. En el proceso se hizo la conversión de las capas a formato ráster y se reclasificaron, según la capacidad de infiltración de cada variable, en donde los cuerpos de agua y las zonas urbanizadas fungieron como máscara en el cálculo, con el objetivo de disminuir la recarga potencial en esas zonas.

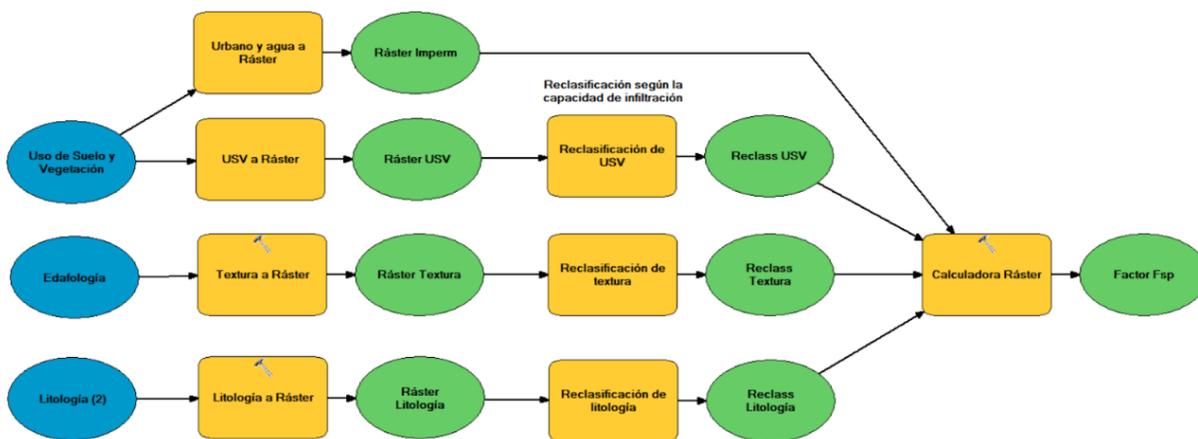


Figura 31. Proceso de Model Builder para el cálculo del factor  $F_{sp}$  de la metodología de Piscopo (2001). Elaboración propia.

La superposición de los factores  $F_s$  y  $F_{sp}$  se realizó por la herramienta de álgebra de mapas, en donde se sumaron los rásters, utilizando la Ecuación 4, se clasificó el valor numérico conforme las categorías de la Tabla 12 y se obtuvo como resultado la capa de recarga cualitativa, así como la variable  $R$  de la metodología DRASTIC.



## 4.6. Análisis hidrogeoquímico

Los procesos geoquímicos que influyen en la composición del agua subterránea le otorgan una identidad propia (conjunto de aniones, cationes, elementos traza) que permite su clasificación en familias de agua, así como la identificación de los medios por los que ha circulado y los procesos que han llevado a su evolución (Morán-Ramírez *et al.*, 2016).

Los datos hidrogeoquímicos, obtenidos de diversas fuentes de información y en trabajo de campo, se utilizaron para elaborar un diagrama de Piper, que representa gráficamente la composición química del agua y permite identificar las facies o grupos en esta. Usualmente, cuando existe un gran número de muestras tomadas en la zona de estudio, los iones (expresados en mEq/L<sup>17</sup>) se representan gráficamente en el diagrama de Piper. Esta herramienta cualitativa identifica la composición de cationes y aniones, ayudando a comprender la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea. Los diagramas triangulares de Piper constan de dos triángulos equiláteros: uno para cationes ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) y otro para aniones ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{Cl}^-$ ) (Appelo & Postma, 2010). Estos permiten representar tres componentes, cada vértice representa un componente que equivale al 100%. Otra representación es el diagrama de Stiff. Dicho diagrama consiste en polígonos heteromorfos, desarrollados en tres a cuatro ejes horizontales, en los que se exhiben diferentes iones (Appelo & Postma, 2010). El diagrama de Piper, y el balance de cationes y aniones asociado, permiten la definición de facies hidrogeoquímicas, también conocidas como familias de agua, y que son utilizadas en las evaluaciones geoquímicas, por ejemplo, para determinar zonas de recarga, descarga y mezclado. El agua, al circular por el subsuelo, va intercambiando iones durante el trayecto, situación que modifica su composición química y que reflejan las diferentes unidades litológicas por las cuales fluye (Morán-Ramírez *et al.*, 2016).

## 4.7. Sistemas de control hidrogeológicos

La propuesta de un sistema de control hidrogeológico requiere una investigación de los métodos y recomendaciones internacionales, los cuales se exponen más adelante. Una vez recopilados y comprendidos estos aspectos internacionales, se desarrolló una metodología aplicable al AMG, tal como se muestra en el apartado correspondiente de la metodología.

El sistema de control o monitoreo es la evaluación de las condiciones físicas, químicas y biológicas de las aguas, en relación con las condiciones naturales y la interferencia humana. Su objetivo es proporcionar apoyo para definir estrategias y directrices de política destinadas a proteger y conservar los recursos hídricos subterráneo (IDEAM, 2013; IGRAC, 2020).

### 4.7.1. Antecedentes

A nivel mundial, se lleva a cabo el monitoreo del agua subterránea para medir niveles piezométricos, tasas de extracción, descarga de manantiales y calidad del agua subterránea. Sin embargo, aún no se dispone de suficiente conocimiento sobre el estado y las tendencias de los recursos hídricos subterráneos. Esto se debe principalmente a dos factores destacados: el monitoreo insuficiente y la

---

<sup>17</sup> mEq/L=miliequivalentes por litro



limitada accesibilidad a los datos y resultados del seguimiento. El Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC<sup>18</sup>, por sus siglas en inglés), a través del programa de la Red Global de Monitoreo de Aguas Subterráneas, ha logrado la participación e información de más de 50 países. Según sus hallazgos, la frecuencia de monitoreo varía principalmente de semanal a mensual, y la mayoría de las redes se gestionan de manera automática o semiautomática. Además, al menos 33 países proporcionan informes sobre los resultados del monitoreo de aguas subterráneas y 41 países producen mapas de aguas subterráneas (IGRAC, 2020). En la Tabla 13 se presentan algunos casos de redes de monitoreo en diferentes partes del mundo como referencia.

---

<sup>18</sup> International Groundwater Resources Assessment Centre

Tabla 13. Redes de monitoreo a nivel mundial. Fuente: varias

Redes de monitoreo a nivel mundial								
Zona	Año de inicio	Criterio de selección de punto de monitoreo	Puntos de monitoreo	Frecuencia de medición	Parámetros medidos	Equipo	Seguimiento	Fuente
Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín	Monitoreo piezométrico desde 2010. Convenio en el 1026. Monitoreo periódico desde 2017	Se monitorean líneas de flujo. Puntos con dos o más captaciones con una diferencia de profundidad mínima de 10 metros. Sistemas identificados con amenaza.	96 puntos de agua (76 de ellos son aljibes, 10 son pozos y 10 son piezómetros), 9 manantiales. En el 2017 fueron 60 puntos de monitoreo sistemático para el monitoreo hidrogeológico.	El monitoreo piezométrico se busca realizarse mensualmente.  El monitoreo hidrogeológico se realiza dos veces al año: época seca y húmeda.	Piezometría Color, PH, Temperatura, Conductividad eléctrica, Sólidos Totales Disueltos, Coliformes fecales, DBO y DQO, Grasas y Aceites, Turbiedad, Dureza total, Alcalinidad y aniones y cationes mayoritarios: Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> , Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Fe soluble, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , SiO <sub>2</sub> . Monitoreo isotópico	Sonda de nivel y laboratorio acreditado.  Para la red de monitoreo y hidrogeológica y/o de calidad: conductímetro calibrado, pH-metro calibrado, soluciones de calibración, termómetro, agua destilada, etc.	No siempre se pueden analizar todos los puntos de monitoreo. Generan reporte de indicadores para cada campaña de medición.	(AMVA, 2017) (AMVA, Red Río Aburrá-Medellín, 2018)
Red de Pozos de Monitoreo de Aguas Subterráneas del Área Metropolitana de San Salvador y el Valle de Zapotitán.	2007	Utilizar puntos existentes, así como generar nuevos puntos. Solo monitoreo piezométrico.	A.- 84 pozos excavados de uso doméstico, B.- 17 pozos perforados con información automática.	A.- Medición dos veces al año, durante la época seca y la época lluviosa. B.- La red proporciona datos del nivel piezométrico de los pozos cada 8 horas	Piezometría	No especificado.	La red se estableció como resultado de un proyecto financiado. Paulatinamente se amplía la red automática. No se encontraron noticias de integrar un monitoreo hidrogeológico.	(Flores, 2010) (MARN, 2018) (IGRAC, 2020)
Red de monitoreo Chile	Diagnósticos de calidad de agua desde 2014	Varios: Criterio espacial (fácil acceso, propiedad fiscal, profundidad mínima, ubicación), criterio geoestadístico (para usar modelo de flujo y transporte) y criterios estadísticos (costo de la operación a largo plazo, análisis de representatividad, análisis de la información de niveles, análisis de confiabilidad y análisis de redundancia).	Diferente para cada sistema	2 veces por año (la época de mayor nivel del agua subterránea, un segundo monitoreo cuando el nivel corresponda al menor)	Parámetros descriptivos, iones mayores, parámetros adicionales, metales pesados, sustancias orgánicas, pesticidas, microbios.	No especificado.	Portal con informes estadísticos oficiales de variables hidrometeorológicas y calidad del agua, incluidos datos sobre niveles (estáticos) y calidad de agua de los pozos (escala nacional).	(División de Estudios y Planificación, 2019) (IGRAC, 2020)
Red De Monitoreo Manual & Sistema De Monitoreo Automatizado En Tiempo Real,	2016	El número de pozos caracterizados es determinado, pero puede modificarse dependiendo de la solicitud del	La red manual monitorea en 300 pozos. Cuentan con 10 acuíferos (determinados por sus cualidades	Análisis mensual de características físico - químicos y microbiológicos anual (reglamento de	Alcalinidad, aluminio, antimonio, arsénico, cadmio, calcio, cloruros, cobre, coliformes fecales, color aparente, conductividad,	No especificado.	No especificado.	(Dirección de Agua, 2022) (IGRAC, 2020)

Redes de monitoreo a nivel mundial								
Zona	Año de inicio	Criterio de selección de punto de monitoreo	Puntos de monitoreo	Frecuencia de medición	Parámetros medidos	Equipo	Seguimiento	Fuente
SIMASTIR de Costa Rica		Laboratorio Nacional de Agua.	geohidrológicas), de los cuales se miden de 4 a 27 pozos para cada uno	Calidad del Agua Potable DE 38924-S). Con la SIMASTRI Monitoreo en tiempo real del nivel piezométrico y conductividad.	romo dureza de calcio, dureza total, E. Coli., fluoruros, hierro, magnesio, manganeso, mercurio, níquel, nitratos, nitritos, olor, pH, plomo potasio, selenio, sodio, sulfatos, turbiedad, zinc.			
España	1970 piezometría y calidad del agua	Red de pozos con uno o dos filtros, y pozos artesianos	2,700 puntos piezométricos	Mensual para piezometría Otros parámetros, depende se cada masa de agua subterránea	Piezometría, Contenido de oxígeno, pH, Conductividad, Nitrito, Nitrito, amonio, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, calcio, magnesio, sodio, potasio, sílice, nitratos, nitritos, amonio, DQO, cianuros totales, fluoruros, hierro, manganeso, arsénico, mercurio, cadmio, cromo, cobre, plomo, cinc, níquel, berilio, cobalto, selenio, vanadio, bario, plaguicidas, tricloroetileno, tetracloroetileno, otros contaminantes industriales.	No especificado. Se enuncian normativas.	No especificado.	(Gobierno de España, 2023) (Gobierno de España, 2021) (IGRAC, 2020)
Polonia	1970s para piezometría y 1991 para calidad del agua	El monitoreo de las aguas subterráneas se lleva a cabo a través de redes nacionales, regionales y locales.	174 cuerpos de agua subterránea bajo consideración. 1,250 puntos de observación, de los cuales 366 pozos de observación están equipados con dispositivos automáticos	Depende de la estación, cada hora, diaria o mensual	Nivel piezométrico. pH, temperatura, Sustancias disueltas totales, oxígeno disuelto, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Fe, Mn, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> , As, Ba, B, Cr, Zn, F, Al, Cd, Cu, Ni, Pb	No especificado.	Reportes anuales, en 2013 se agregaron pozos complementarios fuera del territorio, al ser parte de la Unión Europea accede a ellos.	(Ministerstwo Infrastruktury, 2023) (IGRAC, 2020)
Australian Groundwater Explorer	Información pública desde 2014	Información a nivel nacional	Alrededor de 900,000 perforaciones.	Actualización de información anual.	Niveles de agua subterránea, salinidad, e hidroquímica.	No especificado.	En 2013 se contabilizaron alrededor de 800,000 perforaciones.	(Australian Government, 2023) (Australian Government, 2023) (Australian Government, 2013)



Si bien cada país tiene sus propios parámetros de medición, existe una congruencia en la medición de los niveles piezométricos, que es considerado como un indicador clave en el monitoreo del agua subterránea. A medida que los proyectos de monitoreo se amplían y se destinan más recursos, es posible obtener una mayor cantidad de parámetros relevantes y estandarizados, lo que permite un análisis más completo y facilita la toma de decisiones.

A modo de referencia, algunos territorios (similares en extensión, cultura, cantidad de población y poder adquisitivo a México) cuentan con redes integrales de monitoreo de agua subterránea. Por ejemplo, Argentina dispone de 149 pozos georreferenciados, donde la información se recolecta de forma manual y automática con una frecuencia irregular desde 2 veces al mes hasta 4 veces al año. De manera similar, Brasil cuenta con 400 pozos de monitoreo en todo el país, generando información automáticamente de tres a cuatro veces al año. Perú, por su parte, tiene 6,901 pozos, de los cuales 3,491 monitorean el nivel piezométrico y 3,410 la calidad del agua subterránea, en Latinoamérica. Mientras tanto, en Indonesia, hay 51 pozos de monitoreo en el área de Yakarta; Sudán cuenta con 11 pozos que cuentan con tecnología telemétrica; y en India se tienen 23,000 estaciones de monitoreo, de las cuales 16,500 son pozos excavados a cielo abierto y los 6,500 restantes son piezómetros especialmente diseñados. Es relevante destacar que, según el estudio, el método más común para la recolección de información subterránea combina técnicas manuales y automáticas, lo que permite obtener una perspectiva más completa y actualizada de la situación del agua subterránea en cada país. (IGRAC, 2020)

#### 4.7.2. Metodología

El diseño de la red de monitoreo de agua subterránea se basó en el manual de monitoreo del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) en Colombia, que proporciona una guía detallada para llevar a cabo este proceso. Además, se consideraron el programa de monitoreo del IGRAC y otras metodologías propuestas a nivel internacional. La combinación de estas fuentes permitió desarrollar un enfoque integral y adaptado a las particularidades de la zona de interés, garantizando así la efectividad y confiabilidad de la red de control hidrogeológico. Para un monitoreo representativo, es crucial emplear un método que refleje las condiciones temporales y espaciales del agua subterránea en el área de estudio. Estas muestras son fundamentales para obtener una visión precisa del sistema hidrogeológico analizado (IDEAM, 2013). Se establecieron cuatro puntos esenciales para diseñar la red de monitoreo (Véase Figura 32):

- 1) Definición de objetivo.
- 2) Esbozar la red de monitoreo en función del objetivo establecido.
  - 2.1) Selección de los pozos de interés para llevar a cabo el monitoreo.
  - 2.2) Definir los parámetros a medir y la frecuencia de las mediciones.
- 3) Planeación de las campañas de monitoreo.
- 4) Designar responsables para el análisis e interpretación de la información, así como para la generación de reportes y la actualización de datos.

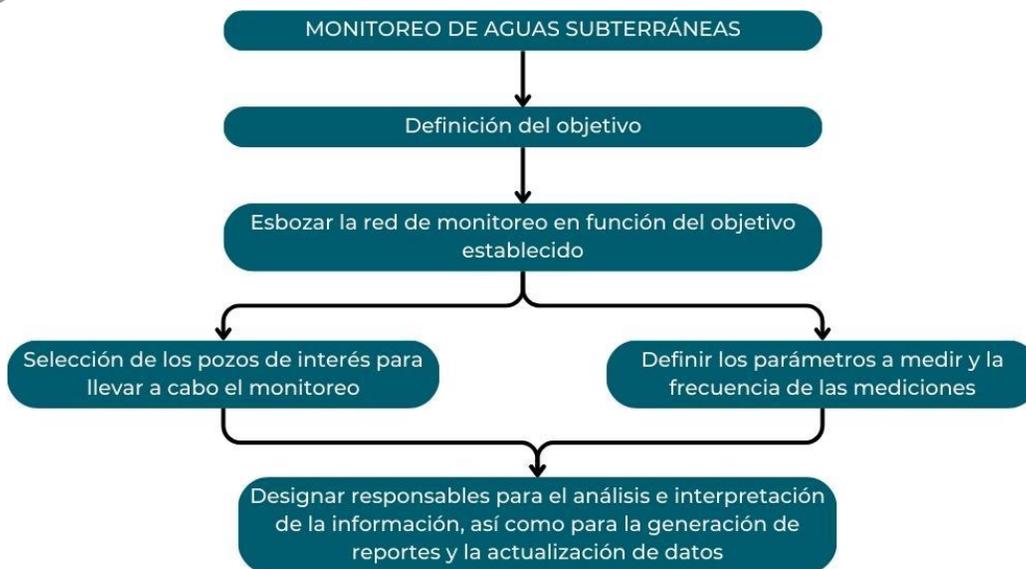


Figura 32. Diagrama de flujo de la metodología para diseño de un sistema de monitoreo.

### 1) Definición de objetivo

Es importante establecer un objetivo claro, ya que esto determinará los requisitos de selectividad de la muestra y aspectos importantes que deben ser monitoreados. Por ejemplo, los requisitos del monitoreo de calidad del agua subterránea destinada al consumo humano son diferentes a los del monitoreo de hidrogeoquímica (IDEAM, 2013; AMVA, 2017). Los objetivos pueden estar relacionados con los siguientes temas:

- **Piezometría:** Controlar la variación de niveles, calcular la recarga, modelar superficies piezométricas y redes de flujo. La construcción de las superficies piezométricas es necesaria para lograr los objetivos relacionados con la hidrogeoquímica y la calidad del agua.
- **Hidrogeoquímica:** Validar un modelo hidrogeológico conceptual, interpretando el origen y la evolución del recurso hídrico subterráneo. También implica establecer relaciones entre los diferentes compartimentos del ciclo hidrológico (*e.g.*, atmósfera, superficie, corrientes, lagos, acuífero, océano) y definir los tiempos de residencia y edad del agua.
- **Calidad:** Determinar los posibles usos del agua captada, evaluando si cumple con las normas de calidad requeridas. Además, se analiza el impacto de las fuentes de contaminación identificadas sobre la calidad del agua subterránea y se establecen medidas de manejo para proteger el sistema hidrogeológico.
- **Isotopía:** Identificar las zonas de recarga, determinar su procedencia en distancia y altura, y los mecanismos hidrológicos involucrados. También se utiliza para establecer el origen del agua subterránea y las posibles causas de la salinización. Permite evaluar si se presenta evapotranspiración en la zona no saturada del suelo y calcular el balance hídrico desde reservorios superficiales, como ríos y presas. Además, esta técnica es útil para diferenciar entre aguas meteóricas y juveniles.

El monitoreo de variables hidrogeoquímicas permite identificar los procesos que condicionan la evolución química del agua subterránea; la frecuencia de control dependerá de los periodos hidrológicos (si existe periodo de secas y periodo húmedo), de las propiedades hidráulicas del sistema, de las variaciones en las direcciones de flujo, y de otras variables particulares (AMVA, 2017).

## 2) Esbozar la red de monitoreo en función del objetivo establecido

Una vez identificado el objetivo general y los objetivos específicos de la red de monitoreo, se deben proponer los puntos de control. Para la selección de estos, se siguieron los lineamientos como se muestra en la Figura 33.



Figura 33. Lineamientos para la selección de puntos del sistema de control hidrogeológico

De forma más detallada se muestran los lineamientos de la Figura 33.

1. Densidad de la red de monitoreo: Se seleccionan puntos de control en cada una de las unidades hidrogeológicas de interés, donde la distribución espacial de los puntos ayuda al monitoreo del sistema (1 pozo por cada 20-25 km<sup>2</sup>) (IGRAC, 2020; GEOEX-SIAPA, 2003).
2. Conocimiento detallado del pozo: Pozos de extracción y piezómetros ya existentes, donde se conocen a detalle los lineamientos de construcción (diseño e instalación) y que cumplen con la extracción de agua en solo un estrato (IDEAM, 2013; IGME, 2002). Entre más información se tenga, más propenso es para su selección.
3. Monitoreo en cuerpos de agua superficial: Se seleccionan analizando los cuerpos de agua superficiales que posiblemente estén relacionados con el sistema hidrogeológico analizado (e.g., manantiales, norias, nacientes, ríos, etc.) (AMVA, 2017).
4. Monitoreo en zonas relevantes: Se privilegian los pozos en zonas de alta recarga, o zonas de alta vulnerabilidad, así como aquellos en diferentes usos de suelo o posibles fuentes de contaminación, como la actividad industrial (Piscopo, 2001; Chenini *et al.*, 2018).
5. Accesibilidad: Se puede acceder a los puntos de control. Entre mayor sea su facilidad en cuanto a caminos y propiedad del pozo, más propenso es seleccionar el pozo (División de Estudios y Planificación, 2019; AMVA, 2017).

Debido a que la mayoría de los puntos de control en acuíferos son pozos de monitoreo y de bombeo, el sistema subterráneo natural se ve perturbado, especialmente como resultado de gradientes químicos e hidráulicos verticales inducidos (IDEAM, 2013).

Se reitera que es necesario tener datos suficientes sobre el diseño de los pozos y sobre las hipótesis conceptuales de trabajo de la hidrodinámica de las aguas subterráneas (IGME, 2002). Cuando se utilizan pozos ya existentes, es necesario conocer los detalles de construcción (diseño e instalación) y de cuál sistema hidrogeológico o nivel se debe extraer la muestra (IDEAM, 2013). Se debe cumplir que el agua que se recoge en el punto de control debe reflejar agua subterránea procedente de la misma profundidad dentro del sistema hidrogeológico, y la construcción de los pozos no debe alterar el flujo (IGME, 2002).

Los puntos seleccionados para el sistema de control hidrogeoquímico, propuesto para la zona de estudio, deberán ser muestreados al menos dos veces al año, de tal manera que se logre la representatividad de dos escenarios hidrológicos principales (*i.e.*, período húmedo y período seco) (AMVA, 2017). Además, se recomienda fuertemente la medición *in situ* de forma automática, como mínimo, del nivel piezométrico. Las muestras deben tomar todas las precauciones para garantizar que, en cuanto sea posible, las muestras no sufran ningún cambio durante el intervalo comprendido entre el monitoreo y el análisis (IDEAM, 2013). Es indispensable que antes de iniciar las campañas de muestreo, se tenga establecido un contrato con un laboratorio certificado, que analice las muestras tomadas.

Para la selección de pozos, se diseñó una cuadrícula para ubicar los puntos más importantes en cada sistema. Para ello, se tomó en cuenta el criterio de 1 pozo por cada 20-25 km<sup>2</sup> (véase Figura 34).



Figura 34. Cuadrícula diseñada para selección de puntos de muestreo.



### **3) Planeación de las campañas de monitoreo**

Una planeación previa de las campañas de muestreos permite optimizar el tiempo en trabajo de campo, evitar algunos contratiempos por mal funcionamiento de equipos o falta de otros dispositivos, y una coordinación adecuada para las actividades de campo y recepción de muestras en el laboratorio (AMVA, 2017). Se deberá considerar lo siguiente:

- a) Seleccionar puntos ubicados en una misma ruta, teniendo en cuenta las distancias y las vías de acceso existentes
- b) Comenzar en el punto más lejano y terminar en el más cercano para facilitar el regreso en caso de que el tiempo estimado se agote
- c) Comunicarse con los encargados donde se realizarán las mediciones para coordinar el acceso y obtener información sobre el estado de las vías, especialmente en zonas rurales
- d) El tiempo empleado en cada punto dependerá del entrenamiento del personal y de las condiciones de operación de la captación, como la necesidad de purgar el sistema
- e) La experiencia en la operación de la red de monitoreo permitirá estimar con mayor precisión la duración de cada muestreo
- f) Es recomendable contar con un mapa que muestre la ubicación de los puntos de la red y señalar los que se visitarán cada día, junto con una lista de direcciones y teléfonos útiles

### **4) Designar responsables**

Para asegurar el éxito de la red de monitoreo activa, se deberá entablar diálogo continuo con las comunidades locales, estancias gubernamentales, autoridades responsables de la gestión del agua y un panel de expertos en el tema de la hidrogeología. Además, se deberá tener en consideración las capacidades de cada uno de los participantes, de modo que se les provea con las herramientas adecuadas. Con ello, se pretende ahondar en el conocimiento del funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos, de manera continua y permanente. Un caso exitoso de una red de monitoreo de esta índole es el programa de Ciencia Ciudadana, realizado por la UNESCO, en comunidades de los andes centrales en Bolivia. En dicha ocasión, se equipó a la ciudadanía con distintos sistemas de comunicación (*e.g.*, radios, teléfonos, sensores, etc.); mientras se contactó a expertos en el tema de varias partes del mundo como universidades en Latinoamérica y Reino Unido. El objeto de esta iniciativa fue abonar a los conocimientos meteorológicos y climáticos que ya se tenían de la región con información en tiempo real, la cual sería comunicada directamente por los ciudadanos, lo cual derivaría finalmente en estudios con mayor detalle y precisión (UNESCO, 2021).

## 5. Sistemas hidrogeológicos

En esta sección se muestran los resultados de delimitación de los seis sistemas hidrogeológicos, según las características de cada sistema, como se ve en la Figura 35. Respecto a la superficie que se encuentra fuera de la delimitación de los sistemas, esta se excluyó pues no cumple con las características necesarias para ser considerado un sistema hidrogeológico. Aunque algunos de estos territorios coinciden con los polígonos delimitados por CONAGUA, fueron excluidos de la clasificación al considerar que no poseen las condiciones requeridas para ser catalogados como sistemas hidrogeológicos, específicamente en cuanto a su capacidad y tasa para el aprovechamiento del agua. Algunos de estos casos se observan en los acuíferos del *Arenal*, *Huejotitlán*, *Chapala* y *Poncitlán*.



Figura 35. Área de estudio, delimitación de los sistemas hidrogeológicos. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

Para el caso del sistema Atemajac (1), al norte se delimitó con trazos donde se encontraron contrastes entre los tipos de roca, siendo la correspondiente al acuífero de Toba Tala; a diferencia de la región con basaltos fracturados y roca extrusiva ácida del norte, que tampoco cuentan con permeabilidades medias ni altas. Asimismo, en la frontera oeste se trazó el límite siguiendo los límites contiguos con roca vítrea (e.g., El Colli, La Primavera, etc.), los cuales también son poco permeables para ser considerados sistemas hidrogeológicos. Por su parte, la delimitación al sur se



hizo aprovechando la unión entre el Arroyo Grande, que después se convierte en Arroyo Seco, la franja de andesitas impermeables (Cerro del Tesoro, Cerro del 4) y el paleo cauce del río San Juan de Dios, hasta topar con la roca basáltica del límite este, correspondiente al sistema hidrogeológico Los Altos, que cuenta con permeabilidad media, a diferencia de la permeabilidad alta de Atemajac.

El sistema Toluquilla (2) comparte frontera al norte con Atemajac, y también fue delimitado al oeste por las mismas formaciones de roca vítrea. Del mismo modo, al sur se observaron cambios de roca Toba y aluvial a basaltos y andesitas, que tienen permeabilidades menores. Así, diferentes formaciones geológicas lineales (*e.g.*, fallas y fracturas) que se encontraron en esta región, se unieron con el arroyo El Ahogado hasta topar con el río Santiago. Ahí, comenzó a trazarse el límite este, en donde se aprovechó el cambio de roca aluvial a basaltos, que coincide con el límite de la permeabilidad alta de la carta de aguas subterráneas.

En el caso del sistema Los Altos (3), que comparte frontera al oeste con Atemajac y Toluquilla, se delimitó, en su mayoría, en base a las permeabilidades medias que se tienen registradas en la región este del AMG. Esta cualidad ayudó a establecer los límites norte y sur del sistema, a pesar de estar conformada toda la zona por roca basáltica, aluvial y Toba Tala. Sin embargo, en la frontera este todavía no se consideraron factores abióticos más allá del límite metropolitano, ya que se utilizó la delimitación administrativa y las permeabilidades, pero no se analizaron otras cualidades como geología, edafología e hidrología, por mencionar algunas.

Al sur del sistema Toluquilla se encuentran los sistemas San Isidro (4), Cajititlán (5) e Ixtlahuacán de los Membrillos (6) (nombrados de oeste a este), los cuales se separaron del sistema hidrogeológico Toluquilla por la misma franja de diferentes rocas y permeabilidades, donde se agrupan diversas fracturas y fallas geológicas; cabe aclarar que estas formaciones fueron excluidas también de estas delimitaciones. Además, estos sistemas hidrogeológicos utilizaron un criterio similar al ya mencionado para marcar sus fronteras al sur, ya que, nuevamente, se tiene una frontera geológica natural de roca basáltica fracturada, con baja permeabilidad, en la cual se encuentra la Sierra Chupinaya - Cerro Viejo. La división entre los sistemas hidrogeológicos San Isidro y Cajititlán se realizó por una pequeña línea de formaciones geológicas, en dirección norte-sur, conformadas de andesitas y demás estructuras lineales. Existen distintas rocas subsecuentes a cada lado de dicha frontera, con Toba Tala en San Isidro y aluvial en Cajititlán. Asimismo, San Isidro se delimitó al oeste gracias a la red hidrográfica de INEGI, la cual ayudó a establecer su frontera más allá del límite del AMG. Asimismo, el sistema hidrogeológico denominado Ixtlahuacán de los Membrillos (6) se encuentra delimitado al oeste por la misma formación basáltica mencionada con anterioridad, aunque se decidió mantener una región de basaltos que sí están catalogados como zonas con alta permeabilidad.

## 6. Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca acuífera a la contaminación

La vulnerabilidad intrínseca acuífera a la contaminación se evaluó mediante dos métodos: GOD y DRASTIC. En esta sección se muestran los resultados y su correspondiente interpretación.

### 6.1. Método GOD

Utilizando la metodología GOD se determinaron las primeras zonas de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del agua subterránea. La Figura 36 muestra la clasificación de vulnerabilidad para cada sistema, donde las áreas en color rojo indican una vulnerabilidad muy alta, y las de color naranja representan una vulnerabilidad alta. Se observó que los sistemas hidrogeológicos de Atemajac, Toluquilla, San Isidro, Cajititlán e Ixtlahuacán de los Membrillos presentan una mayor vulnerabilidad a la contaminación, de acuerdo con esta metodología.

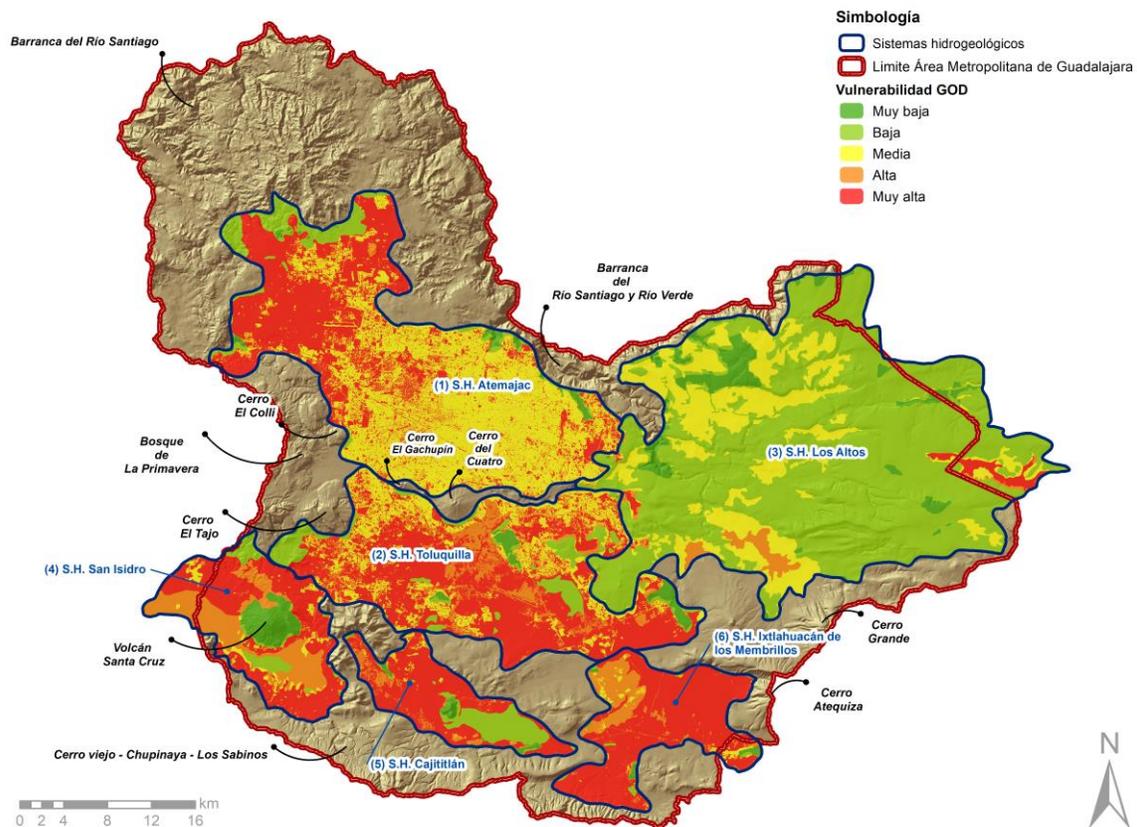


Figura 36. Mapa de la vulnerabilidad del agua subterránea por el método GOD en los sistemas hidrogeológicos delimitados. Elaboración propia mediante la metodología de Foster y Hirata (1988).

Un aspecto interesante que se destaca en el mapa anterior es la evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en el sistema de Los Altos. Se observa que este sistema presenta la menor



vulnerabilidad a la contaminación desde la superficie, lo cual puede atribuirse principalmente a la forma en que se calculó y a los insumos utilizados en la metodología GOD. Este sistema hidrogeológico está compuesto principalmente por basaltos fracturados en su litología, lo que facilita la infiltración y recarga de agua, resultando en un acceso potencial al arrastre de contaminantes. No obstante, la permeabilidad secundaria debido a la fracturación no se considera en la metodología GOD. Por esta razón, resulta relevante analizar diversas metodologías de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, para así, complementar los resultados obtenidos. Por ello, se utilizará también la metodología DRASTIC.

El análisis de la vulnerabilidad por sistema hidrogeológico delimitado resulta de gran utilidad para tomar medidas de conservación y enfocar esfuerzos en medir y calibrar los valores de las variables utilizadas *in situ*. Esto permite centrar la atención en los contaminantes que puedan estar afectando cada sistema hidrogeológico debido a las actividades realizadas en su superficie.

Según el método GOD (véase Figura 37) los sistemas hidrogeológicos que presentan mayor vulnerabilidad a la contaminación son Ixtlahuacán de los Membrillos (75% de vulnerabilidad muy alta y 17% con vulnerabilidad alta), Cajititlán (61% de vulnerabilidad muy alta y 9% con vulnerabilidad alta), Toluquilla (53% de vulnerabilidad muy alta y 11% de alta) y San Isidro (47% con vulnerabilidad muy alta y 29% con vulnerabilidad alta).

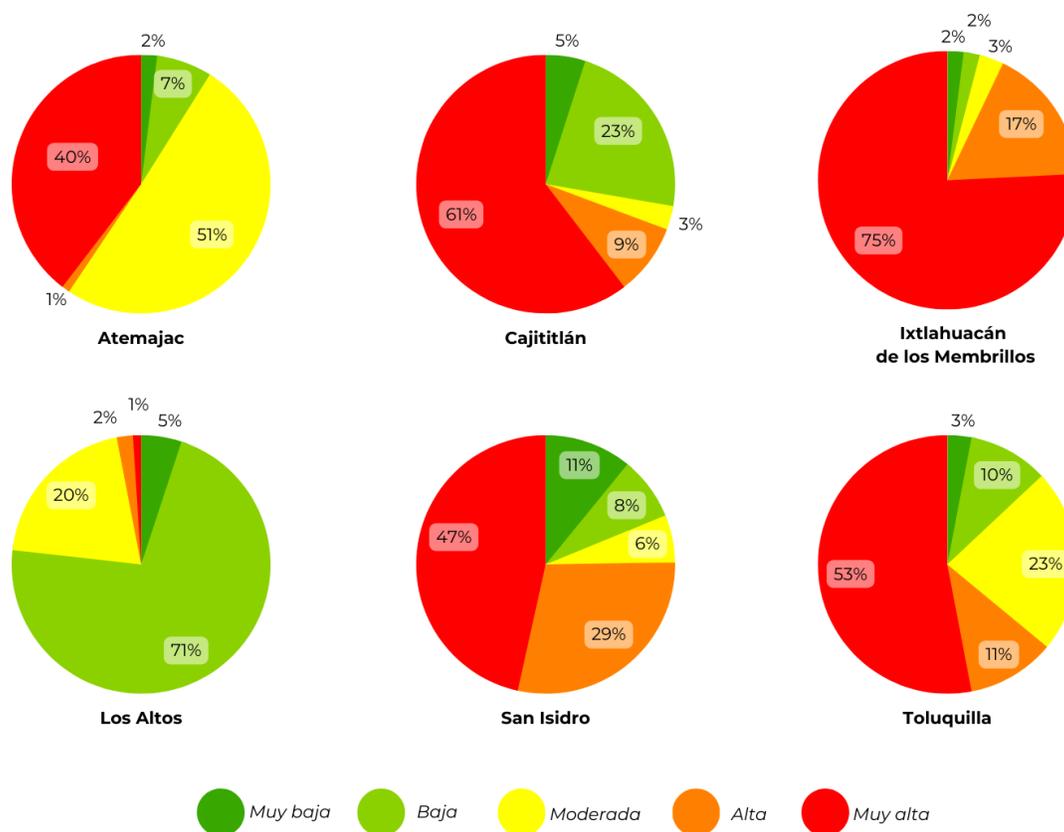


Figura 37. Proporciones de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, según el método GOD, dentro de los sistemas hidrogeológicos delimitados para el estudio. Elaboración propia a partir de los resultados de la aplicación del método GOD (Foster y Hirata, 1988).

Los mapas que indican las zonas con mayor vulnerabilidad actúan como guía para identificar áreas prioritarias que requieran conservación, o bien, donde se puede implementar un plan de manejo, debido a su mayor capacidad de infiltrar contaminantes (véase Figura 45). Sin embargo, para validar y mejorar la precisión de los resultados del análisis, se recomienda realizar mediciones y muestreos en campo, para mejorar la exactitud de los resultados.

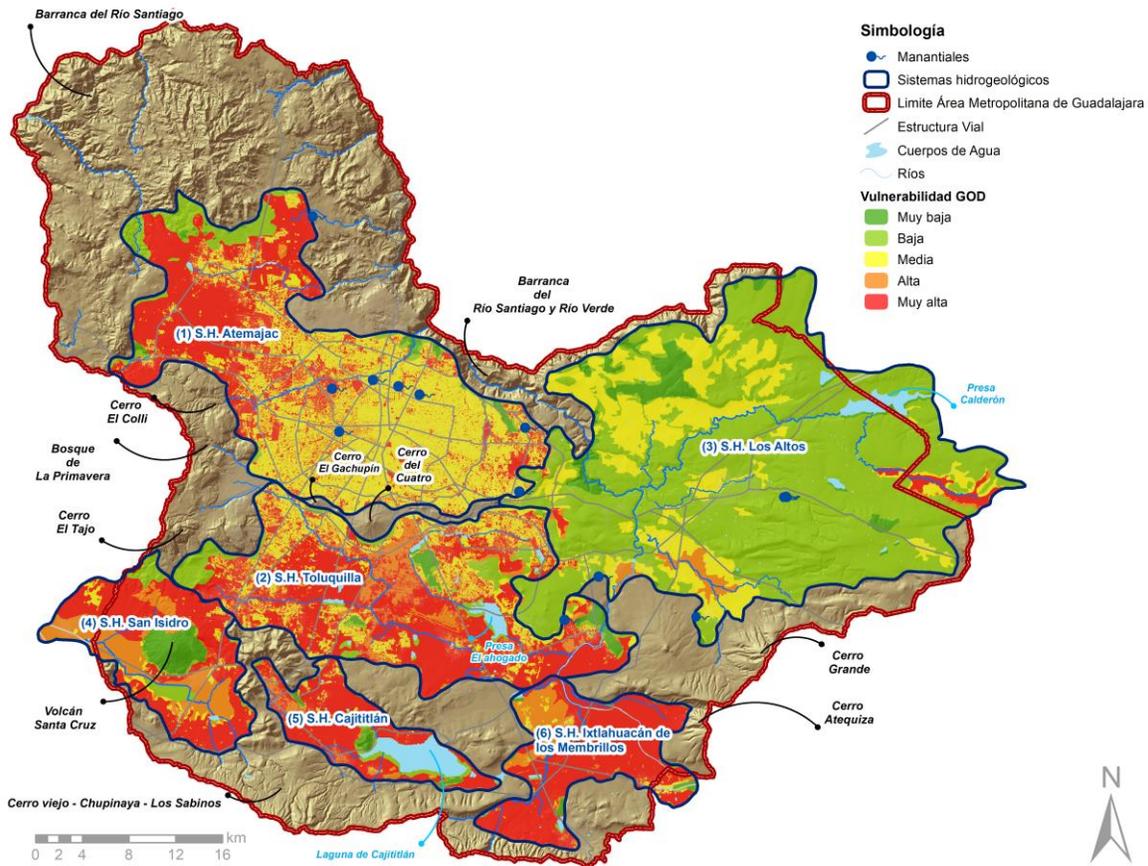


Figura 38. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el AMG. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988).

La urbanización y el desarrollo industrial tienen impactos significativos en el ciclo hidrológico de los sistemas hidrogeológicos, especialmente en la etapa de recarga (Foster & Chilton, 2003). Según los resultados del método GOD, las zonas mayormente urbanizadas dentro del AMG se clasifican principalmente con un grado de vulnerabilidad media. Estas áreas podrían considerarse casi impermeables, debido a la baja capacidad de infiltración del agua en el subsuelo. No obstante, es importante tener en cuenta que las zonas urbanizadas o asfaltadas reducen la vulnerabilidad intrínseca del sistema hidrogeológico, según el enfoque de estas metodologías, pero también pueden representar focos potenciales de riesgo debido a la generación de contaminantes.

Es relevante mencionar que en la metodología GOD se consideraron las áreas verdes dentro de la mancha urbana como parte del análisis de vulnerabilidad. Estas se obtuvieron de la capa de uso de suelo y vegetación, basada en información de SEMADET (2020) y SENTINEL-2 (2022), proporcionada



por IMEPLAN. La capacidad de infiltración, y por ende la vulnerabilidad, aumenta en estas áreas verdes.

Los sistemas hidrogeológicos delimitados que presentan una mayor urbanización son Atemajac y Toluquilla. Aproximadamente el 52% de la superficie del sistema Atemajac se encuentra impermeabilizada por suelo asfaltado, al igual que alrededor del 33% del área del sistema Toluquilla. El porcentaje de área impermeabilizada por asfalto podría provocar modificaciones en los patrones de infiltración sobre los sistemas hidrogeológicos, así como en la concentración y descarga de contaminantes hacia el subsuelo (Foster *et al.*, 2002). En el sistema hidrogeológico de Atemajac (véase Figura 39) se pueden identificar algunas zonas dentro de la mancha urbana con vulnerabilidad alta, las cuales corresponden a áreas verdes como parques y bosque urbanos.

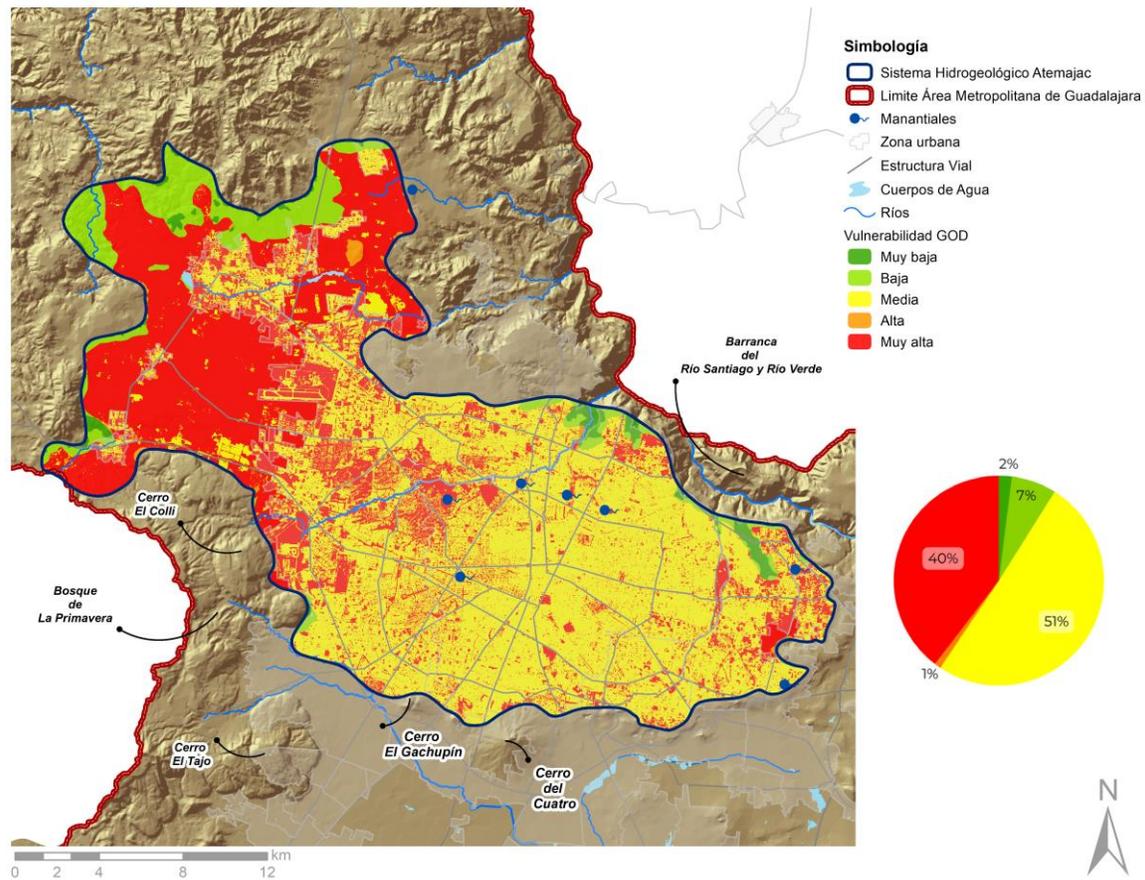


Figura 39. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico Atemajac. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988).

En la Figura 40 se muestra el mapa de vulnerabilidad a la contaminación del sistema hidrológico de Toluquilla. En este mapa, se pueden identificar algunas zonas en tonalidades verde que representan vulnerabilidad muy baja y baja, abarcando alrededor del 13% del sistema hidrogeológico. Esta clasificación se le puede asociar a la capa de litología de basalto fracturado. El S.H. de Toluquilla está conformado por zonas con muy alta vulnerabilidad a la contaminación. Las áreas categorizadas con vulnerabilidad alta y media corresponden, principalmente, a zonas urbanas, o que puedan tener

efectos en los patrones de infiltración hacia los sistemas hidrogeológicos, como se mencionó anteriormente.

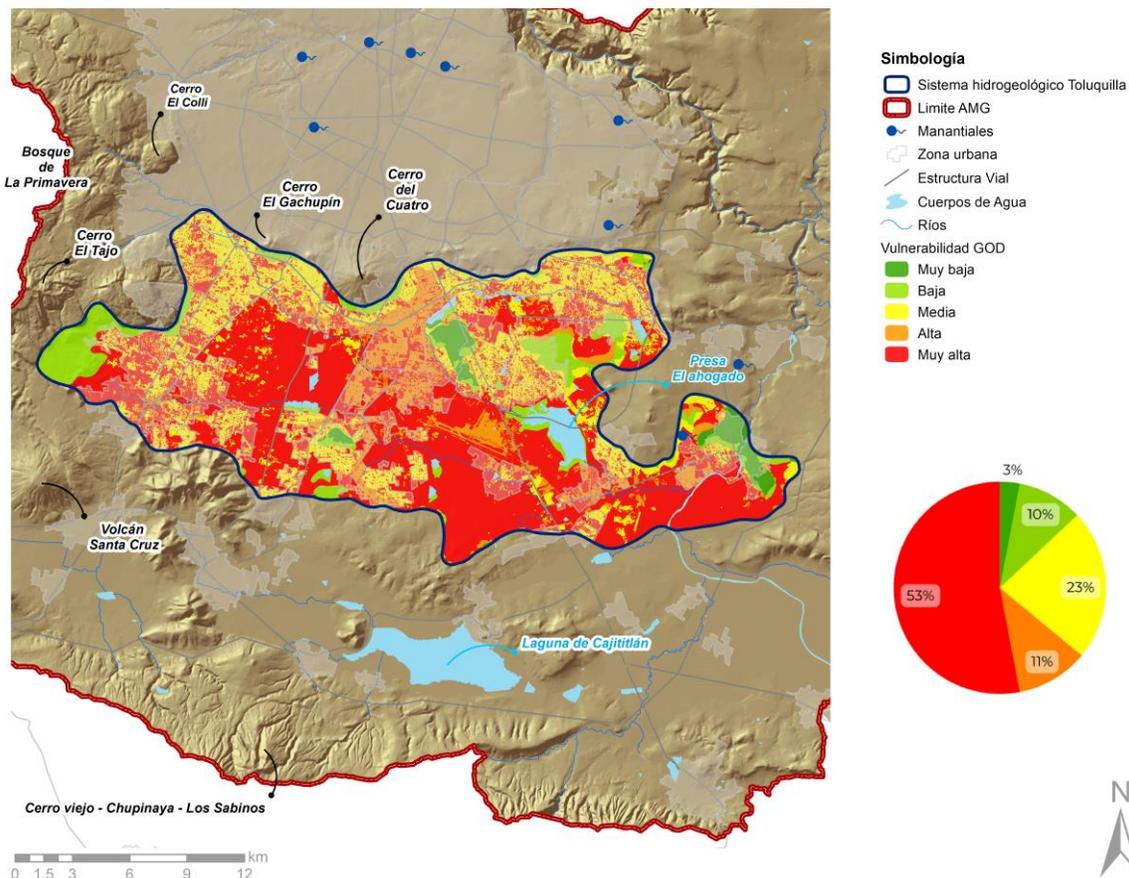


Figura 40. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico Toluquilla. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988).

En la Figura 41 se aprecia la distribución de la vulnerabilidad en el sistema hidrogeológico de Los Altos. La mayor parte de su superficie (71%) se encuentra en la categoría de vulnerabilidad baja, seguida de un 20% en la categoría de vulnerabilidad media y un 5% en vulnerabilidad muy baja. Este resultado se puede deber a que el sistema hidrogeológico de Los Altos está compuesto en gran parte por basaltos fracturados, lo que facilita la infiltración y recarga de agua, con la posibilidad de arrastrar contaminantes. Sin embargo, es importante señalar que esta permeabilidad secundaria debido a la fracturación no está considerada en la metodología GOD. Por lo tanto, es necesario analizar distintas metodologías de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, y en este caso, se complementará con la metodología DRASTIC para obtener una evaluación más completa y precisa.

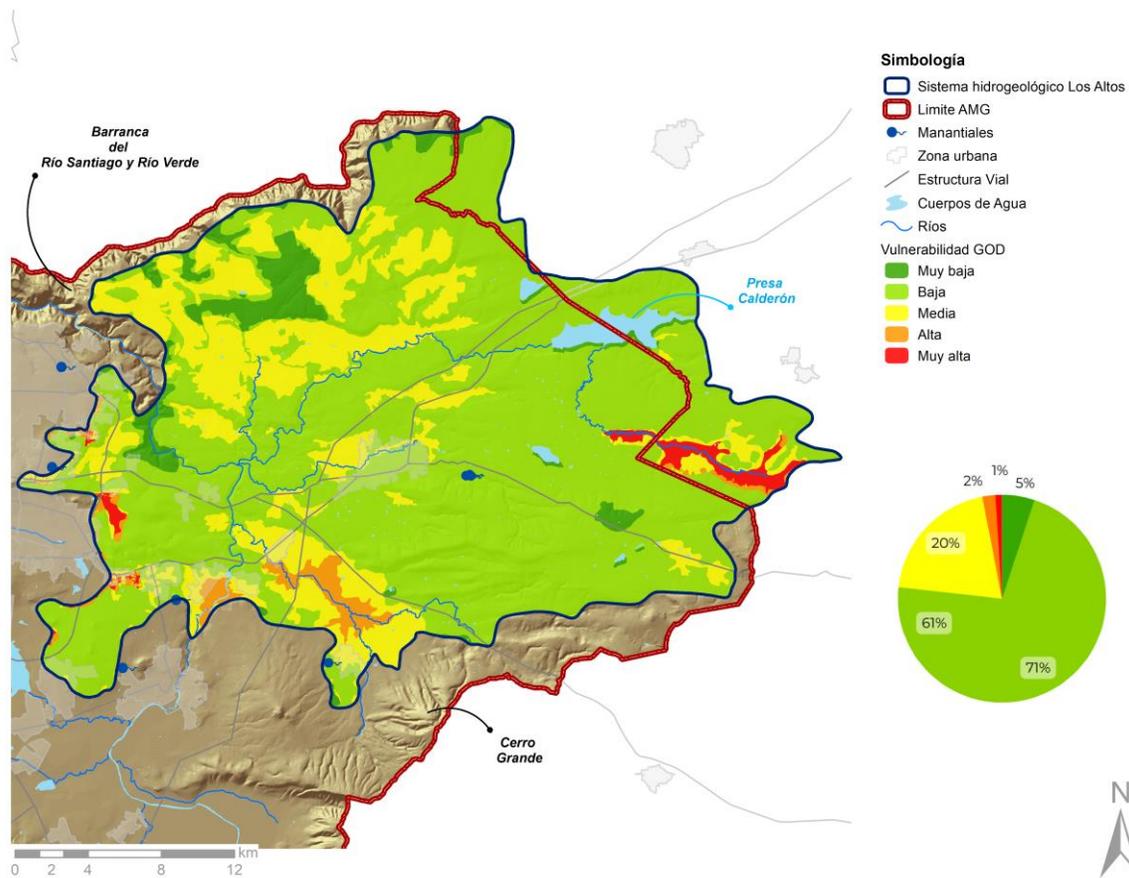


Figura 41. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico Los Altos. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988).

Dentro del sistema hidrogeológico San Isidro (véase Figura 42), aproximadamente el 47% de su superficie ha sido clasificada como área de vulnerabilidad muy alta, seguido por un 29% con vulnerabilidad alta. La presencia de zonas urbanas se concentra, principalmente, en áreas definidas con vulnerabilidad media a muy alta, lo que resalta la importancia de identificar estas zonas para establecer un plan de manejo o protección adecuado. Además, el sistema también cuenta con áreas de menor vulnerabilidad, con aproximadamente un 8% en la categoría de vulnerabilidad baja y un 11% de vulnerabilidad muy baja.

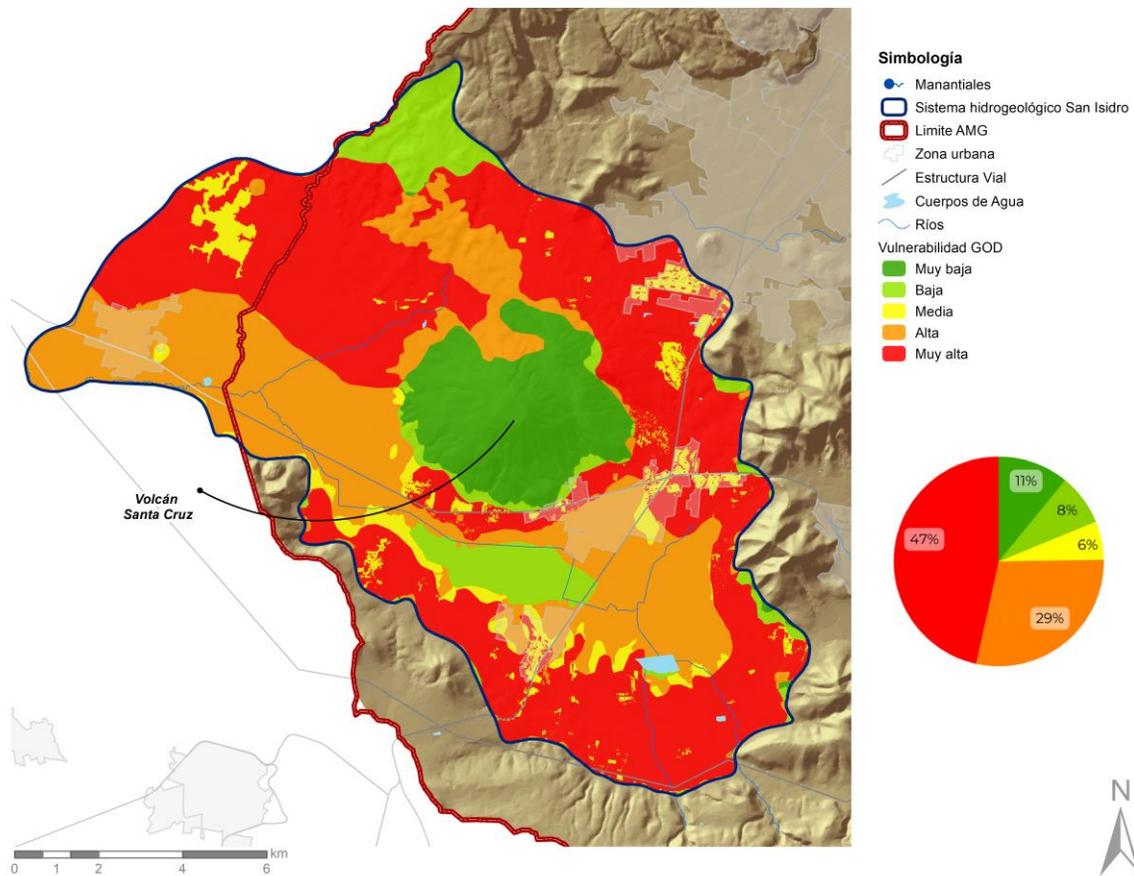


Figura 42. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico San Isidro. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988).

En la Figura 43, se muestra el mapa de vulnerabilidad a la contaminación del sistema hidrogeológico de Cajititlán. En este mapa, se identifican zonas de vulnerabilidad baja y muy baja en la periferia de la laguna de Cajititlán, representando aproximadamente el 28% del sistema. Sin embargo, la mayor proporción corresponde a la vulnerabilidad muy alta, abarcando el 61% del sistema. Esto destaca la relevancia de considerar este sistema como prioritario en los planes de protección a la conservación del agua subterránea ante la contaminación. Asimismo, las áreas urbanas dentro de este sistema están mayormente clasificadas con vulnerabilidad media, alta y muy alta, lo que enfatiza la necesidad de incluirlas en los planes de protección.

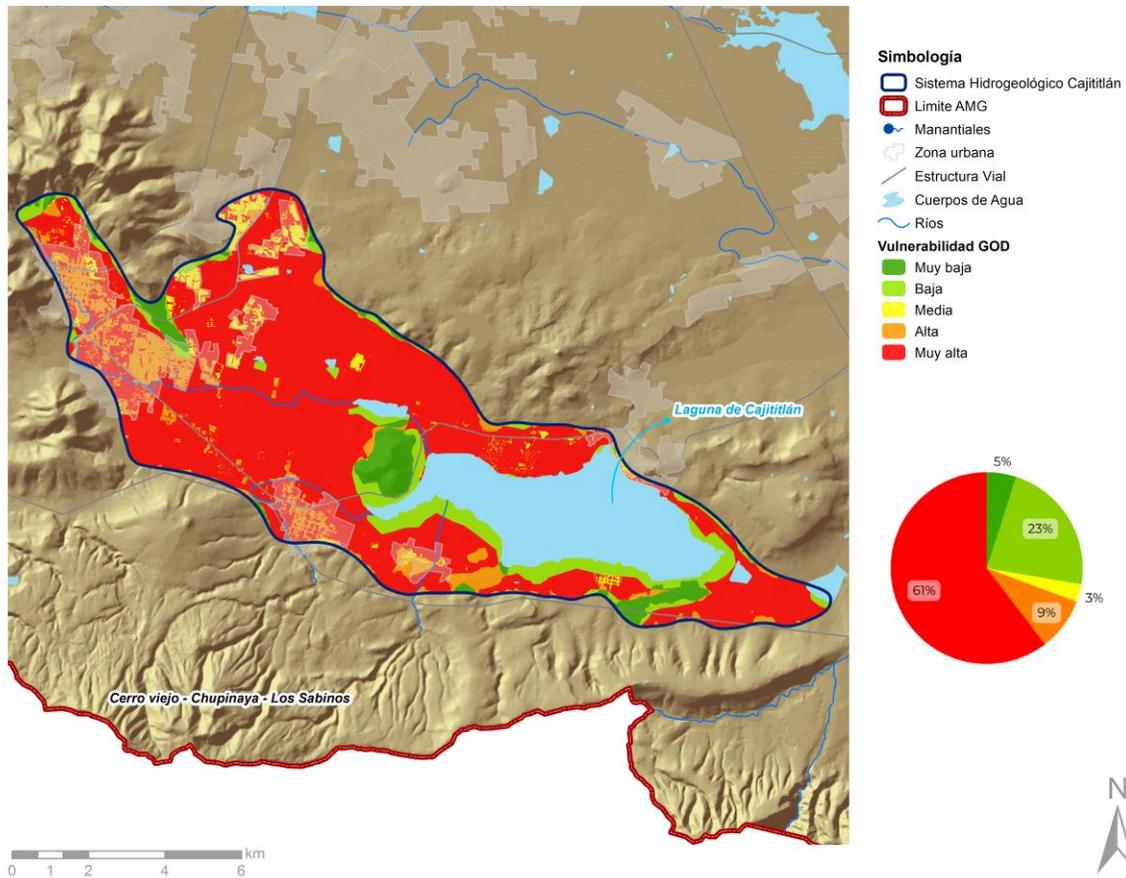


Figura 43. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico Cajititlán. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988).

Dentro del sexto sistema hidrogeológico, Ixtlahuacán de los Membrillos (véase Figura 44), se observa una dominancia de vulnerabilidad muy alta a la contaminación, abarcando específicamente tres cuartas partes del sistema (75%), seguida de un 17% de vulnerabilidad alta. Estos resultados resaltan la importancia de considerar también al sistema de Ixtlahuacán de los Membrillos como prioritario en los esfuerzos de protección y conservación del agua subterránea. Es especialmente relevante enfocar la atención en las zonas urbanas dentro del sistema, ya que la mayoría de ellas están categorizadas con vulnerabilidad media a muy alta. Estas áreas urbanas representan puntos críticos, que requieren medidas de protección y manejo adecuadas para preservar la calidad del agua subterránea.

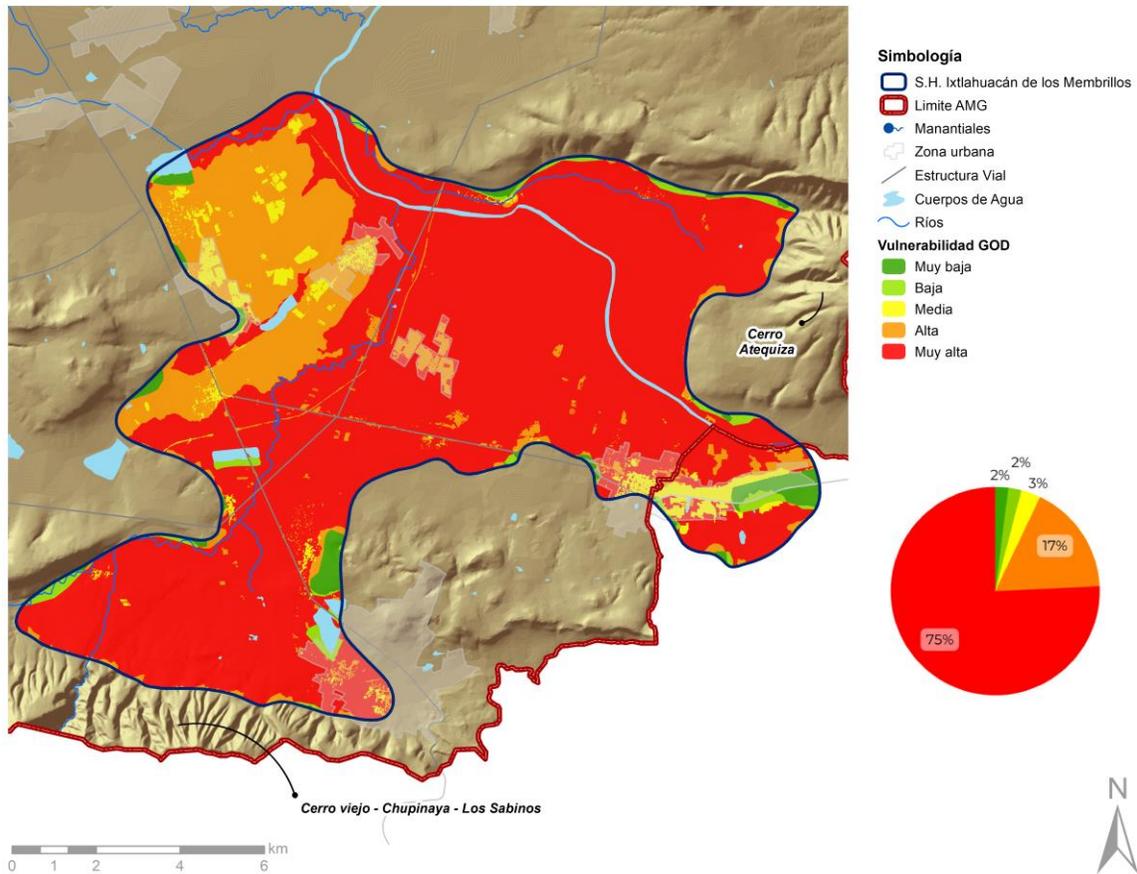


Figura 44. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método GOD en el Sistema hidrogeológico Ixtlahuacán de los Membrillos. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad GOD (Foster y Hirata, 1988).

Según Foster & Chilton (2003), uno de los problemas más significativos relacionados con la calidad del agua subterránea en áreas urbanas es la contaminación antropogénica. Esta contaminación ocurre debido a la falta de protección adecuada de los sistemas hidrogeológicos vulnerables frente a descargas o derrames. Estas descargas y derrames pueden originarse por diversas actividades humanas, como vertidos o derrames de sustancias químicas, manejo inadecuado de residuos, descargas industriales, sistemas de saneamiento *in situ*, fugas en el alcantarillado, pérdidas en lagunas de aguas residuales, prácticas agrícolas, entre otras. En la Figura 45 se presenta la ubicación de las plantas potabilizadoras y de tratamiento en operación, clasificadas según el gasto de operación en litros cada segundo. Estas instalaciones tienen como objetivo eliminar o reducir ciertos contaminantes presentes en el agua cruda, de modo que sea segura para el consumo humano. La cantidad y ubicación de estas plantas están relacionadas con la calidad del agua en sus respectivas zonas. Por ejemplo, la presencia de múltiples plantas potabilizadoras en una región puede sugerir que la calidad del agua en los sistemas hidrogeológicos no es óptima para el consumo humano, lo que motiva la necesidad de instalar estas plantas para su tratamiento.

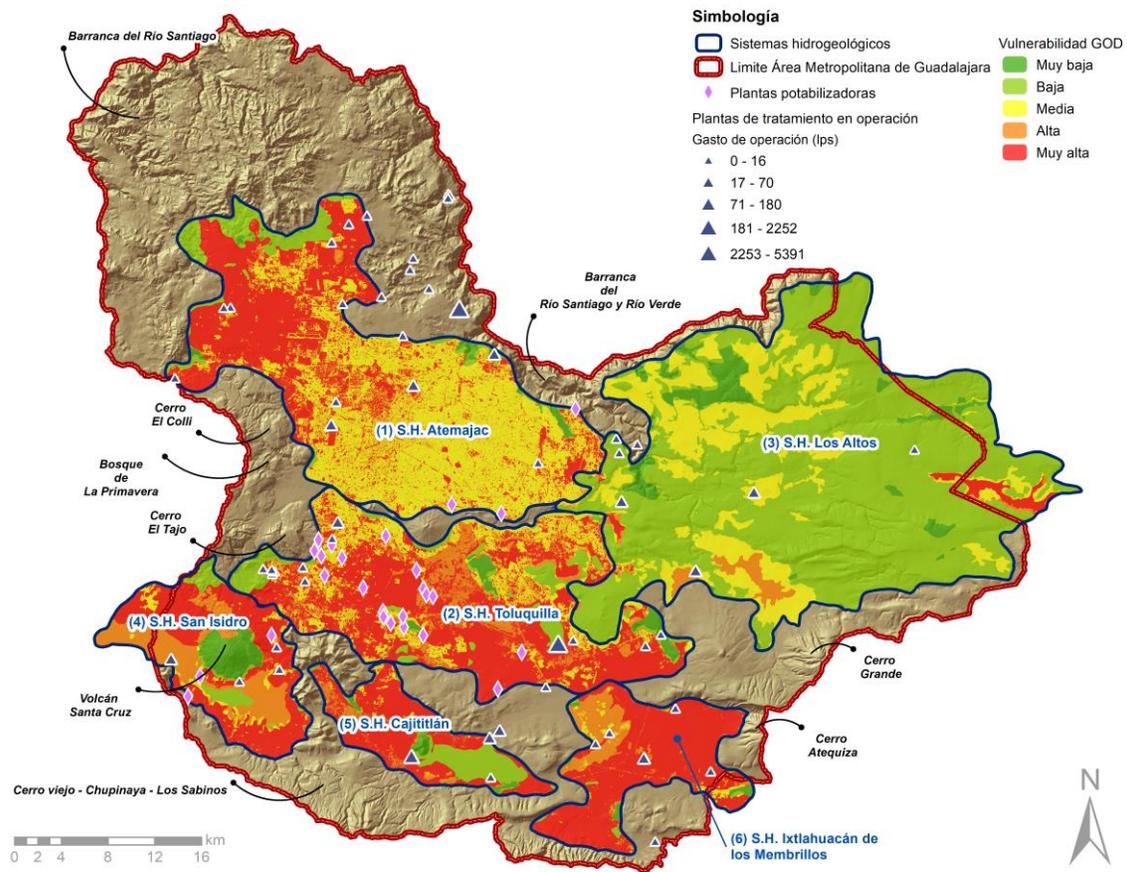


Figura 45. Mapa de la vulnerabilidad GOD con la ubicación de plantas de tratamiento y plantas potabilizadoras. Elaboración propia mediante la información de plantas de tratamiento, plantas potabilizadoras y la metodología de GOD (Foster y Hirata, 1988).

En los sistemas hidrogeológicos de Atemajac, San Isidro y Toluquilla se encuentran varias plantas potabilizadoras. Específicamente en Toluquilla, se registran 19 plantas de esta índole, lo que representa la mayor cantidad en el AMG. Estas plantas se localizan mayormente en zonas con vulnerabilidad media a muy alta, lo que revela que se encuentran en áreas sensibles desde el punto de vista de la contaminación del agua subterránea. Por otro lado, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) también pueden tener impactos en los sistemas hidrogeológicos. Esto se debe a la infiltración de efluentes tratados, que no eliminan por completo ciertos contaminantes y/o nutrientes, como sustancias químicas industriales, productos farmacéuticos, nitrógeno y fósforo, entre otros (Foster *et al.*, 2002). Es importante tomar en cuenta estos aspectos para asegurar que el tratamiento de las aguas residuales no repercuta negativamente la calidad del agua subterránea y, en última instancia, la salud y el bienestar de las comunidades que dependen de ella. Por tanto, es crucial establecer un monitoreo de las descargas de estas plantas, para evitar impactos negativos en los sistemas hidrogeológicos de la zona. En el caso del sistema Los Altos, se observa que cuenta con 7 PTAR ubicadas, mayormente, en áreas de vulnerabilidad baja, según el modelo GOD. Dentro del sistema Toluquilla, se encuentra la PTAR El Ahogado, una de las plantas de tratamiento con mayor capacidad en el AMG. Es relevante destacar que esta planta está ubicada en un área de vulnerabilidad baja, de acuerdo con el modelo GOD, lo que representa una ventaja en términos de

protección del agua subterránea. En general, se enfatiza la importancia de implementar programas de monitoreo para evaluar los parámetros de calidad del agua en las descargas de todas las PTAR, tanto públicas como privadas. Este monitoreo constante permitirá detectar y abordar de manera temprana cualquier problema potencial de contaminación y asegurar la protección efectiva de los recursos hídricos subterráneos en el AMG.

Como se mencionó anteriormente, existen diversas fuentes de contaminación del agua subterránea, y un ejemplo destacado son los rellenos sanitarios. Estos sitios pueden tener un impacto significativo en el estado de un sistema hidrogeológico, si no son gestionados adecuadamente. En los rellenos sanitarios y otras infraestructuras de residuos sólidos urbanos, los desechos sólidos pueden contener sustancias químicas peligrosas, como amonio, hidrocarburos y metales pesados, los cuales, al infiltrarse en el suelo, tienen el potencial de contaminar el agua subterránea (Foster *et al.*, 2002). Por tanto, es fundamental implementar prácticas de manejo adecuadas en los rellenos sanitarios para prevenir la filtración de sustancias peligrosas y garantizar la protección del recurso hídrico subterráneo.

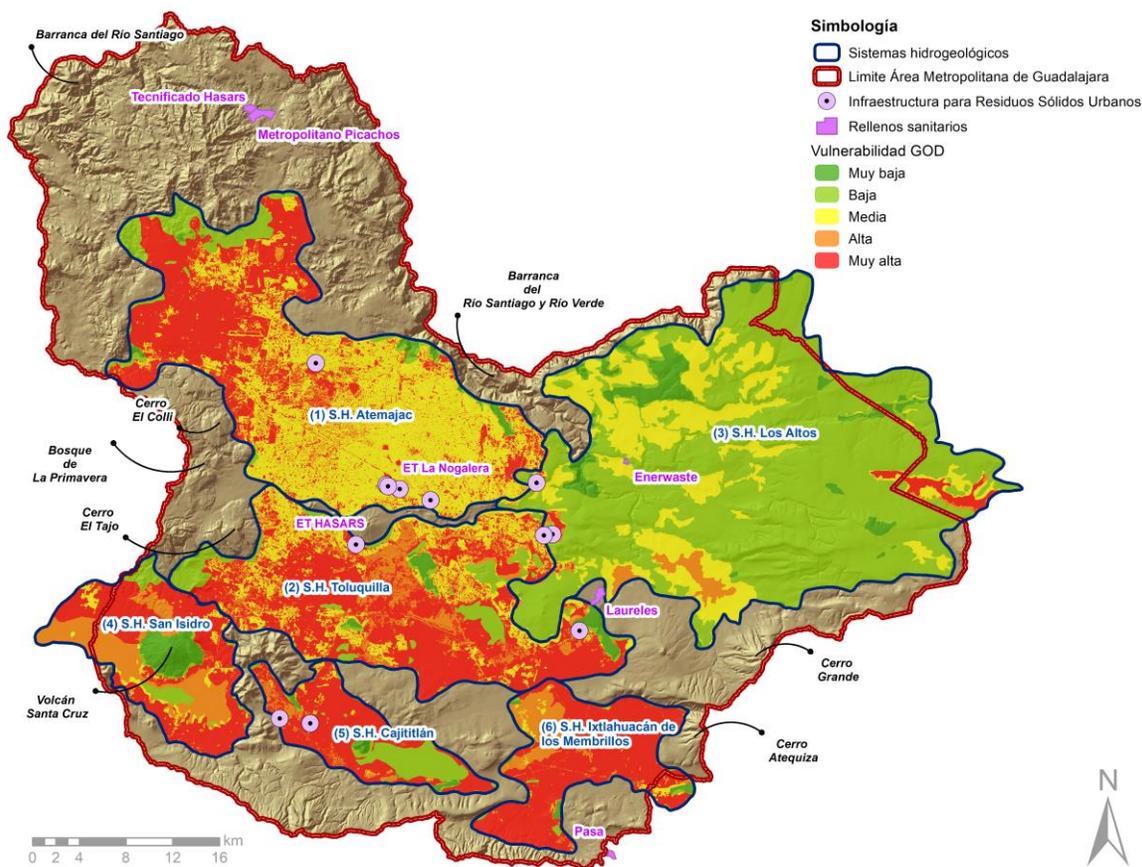


Figura 46. Mapa de la vulnerabilidad GOD con la infraestructura de manejo de residuos sólidos urbanos. Elaboración propia mediante información de rellenos sanitarios, infraestructura de residuos sólidos urbanos y la metodología de GOD (Foster y Hirata, 1988).

En el mapa presentado en la Figura 46 se muestra el grado de vulnerabilidad del sistema hidrogeológico y la ubicación de la infraestructura para residuos sólidos urbanos, incluyendo los



rellenos sanitarios, dentro del AMG. En total, el AMG cuenta con cinco rellenos sanitarios: Metropolitano Picachos, Tecnificado Hasars, Enerwaste, Laureles y PASA. Sin embargo, solo dos de ellos se encuentran dentro o en las proximidades de los sistemas hidrogeológicos que fueron objeto de estudio. Los rellenos sanitarios Metropolitano Picachos y Tecnificado Hasars se ubican al norte del AMG, fuera de los polígonos de los sistemas hidrogeológicos estudiados, al igual que el relleno sanitario PASA, que se encuentra en la periferia sur del AMG. El relleno sanitario de “Los Laureles” se encuentra entre dos sistemas hidrogeológicos, Toluquilla y Altos. Toluquilla está en contacto con este relleno sanitario en zonas con vulnerabilidad “Muy alta” alrededor, lo que representa un riesgo a la contaminación del agua en comparación con el sistema Los Altos, cuyo grado de vulnerabilidad es medio. Además de los rellenos sanitarios, el mapa también muestra la ubicación de la infraestructura para residuos sólidos urbanos dentro del AMG, en su mayoría estaciones de transferencia, que no presentan un riesgo puntual como lo hacen los rellenos sanitarios. No obstante, para todas las infraestructuras y rellenos sanitarios ubicados en zonas de vulnerabilidad muy alta y alta, se recomienda implementar planes de manejo de residuos adecuados para evitar la contaminación, así como llevar a cabo un monitoreo constante de los sitios.

Otra posible fuente de contaminación de las aguas subterráneas son las gasolineras. Estas pueden generar contaminantes significativos que afecten la calidad del agua subterránea, si no se manejan adecuadamente. La Figura 47 presenta el mapa de vulnerabilidad GOD junto a los registros de estaciones de PEMEX. De acuerdo con Foster *et al.* (2002), algunos contaminantes comunes en los sistemas hidrogeológicos son los hidrocarburos, benceno y fenoles, provenientes de derrames en estaciones de servicio. Por lo tanto, conocer la ubicación de las estaciones de PEMEX, en relación con el mapa de vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos, es crucial para implementar áreas de protección en zonas con vulnerabilidad media, alta y muy alta.

Se identificó que la mayoría de las estaciones (404 estaciones) están dentro de los sistemas de Atemajac y Toluquilla, específicamente en las zonas más urbanizadas del AMG. Debido a que estas áreas están asfaltadas, su vulnerabilidad suele ser media. Tal es el caso del sistema hidrogeológico Los Altos, donde las estaciones de PEMEX se encuentran principalmente en áreas de baja y media vulnerabilidad. En contraste, gran número de registros de estaciones de PEMEX se encuentran dentro de los sistemas hidrogeológicos de San Isidro, Cajititlán, Ixtlahuacán de los Membrillos y Toluquilla, en zonas con vulnerabilidad media, alta o muy alta. Estas áreas podrían considerarse potenciales puntos de contaminación de los sistemas hidrogeológicos, debido a derrames de hidrocarburos que pueda haber.

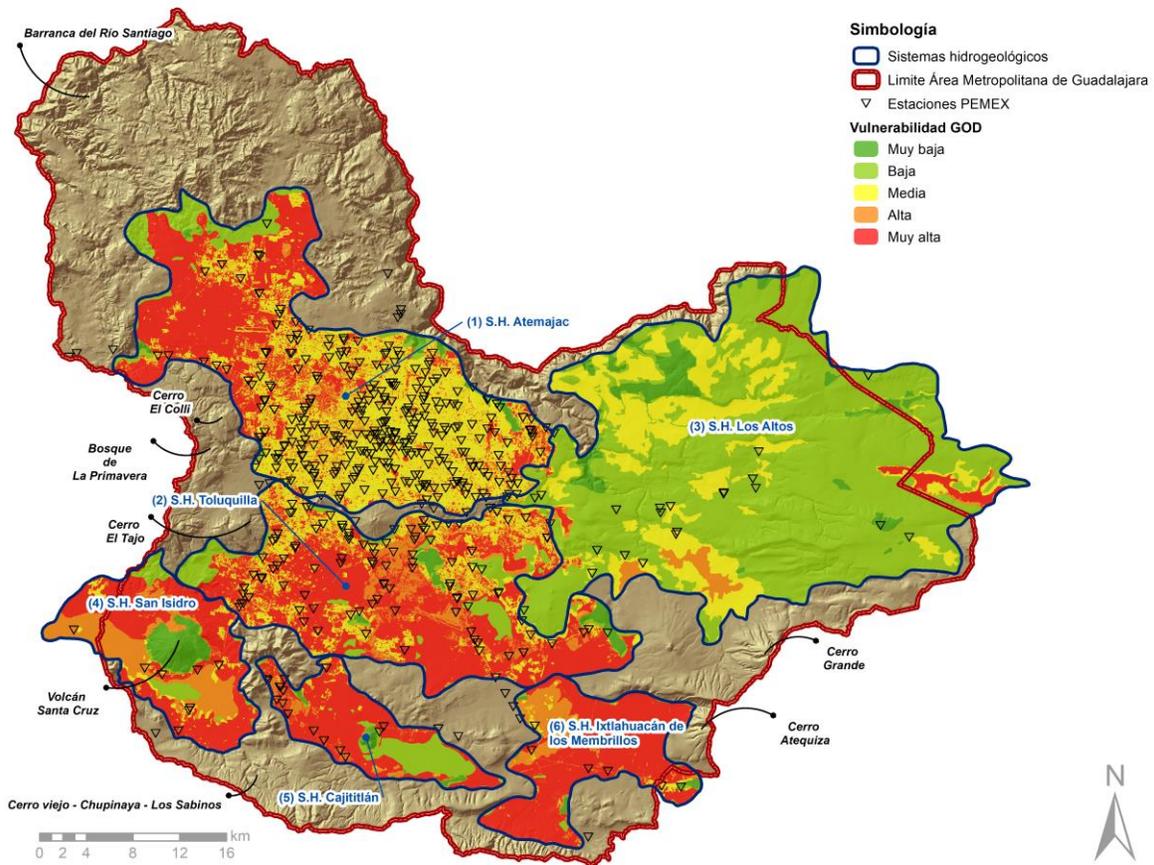


Figura 47. Mapa de la vulnerabilidad GOD con la densidad de gasolineras. Elaboración propia mediante información de gasolineras PEMEX y la metodología de GOD (Foster y Hirata, 1988).

## 6.2. Método DRASTIC

En este apartado, se presentan los resultados de las zonas de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del agua subterránea, para cada sistema hidrogeológico, los cuales se obtuvieron mediante la metodología DRASTIC y se muestran en el siguiente mapa. En esta representación, las zonas en color naranja y rojo presentan vulnerabilidad a la contaminación alta y muy alta, respectivamente; mientras que las zonas en tonalidades de verde presentan vulnerabilidad baja y muy baja (véase Figura Figura 48).

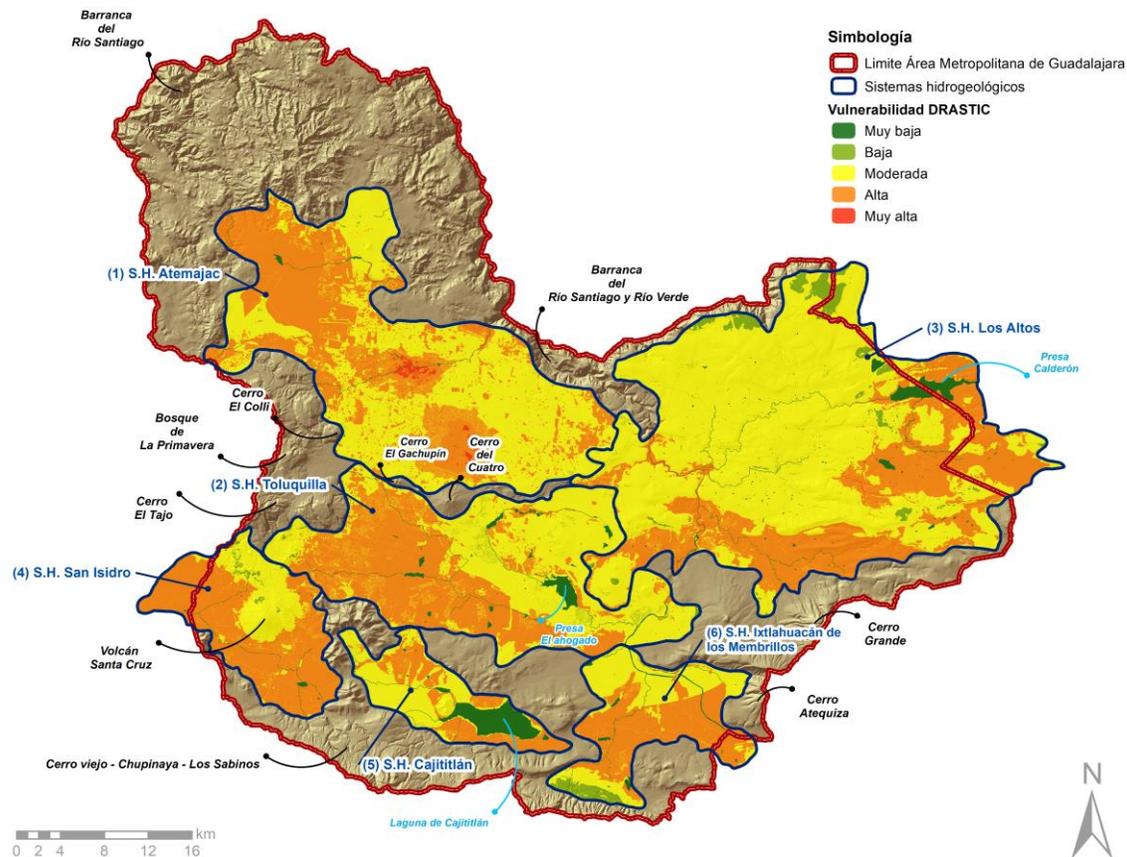


Figura 48. Mapa de la vulnerabilidad del agua subterránea por el método DRASTIC en los sistemas hidrogeológicos delimitados. Elaboración propia mediante la metodología de DRASTIC

En la figura 48 se pueden distinguir dos categorías predominantes de vulnerabilidad: “Moderada” y “Alta”. Por su parte, las áreas de color verde claro representan las zonas con vulnerabilidad “Baja” a la contaminación, las cuales se presentan como pequeñas áreas dispersas por los sistemas hidrogeológicos. Además, se identifican polígonos con vulnerabilidad “Muy baja” que, en su mayoría, corresponden a cuerpos de agua como lagunas y presas. Estos resultados se deben a que uno de los insumos de la modelación es la capacidad de recarga del sistema hidrogeológico, en la que los cuerpos de agua fueron catalogados con recarga poco significativa. Para una mayor comprensión de la interacción existente entre el agua superficial y la subterránea son necesarios estudios específicos y detallados. Sin embargo, es relevante señalar que, aunque no necesariamente representan un riesgo para el agua subterránea, evidentemente son embalses susceptibles a la contaminación superficial. De manera similar, se puede observar que las secciones urbanas y pavimentadas presentan una vulnerabilidad menor a la de sus alrededores, fenómeno asociado de igual forma con la capacidad de infiltración, debido a la proporcionalidad directa que se tiene entre susceptibilidad y capacidad de recarga de cualquier sistema hidrogeológico.

El análisis de la relación de vulnerabilidad, en función de los sistemas hidrogeológicos delimitados (véase Figura 49), proporciona una herramienta visual para comprender las porciones de superficie, por categoría, en cada sistema hidrogeológico, así como para la adopción de medidas de conservación de estas áreas en específico. Así pues, los sistemas que presentan una mayor

vulnerabilidad, según la metodología DRASTIC, son: San Isidro con un 69% de su superficie en categoría “Alta” y un 28% en categoría “Moderada”; Ixtlahuacán de los Membrillos con 52% de vulnerabilidad “Alta” y 40% de vulnerabilidad “Moderada”; Toluquilla con 44% de “Alta” y 52% “Moderada”; y Atemajac con 43% de “Alta” y 55% “Moderada” (véase Figura 49).

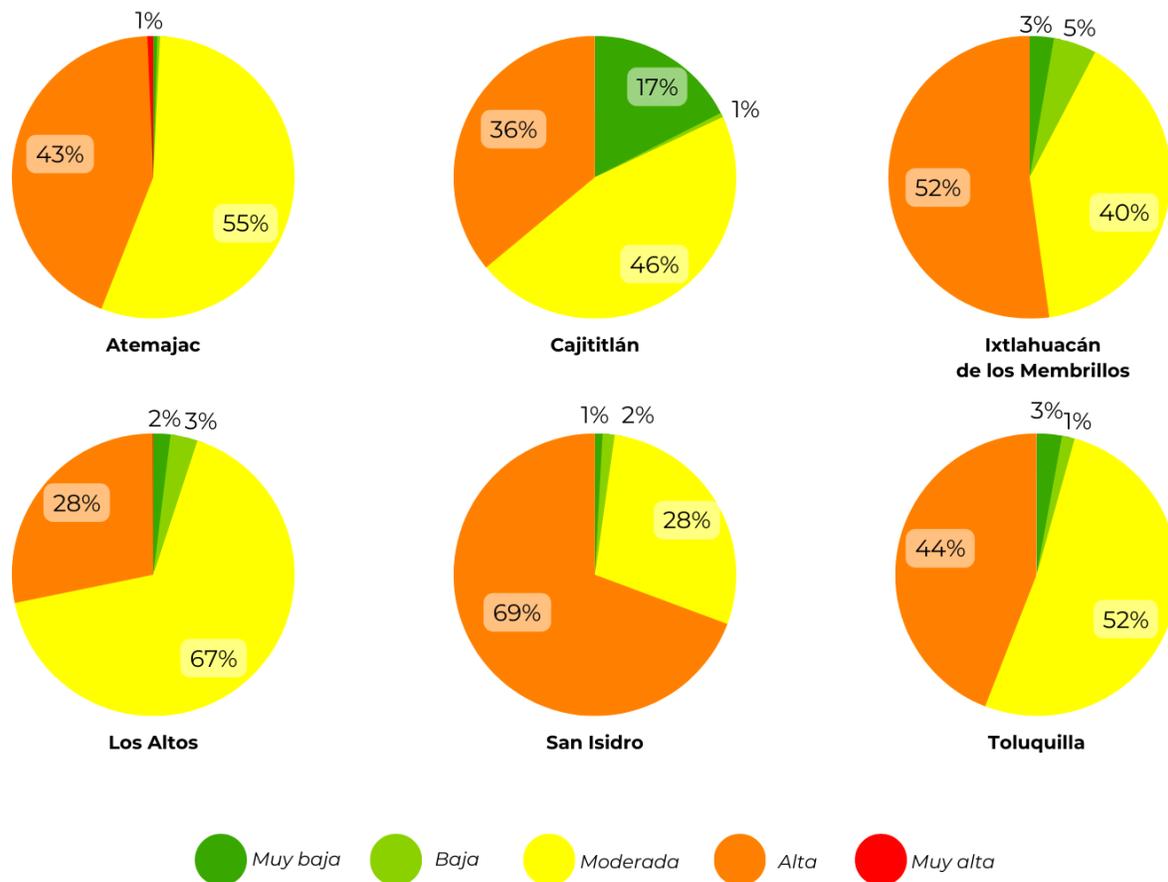


Figura 49. Proporciones de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, según el método DRASTIC, dentro de los sistemas hidrogeológicos delimitados para el estudio. Elaboración propia a partir de los resultados de la aplicación del método DRASTIC (Aller et al., 1987).

Tal como se detalló en el análisis de vulnerabilidad realizado mediante el método GOD, la urbanización y el desarrollo industrial ejercen impactos de importancia sobre el ciclo hidrológico de los acuíferos (Foster & Chilton, 2003). Por tanto, la coexistencia de estas áreas con aquellas de mayor vulnerabilidad puede proporcionar información adicional sobre los lugares prioritarios para la implementación de acciones de monitoreo y conservación.

En la Figura 50 se presenta el mapa de vulnerabilidad por sistema, en comparación con la zona urbana del AMG. A diferencia del mapa generado con el método GOD, en el cual las zonas urbanas se categorizaban principalmente como de vulnerabilidad “Moderada”, la aplicación de esta metodología revela que una parte sustancial de las áreas urbanas se encuentran ahora en la categoría de vulnerabilidad “Alta”, mientras que otra porción persiste en la categoría de vulnerabilidad “Moderada”.

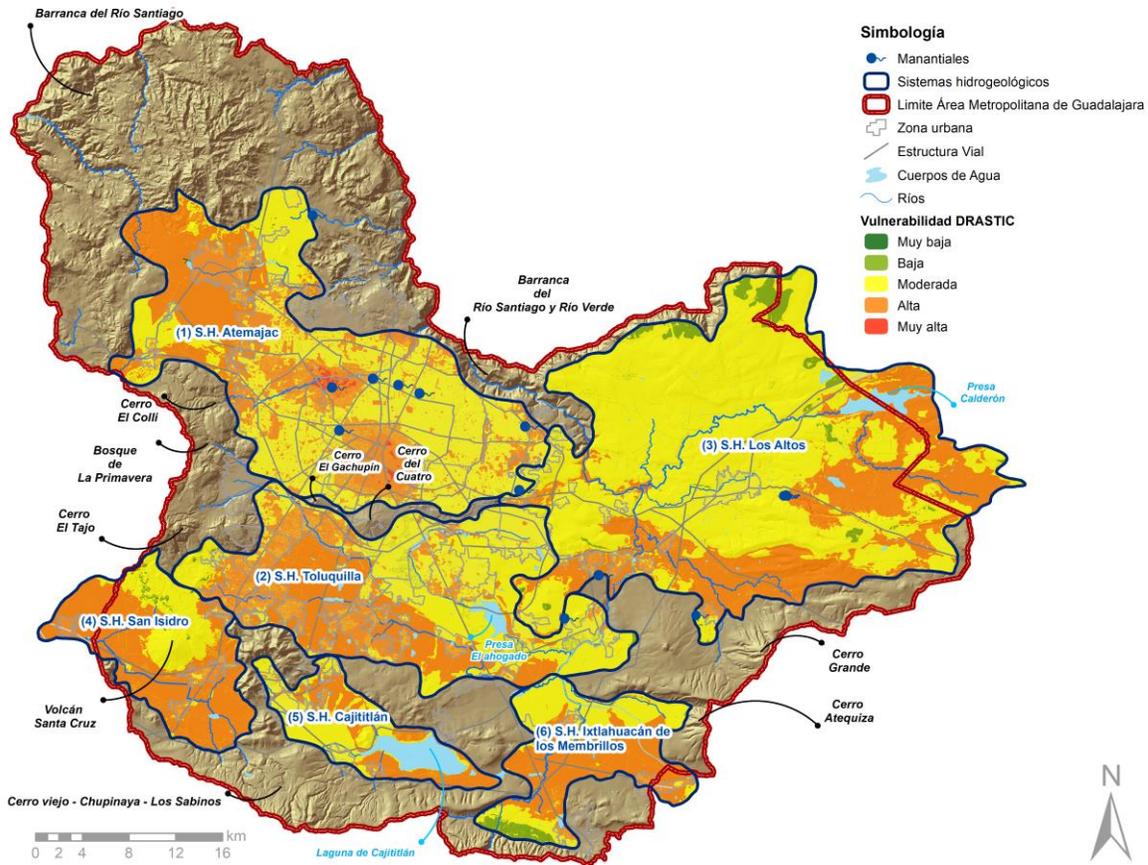


Figura 50. Mapa de la vulnerabilidad del agua subterránea por el método DRASTIC en los sistemas hidrogeológicos delimitados. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987).

La Figura 51 presenta el mapa de vulnerabilidad del sistema Atemajac, así como la delimitación de la zona urbana. Principalmente, se evidencian categorías de vulnerabilidad “Moderada” y “Alta” en todo el sistema hidrogeológico; a diferencia del análisis de vulnerabilidad hecho con el método GOD, en el cual se había identificado un patrón de vulnerabilidad moderada en áreas de uso urbano. En este caso se observa que las áreas predominantemente urbanizadas se encuentran en zonas con vulnerabilidad “Moderada”, “Alta”, y una porción “Muy alta”. Dicha intensidad de vulnerabilidad puede asociarse principalmente con la profundidad del agua subterránea (D) y el grado de atenuación de la zona no saturada (I). En cuanto a la distribución específica, el municipio de Guadalajara presenta regiones de vulnerabilidad “Alta” y “Muy alta” en las zonas sur y oeste, donde se encuentra la zona industrial y la colonia Providencia. Por su parte, Zapopan se caracteriza por tener mayormente la categoría “Alta” para vulnerabilidad, ya que esta se encuentra en las regiones de Tesistán; colonias como Providencia, Puerta de Hierro y Zona Real; y en las faldas de La Primavera, como en la zona del Bajío. Se hace gran énfasis en los alrededores del Bosque Los Colomos y la Zona Industrial, que son las partes del sistema hidrogeológico que muestran mayor susceptibilidad ante la contaminación, al encontrarse con clasificación “Muy alta”. Además, los municipios Tlaquepaque y Tonalá cuentan, en su mayoría, con vulnerabilidad “Moderada” y “Alta”, mostrando mayor urgencia

de protección Tonalá. Por supuesto, las colonias con abundante vegetación, y otros parques urbanos, suelen mostrar vulnerabilidad “Alta” en un contexto general de vulnerabilidad “Moderada”.

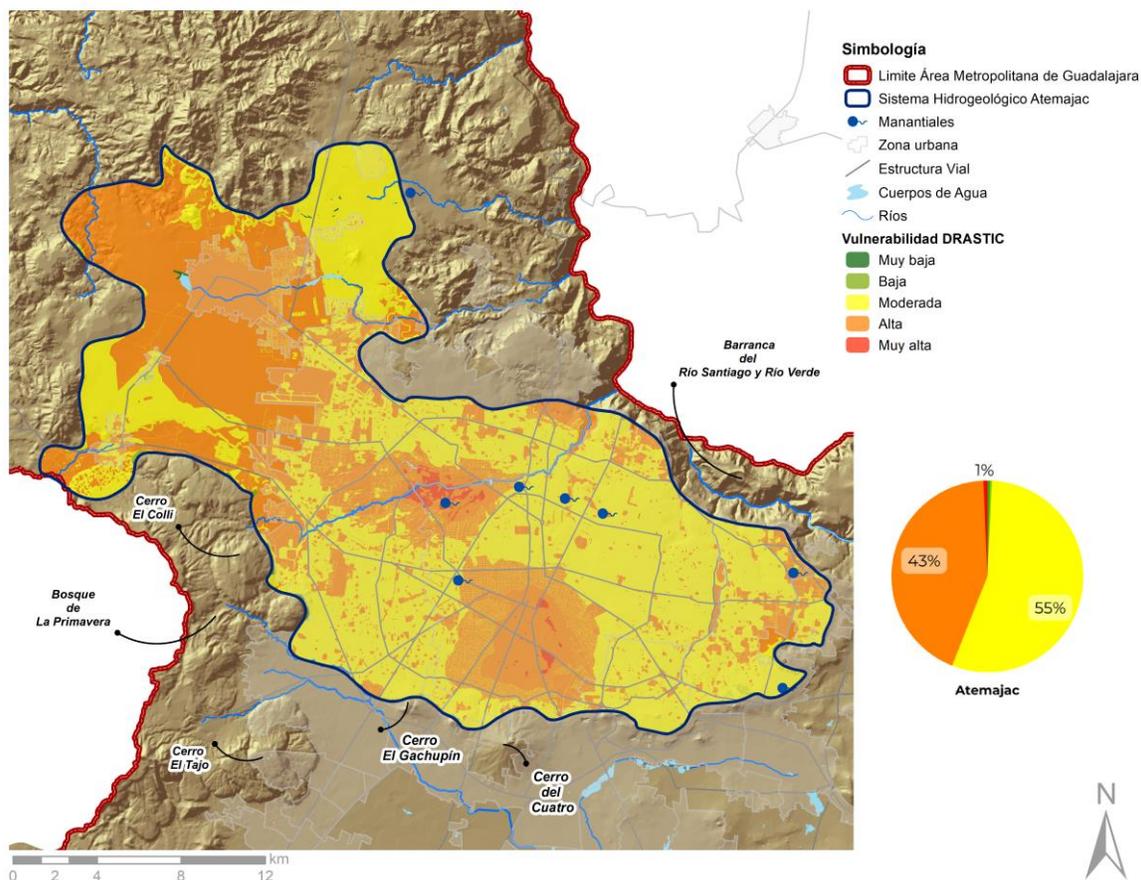


Figura 51. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico Atemajac. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987).

Dentro del Sistema Hidrogeológico de Ixtlahuacán de los Membrillos (véase Figura 52), la categoría predominante de vulnerabilidad es alta, abarcando más del 50% de la superficie del sistema. Hacia el norte de esta zona se identifica otra gran área de vulnerabilidad moderada, que representa el 41% del sistema. Por último, al suroeste del sistema hidrogeológico se encuentra una zona de vulnerabilidad baja que abarca 5% del área total. No se identificaron áreas de vulnerabilidad muy baja, a excepción de los cuerpos de agua dentro del sistema, ni de vulnerabilidad muy alta. La zona con vulnerabilidad baja corresponde a las laderas del Cerro. En cuanto a las áreas urbanas dentro del Sistema Ixtlahuacán de los Membrillos se encuentran ubicadas principalmente en espacios de alta vulnerabilidad, con algunas partes de moderada.

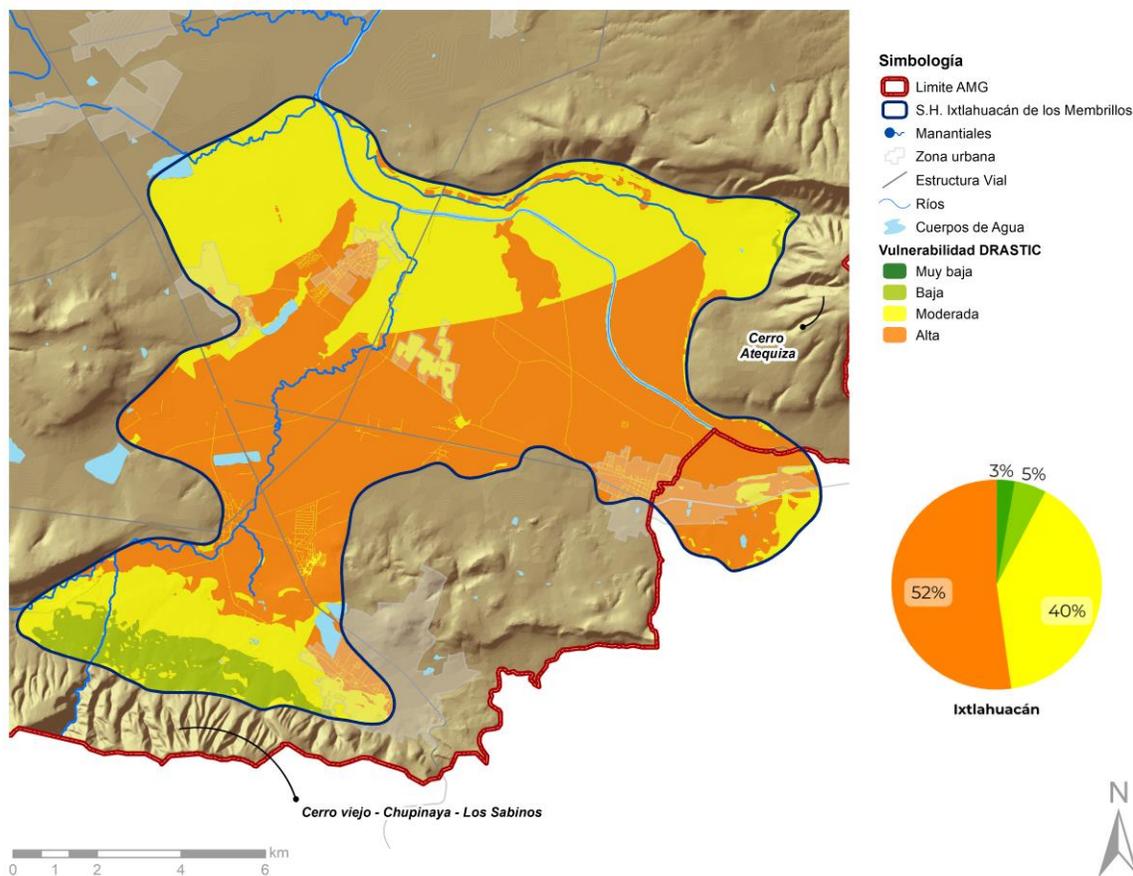


Figura 52. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico Ixtlahuacán de los Membrillos. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987).

En el Sistema Hidrogeológico de Cajititlán (véase Figura 53), la distribución de vulnerabilidad cambió significativamente, respecto a los otros sistemas previamente analizados. En este caso, se presenta un 17% del área de sistema con vulnerabilidad muy baja. Aunque este porcentaje corresponde a los cuerpos de agua dentro del S.H., el resto de la superficie se encuentra categorizada en vulnerabilidad alta y moderada, con un 36% y 46%, respectivamente. Las zonas urbanas dentro de este sistema hidrogeológico se encuentran dispersas en secciones con vulnerabilidad moderada y alta. Asimismo, se encuentran áreas pequeñas con vulnerabilidad baja, ubicadas en las vialidades de las zonas urbanas, debido a que la recarga en las zonas asfaltadas es poco significativa y, como se mencionó previamente, esta es una de las variables con mayor ponderación para la metodología DRASTIC.

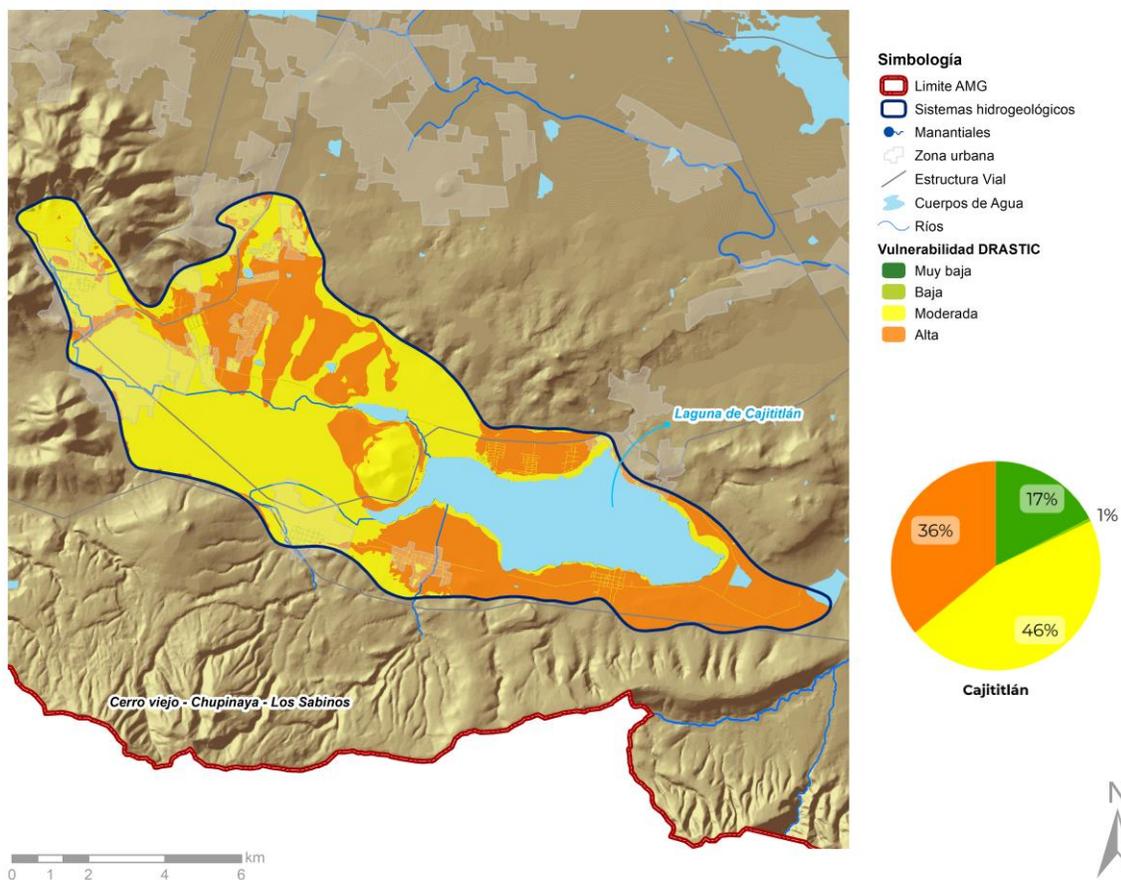


Figura 53. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico Cajititlán. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987).

El Sistema Hidrogeológico de Los Altos (véase Figura 54) es el que presentó mayores diferencias en los mapas de vulnerabilidad entre GOD y DRASTIC. El mapa que resultó de la metodología DRASTIC presenta el 67% de área como vulnerabilidad moderada y 28% en vulnerabilidad alta. Dentro del análisis GOD, gran parte de la superficie resultó con vulnerabilidad baja y otra parte en vulnerabilidad moderada, 71 y 20%, respectivamente. Este cambio se puede asociar a la diferencia de las variables utilizadas para cada metodología. En cambio, en el análisis DRASTIC se identificaron algunas áreas de menor tamaño con vulnerabilidad baja, las cuales representan el 3% de la superficie del S.H. Asimismo, se encontró que el 2% del área pertenece a zonas con vulnerabilidad muy baja, mismas que son cuerpos de agua. A diferencia de otros sistemas hidrogeológicos como Atemajac y Toluquilla, el S.H. Los Altos no cuenta con áreas urbanas tan grandes, por lo que la mayoría de su superficie corresponde a áreas agrícolas y forestales.

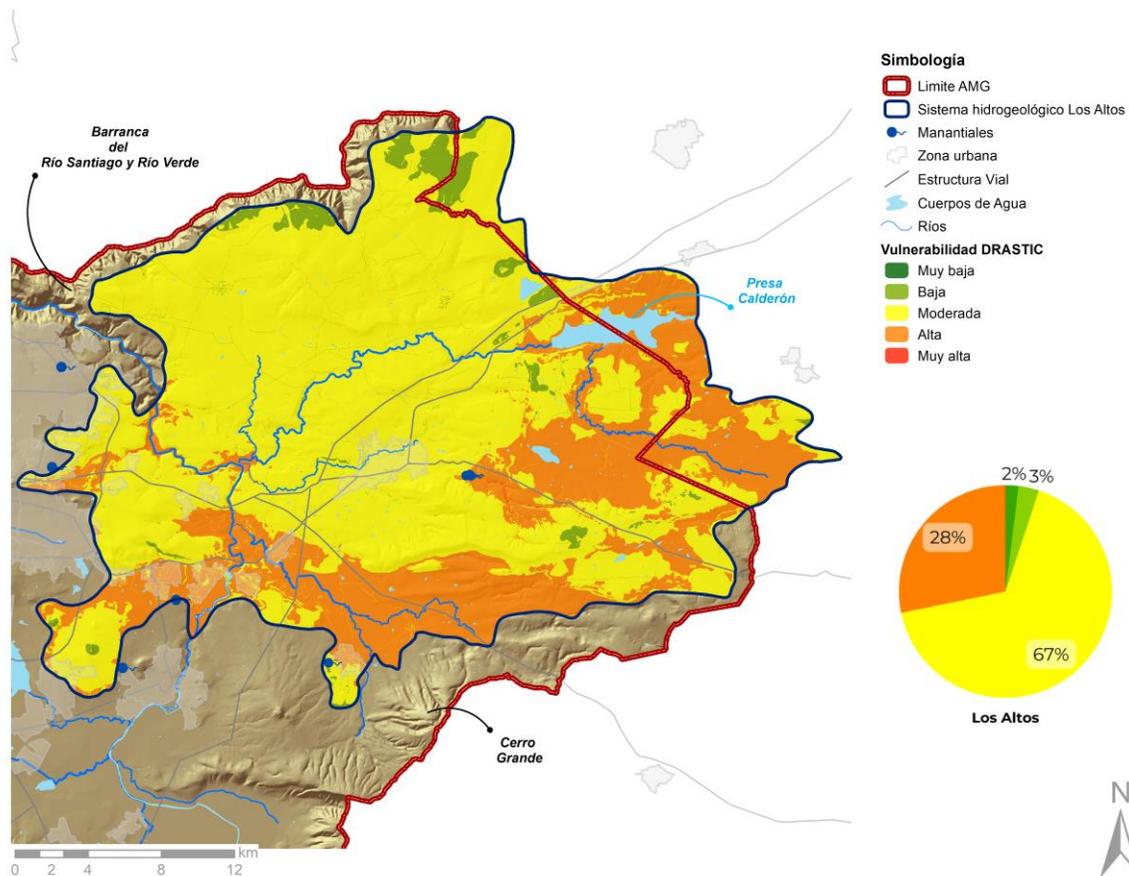


Figura 54. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico Los Altos. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987).

El Sistema Hidrogeológico San Isidro (véase Figura 55) fue el que presentó mayor superficie categorizada como vulnerabilidad alta a la contaminación, con 70%; seguido de 29% en vulnerabilidad moderada. Este S.H. también presentó algunas áreas pequeñas de baja vulnerabilidad, pero estas representaron únicamente el 1% de la superficie, por lo que no resultan de gran relevancia dentro del análisis. Las zonas urbanas dentro del S.H. San Isidro se encuentran principalmente en áreas con vulnerabilidad alta y pequeñas zonas de vulnerabilidad moderada, como calles y camellones.

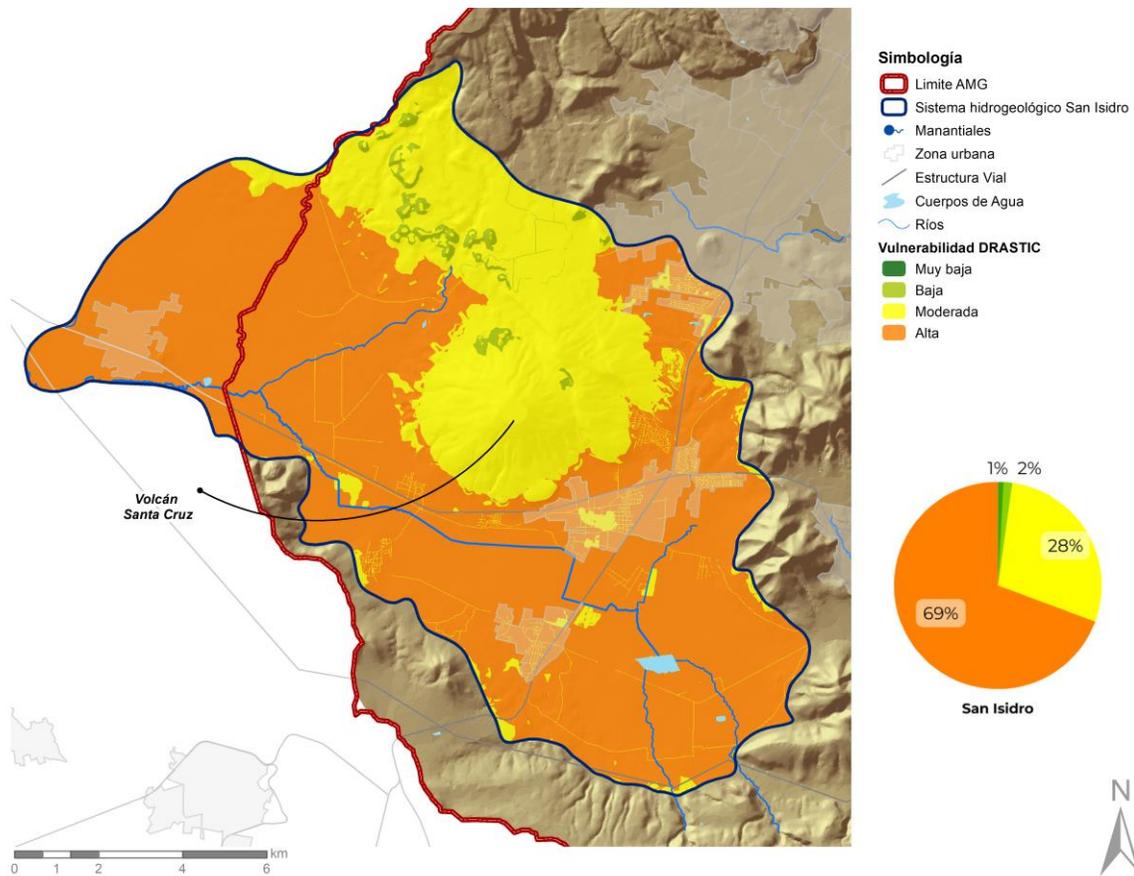


Figura 55. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico San Isidro. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987).

El Sistema Toluquilla (véase Figura 56), al igual que los demás sistemas hidrogeológicos, presenta como categorías de mayor importancia, las correspondientes a vulnerabilidad moderada y alta, representando el 52% y 44% de su superficie, respectivamente. Dentro de este sistema, se encuentran también áreas con niveles de vulnerabilidad baja, siendo estas mayoritariamente vialidades en zonas urbanas, que se sitúan en áreas catalogadas como de vulnerabilidad moderada. Se identificaron también espacios con vulnerabilidad muy baja, los cuales corresponden a cuerpos de agua como la presa El Ahogado y ríos, y abarcan el 3% de la superficie del S.H. Por su parte, las superficies con vulnerabilidad muy alta representan menos del 1% del área del sistema, por lo que no resultan de gran relevancia para el estudio.

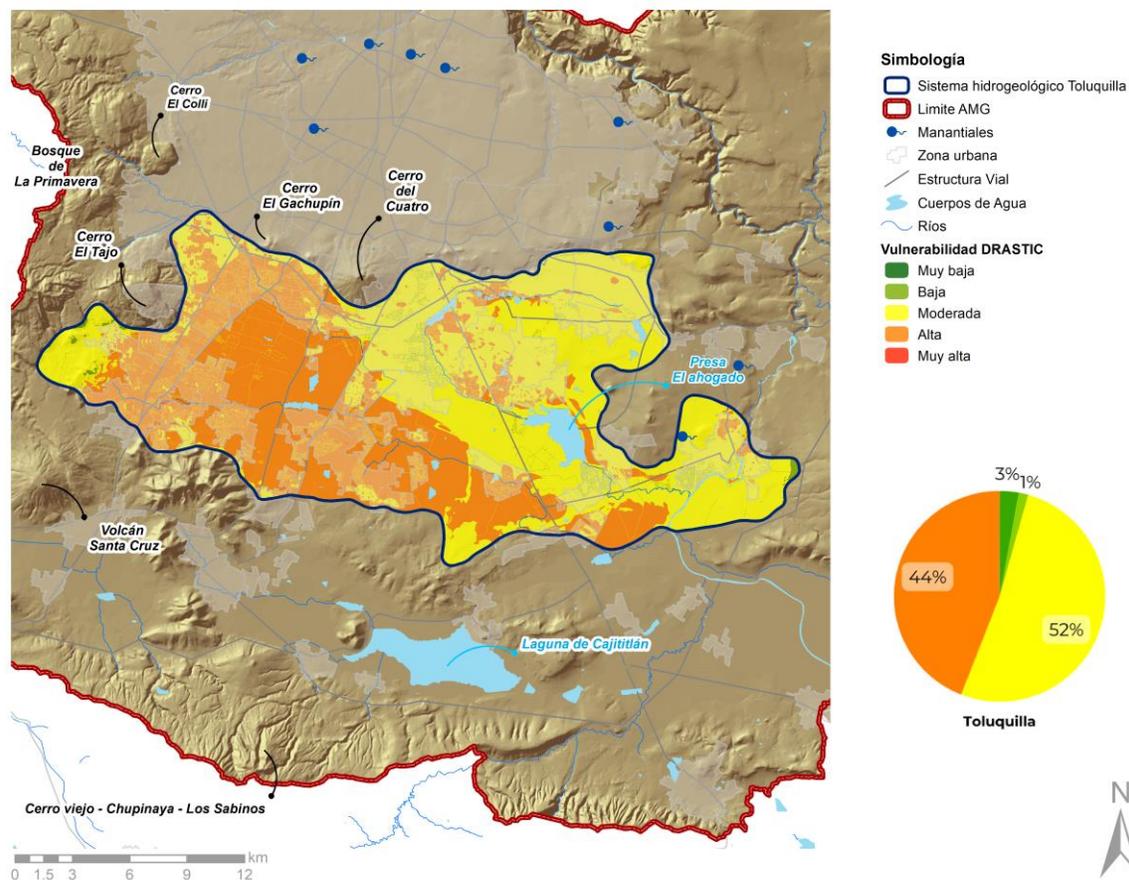


Figura 56. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación, según el método DRASTIC en el Sistema hidrogeológico Toluquilla. Elaboración propia mediante la capa de uso de suelo urbano, manantiales, hidrografía y vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987).

Como se ha mencionado previamente, en el análisis de vulnerabilidad GOD, uno de los desafíos más significativos, en términos de calidad del agua subterránea, está relacionado con la contaminación antropogénica. Las actividades como descargas o derrames de sustancias contaminantes representan una amenaza para los sistemas hidrogeológicos delimitados. Por ende, la identificación de áreas con mayor vulnerabilidad a la contaminación, en combinación con la localización de actividades humanas potencialmente contaminantes, brinda la posibilidad de aproximar las zonas que requieren medidas prioritarias de protección. Este enfoque podría dar lugar a la formulación de planes específicos de manejo y protección, así como a la implementación de programas adecuados de monitoreo.

En la Figura 57 se presenta el mapa de vulnerabilidad generado mediante el método DRASTIC, al igual que la ubicación de las estaciones de PEMEX, que representan fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea, en caso de derrames. Este mapa resulta altamente útil para identificar las áreas que requieren una mayor protección o implementación de programas de monitoreo rigurosos. Algunos de los contaminantes más comunes en el agua subterránea son hidrocarburos, benceno y fenoles, los cuales, en su mayoría, son provenientes de estaciones de esta índole que presentan derrames de sustancias.

En el Sistema Hidrogeológico Atemajac, las estaciones de PEMEX, que muestran la mayor densidad de puntos en comparación con otros sistemas, se encuentran ubicadas principalmente en áreas con vulnerabilidad “Alta” y “Muy alta”. En este contexto, sería de vital importancia enfocar la protección y el monitoreo en aquellas zonas que exhiben dichos estados de vulnerabilidad, al mismo tiempo que una alta concentración de estaciones de hidrocarburos. En los otros sistemas hidrogeológicos, si bien la cantidad de estaciones PEMEX es menor, es necesaria una supervisión rigurosa de aquellas estaciones localizadas en áreas de vulnerabilidad “Alta”.

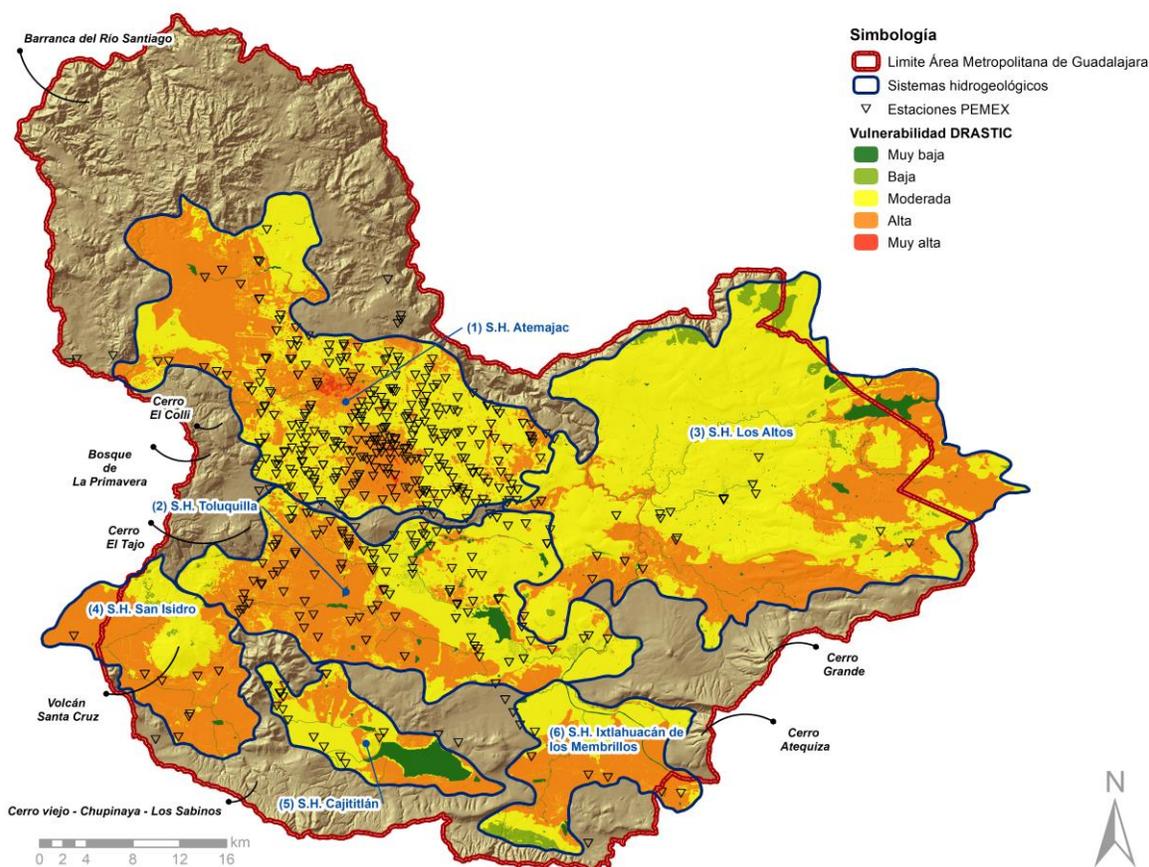


Figura 57. Mapa de la vulnerabilidad DRASTIC con la densidad de gasolineras. Elaboración propia mediante información de gasolineras PEMEX y la metodología de DRASTIC (Aller et al., 1987).

En la Figura 58 se muestra el mapa de vulnerabilidad DRASTIC, acompañado de las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) y las plantas potabilizadoras del AMG, que se encuentran en operación. Incorporar la localización de las PTAR y las plantas potabilizadoras en el mapa provee información relevante para analizar posibles áreas con mayor susceptibilidad a la contaminación ocasionada por descargas de contaminantes.

Las PTAR del AMG están ubicadas, mayormente, en áreas con vulnerabilidad “Moderada” y “Alta”. El S.H. Toluquilla es aquel que presenta el mayor número de plantas potabilizadoras, ubicadas sobre zonas de vulnerabilidad alta a la contaminación; motivo por el cual sería importante incorporar estas secciones en los programas de monitoreo. Asimismo, todas las plantas que dispongan de una

capacidad de tratamiento más significativa y que se encuentren en zonas de vulnerabilidad alta deberían someterse a una vigilancia más rigurosa, en lo que respecta a los parámetros de sus descargas.

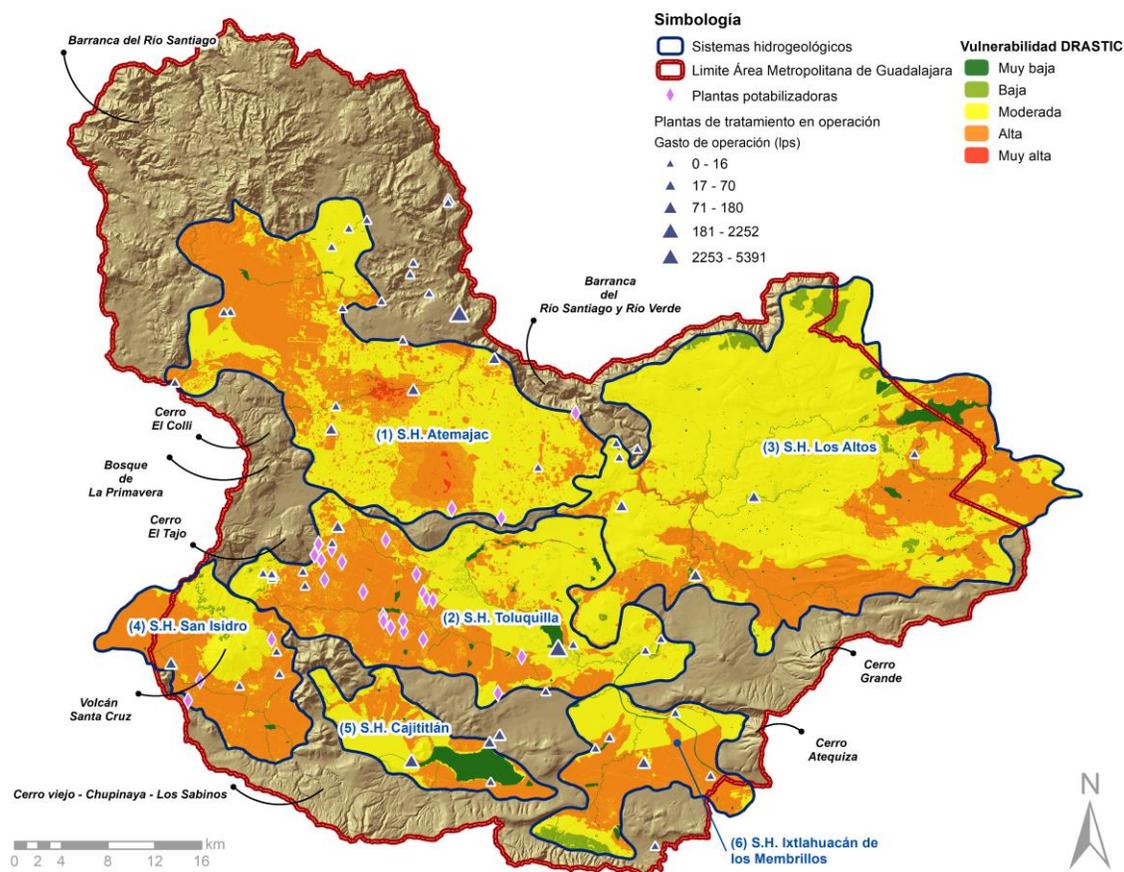


Figura 58. Mapa de la vulnerabilidad DRASTIC con la ubicación de plantas de tratamiento y plantas potabilizadoras. Elaboración propia mediante la información de plantas de tratamiento, plantas potabilizadoras y la metodología de DRASTIC (Aller et al., 1987).

La infraestructura destinada a los residuos sólidos urbanos (RSU), como los rellenos sanitarios y las estaciones de transferencia, pueden ejercer un impacto sustancial en la contaminación del agua subterránea en los sistemas hidrogeológicos. Esto se debe a la posible infiltración de sustancias y contaminantes como hidrocarburos, metales pesados y amonio, entre otros. En el mapa presentado en la Figura 59 se muestra la representación de la vulnerabilidad DRASTIC en conjunto con la ubicación de los rellenos sanitarios y otras infraestructuras para RSU dentro del AMG. De los cinco rellenos sanitarios en la región, tres se encuentran fuera de los sistemas hidrogeológicos delimitados en este estudio. Sin embargo, el relleno sanitario Laureles se halla entre los sistemas hidrogeológicos de Toluquilla y Los Altos, aunque técnicamente no está incluido en ninguno. Aun así, es crucial analizar su posición, ya que se sitúa entre áreas con vulnerabilidad mayormente “Alta”, haciendo prioritarios su manejo y clausura adecuados para prevenir la contaminación de los sistemas hidrogeológicos en dicha zona. Del mismo modo, el relleno sanitario Enerwaste se localiza en el S.H. Los Altos, en una zona de vulnerabilidad moderada. Por lo tanto, la implementación de un plan de manejo adecuado para el sitio resultaría crucial para evitar la contaminación del agua subterránea

en este sistema. Esta situación se replica en gran parte de la infraestructura de RSU en el AMG, resaltando la importancia de desarrollar planes de monitoreo en el ámbito de residuos.

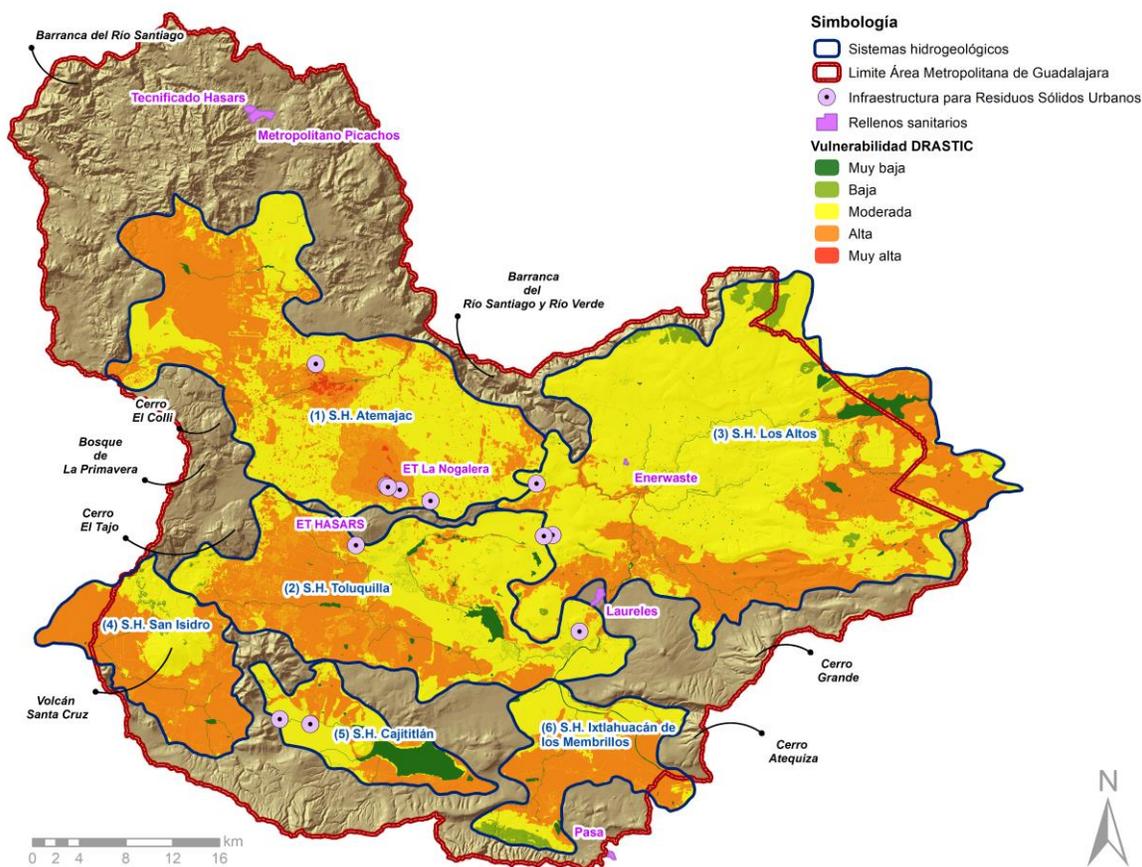


Figura 59. Mapa de la vulnerabilidad DRASTIC con la ubicación de plantas de tratamiento y plantas potabilizadoras. Elaboración propia mediante la información de plantas de tratamiento, plantas potabilizadoras y la metodología de DRASTIC (Aller et al., 1987).

A grandes rasgos, las superficies resultantes de la modelación de susceptibilidad por el método GOD (Figura 60), fueron las siguientes: “Muy baja” (4.1%), “Baja” (32.0%), “Moderada” (25.5%), “Alta” (6.8%) y “Muy alta” (31.7%); mientras los valores generados con DRASTIC (Figura 48) resultaron de la siguiente manera: “Muy baja” (2.5%), “Baja” (2.0%), “Moderada” (55.4%), “Alta” (40.0%) y “Muy alta” (0.2%). Al comparar ambos métodos de vulnerabilidad a la contaminación y discutir sus resultados, se observa que, aunque el método GOD ofrece un panorama más conservador sobre la vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos, el método DRASTIC proporciona una perspectiva más clara de las zonas prioritarias para el monitoreo constante y la protección frente a actividades contaminantes potenciales. Esto se deduce debido a que el método DRASTIC utiliza una mayor cantidad de variables para su modelación, lo cual propicia la obtención de resultados más realistas y significativos.

Con ambas metodologías se encontró que ciertas zonas urbanas presentan una menor vulnerabilidad, debido a la disminución en la capacidad de recarga e impermeabilización que se tiene por agentes como el concreto. Por lo tanto, se destaca la existencia de una cierta correlación entre





## 7. Determinación espacial de recarga neta relativa

Las zonas de recarga son entornos hidrogeológicos que se caracterizan por contar con una topografía, tipo de suelo y rocas específicas. Por otro lado, la recarga neta presenta la cantidad de agua por unidad de superficie de tierra que penetra en la superficie del suelo y llega al nivel freático (Aller *et al.*, 1987).

De acuerdo con el cálculo del factor de recarga, obtenido a partir de la consideración de las capas de uso de suelo y vegetación, litología y textura del suelo (véase 4.5.3 *Delimitación de zonas de recarga*), se realizó una reclasificación para obtener el mapa de recarga relativa del área metropolitana.

Se optó por categorizar la recarga relativa desde “Poco significativa” hasta “Muy alta”, siguiendo la categoría DRASTIC (Aller *et al.*, 1987). El principal objetivo de esta modelación es mejorar la planificación urbana a través de un enfoque hidrogeológico. Por ello, se ha establecido la premisa de que los cauces superficiales aportan una recarga “Poco significativa” de agua hacia los sistemas hidrogeológicos, en una línea similar a la consideración realizada para embalses y lagos en la zona de estudio. No obstante, se ha evidenciado que, en diversos sectores, existen aportaciones significativas de los ríos o arroyos circundantes hacia los sistemas hidrogeológicos (véase 4.1.3.10 Piezometría). En la Figura 61 se aprecia el mapa de recarga relativa de agua subterránea, dividida en cinco categorías, las cuales van desde “Poco significativa”, en color verde, hasta “Muy alta”, en color azul oscuro. Cabe mencionar que los cuerpos de agua superficial dentro del área de estudio fueron considerados como zonas con recarga poco significativa. En acuíferos confinados o semiconfinados, donde se tiene permeabilidad baja, lo cual limita la recarga directa desde la superficie, los cuerpos de agua superficial pueden tener menor influencia como zonas de recarga. Además, se observa que en la periferia del AMG la recarga está principalmente definida como “Baja” en la barranca del Río Santiago, Cerro El Colli, Cerro El Tajo y en algunas zonas del Bosque de La Primavera. Esto se debe a su litología de rocas ígneas, con baja porosidad eficaz por lo que la infiltración del agua se dificulta en estas zonas, aun cuando se tiene uso de suelo forestal (Tabla 8). Asimismo, la mayoría de la periferia del AMG se encuentra categorizada como superficie con capacidad de infiltración “Alta” y “Moderada”, principalmente en áreas con uso de suelo agrícola, con litología basáltica y con mayor permeabilidad secundaria, debido a la fracturación que favorece la infiltración. Esto se aprecia en las áreas urbanas de Tesistán, Tlajomulco de Zúñiga y la mayoría de la región este, por la zona de Zapotlanejo.

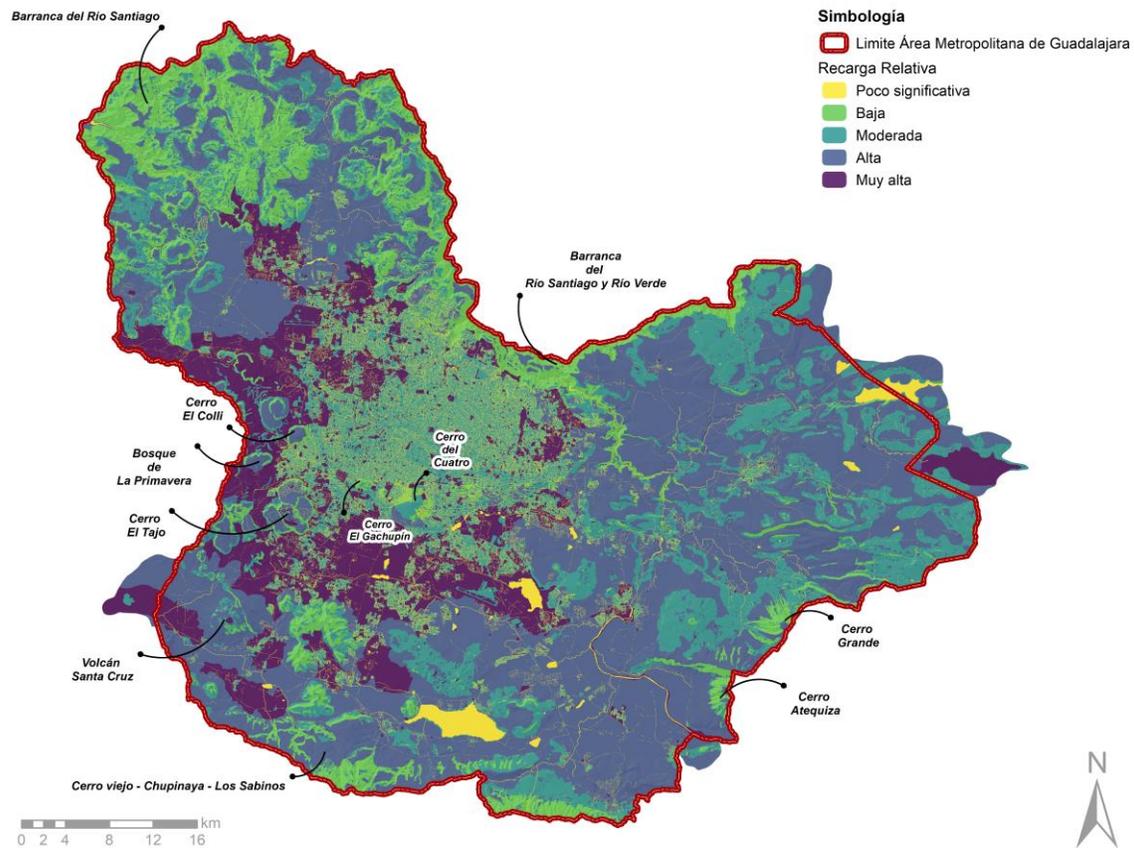


Figura 61. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001)

En la zona urbana del AMG la recarga está principalmente categorizada como “Moderada” con algunas áreas de “Alta” y “Muy alta”. Esto se debe a que la mancha urbana del AMG se encuentra en una región con litología de Toba, una roca altamente porosa y permeable, teniendo capacidad de almacenar y transportar grandes cantidades de agua. Aunado a esto, la textura del suelo en gran parte del área urbana es “gruesa”, lo cual aumenta la capacidad de infiltración. No obstante, se debe tener en cuenta que la mayoría del área urbana se encuentra asfaltada, por lo que la infiltración se puede ver afectada negativamente. Se identificaron siete zonas relevantes de recarga (véase Figura 62), se resaltan estas zonas en rectángulos rojos: (1) El Bajío, (2) Parque Colomos, (3) Parque Tucson, (4) Zona de Tesistán, (5) El área de la Cuenca del Chicalote, (6) Zona de El Salto - El Ahogado - Juanacatlán y (7) Parque solidaridad.

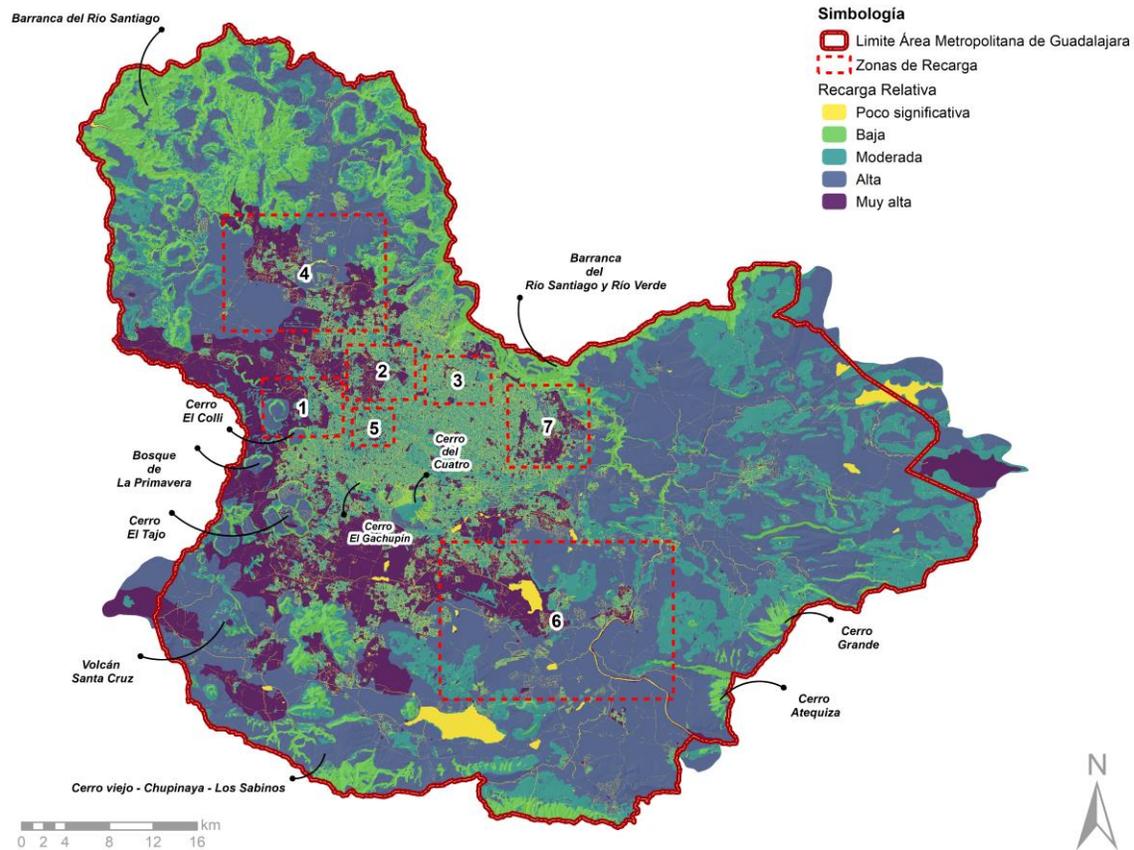


Figura 62. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea con zonas de importancia. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001).

Como se mencionó, el análisis de recarga se clasificó en cinco niveles, según el grado relativo de recarga de agua subterránea: "Poco significativa", "Baja", "Moderada", "Alta" y "Muy alta". La Figura 63 presenta exclusivamente los polígonos con recarga "Alta" y "Muy alta", facilitando así la identificación de las zonas importantes. Se distinguen varias áreas con "Muy alta" recarga dentro del AMG, principalmente al oeste del área de estudio. Entre las áreas de recarga "Muy alta" de mayor extensión se incluye la zona de uso agrícola al norte de San Sebastián El Grande, así como áreas con vegetación intraurbana y uso agrícola en los alrededores de Tlajomulco de Zúñiga y parte del Área Natural Protegida Bosque de La Primavera. Dentro de la zona urbana se observan polígonos de pequeña dimensión, correspondientes a áreas verdes como bosques urbanos, parques, camellones y jardines, que presentan una recarga catalogada como "Muy alta".

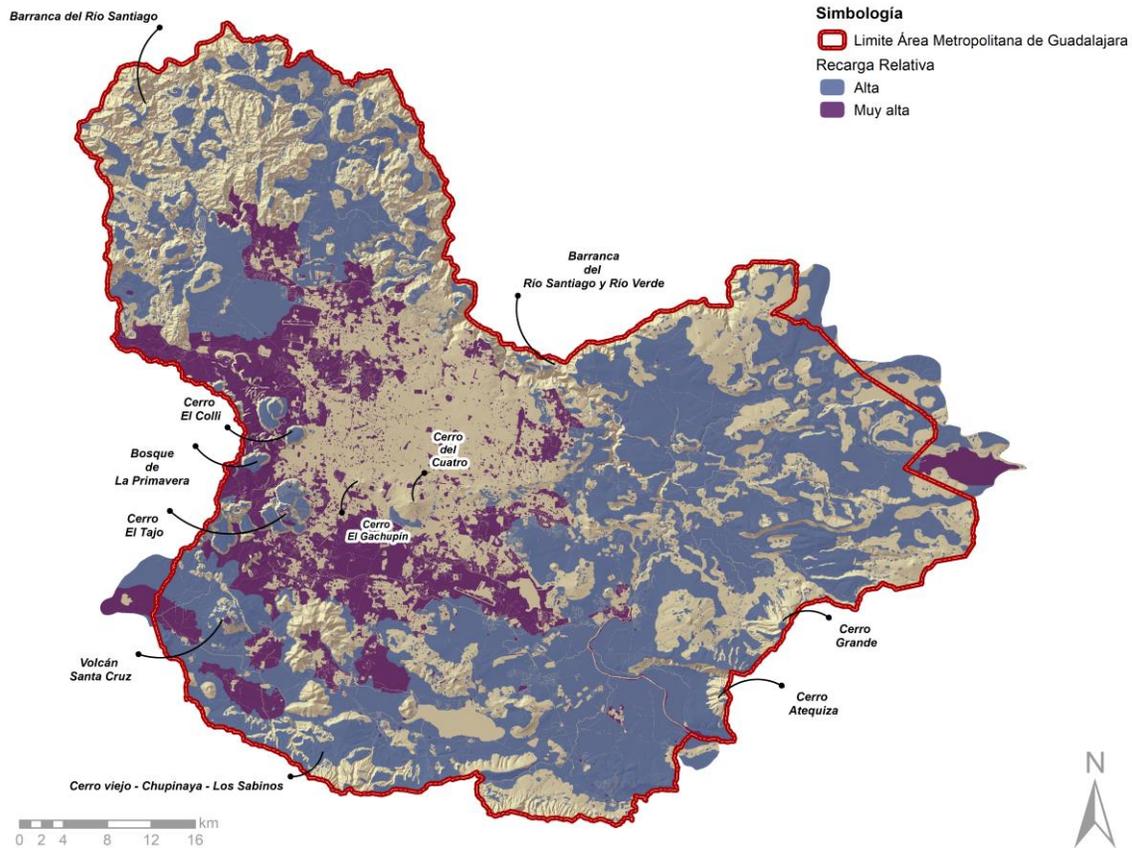


Figura 63. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea Alta y Muy alta con zonas de importancia. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001).

En la Zona 1 (véase Figura 64), situada al noreste del Bosque de La Primavera, se identifican dos extensas áreas con recarga catalogadas como "Alta" y "Muy alta": el sector del Bajío y el Parque Metropolitano. En el área del Bajío, junto con el ANP Bosque de La Primavera, se presentan regiones con recarga "Muy alta", coincidiendo con las zonas de uso forestal, agrícola y vegetación intraurbana. Por otro lado, el Parque Metropolitano es otra zona de recarga "Muy alta", caracterizada principalmente por su uso de suelo como vegetación intraurbana. Además, en toda la Zona 1 se pueden encontrar polígonos distribuidos, los cuales han sido clasificados como zonas de recarga "Muy alta" o "Alta". Estos corresponden a espacios con vegetación intraurbana, destacando así la relevancia de los parques y áreas verdes dentro del entorno urbano para la recarga del agua subterránea.

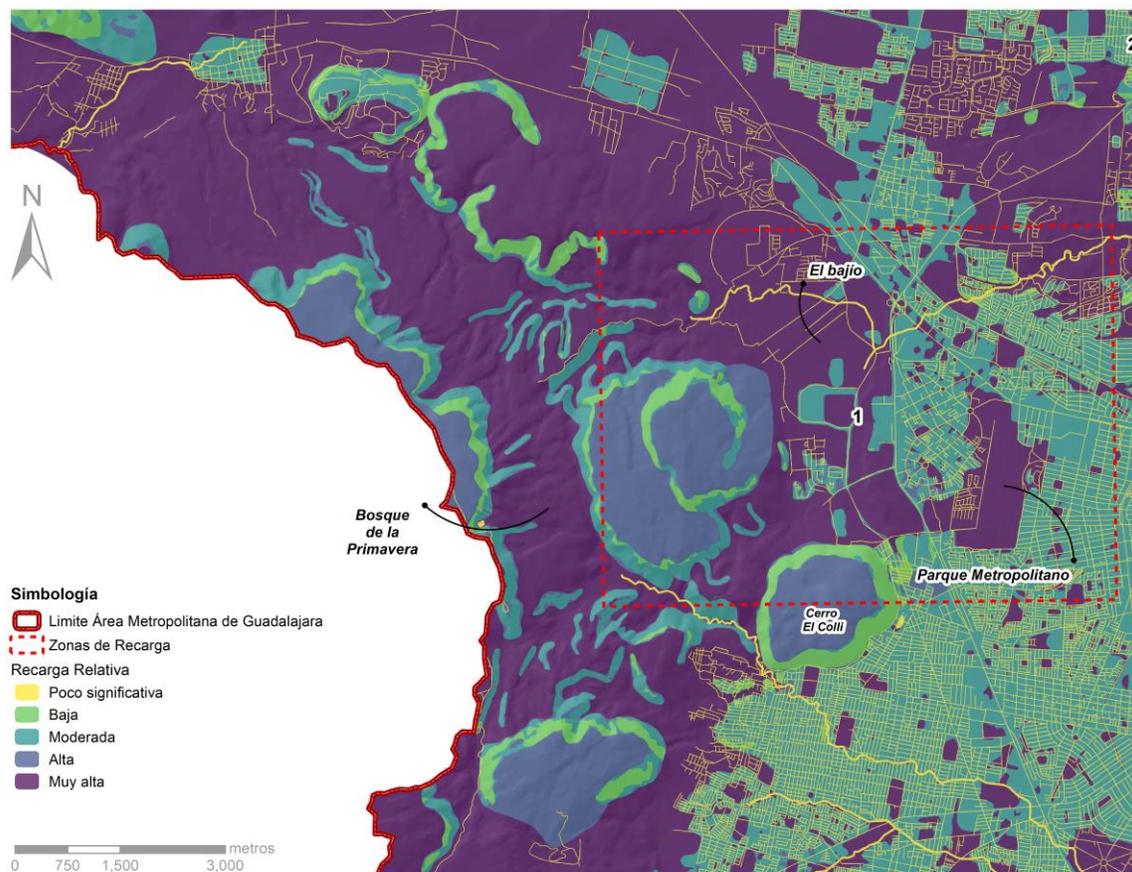


Figura 64. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en la Zona “El Bajío”. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001).

La segunda zona identificada (véase Figura 65) tiene áreas de recarga categorizadas como “Alta” y “Muy alta”, destacando el Bosque Los Colomos, Country Club, espacios dentro de la colonia Colinas de San Javier y un área al norte del Bosque de Los Colomos denominada “Colomos 3”. Estos polígonos son áreas verdes, como parques y bosques urbanos, con uso de suelo forestal o espacios de alta vegetación intraurbana. La mayor parte de la Zona 2 presenta recarga “Moderada”, principalmente en áreas con uso de suelo urbano. Igualmente, en la Zona 5, ubicada dentro de la mancha urbana (véase Figura 65), se encuentran zonas de recarga “Muy alta” en colonias como Chapalita, Ciudad del Sol, Jardines de los Arcos y Vallarta Cuauhtémoc, áreas también caracterizadas por su vegetación intraurbana densa. En consonancia con la Zona 2, el resto del área urbana dentro de la Zona 5 presenta recarga “Moderada”.



Figura 65. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en las Zonas “Parque Colomos” y “El área de la Cuenca del Chicalote”. Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001).

Dentro de la tercera zona de recarga establecida para el AMG, se identificó al Parque Tucson, el centro universitario CUCS y el Parque Alcalde, todas con categoría de recarga “Muy alta”. Además, en la Figura 66 se pueden observar otros polígonos distribuidos en la Zona 3 con calificación de “Alta” y “Muy alta” recarga. Estos polígonos corresponden a parques y colonias con vegetación intraurbana. Las áreas con uso de suelo urbano están categorizadas con recarga “Moderada”.



**Simbología**

-  Limite Área Metropolitana de Guadalajara
-  Zonas de Recarga
- Recarga Relativa**
-  Poco significativa
-  Baja
-  Moderada
-  Alta
-  Muy alta



Figura 66. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en las Zonas "Parque Tucson". Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001).

La zona cuatro (véase Figura 67), ubicada al norte, muestra distintas áreas de recarga "Muy alta". Tesistán presenta espacios de recarga "Muy Alta" en zonas con vegetación intraurbana, mientras que, en las áreas de uso de suelo urbano, la recarga se cataloga como "Moderada". En los alrededores de Tesistán, la recarga es clasificada como "Alta", lo cual podría relacionarse con las áreas agrícolas circundantes. En la parte suroeste de la zona cuatro se observa un área con polígonos marcados como recarga "Muy Alta", asociados al arroyo Blanco y caracterizados igual por una abundante vegetación intraurbana.



Figura 67. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en las Zonas "Zona Tesistán". Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001).

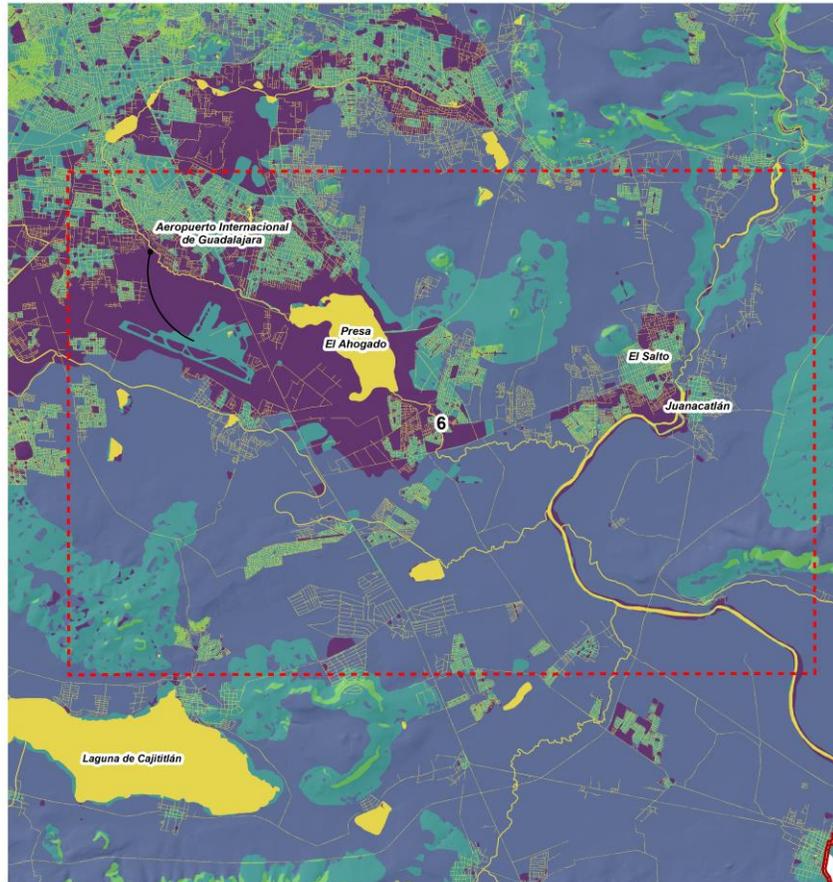
En la zona de "El Salto - El Ahogado - Juanacatlán" se han identificado áreas catalogadas como "Moderada", "Alta" y "Muy alta", abarcando la mayoría de la Zona 6 (véase Figura 68). Se identificaron dos áreas principales para la recarga: la primera corresponde al área junto a la presa El Ahogado, donde la recarga es "Muy alta", y la otra al Aeropuerto Internacional de Guadalajara. Además, tanto El Salto como Juanacatlán cuentan con zonas de recarga clasificadas como "Muy alta". El resto de la Zona 6 está categorizada principalmente con recarga "Moderada" en uso de suelo urbano, y "Alta" en zonas con uso de suelo agrícola.



**Simbología**

-  Limite Área Metropolitana de Guadalajara
-  Zonas de Recarga
- Recarga Relativa**
-  Poco significativa
-  Baja
-  Moderada
-  Alta
-  Muy alta

0 2,000 4,000 6,000 metros



*Figura 68. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en las Zonas “Zona de El Salto- El Ahogado - Juanacatlán”.  
Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001).*

Al este del área urbana y al sur de la Barranca del Río Santiago y Río Verde se encuentra la séptima zona (véase Figura 69), con otras áreas clasificadas con recarga “Muy alta”. Entre estas se encuentran el parque Solidaridad, Prados Coyula y fraccionamientos residenciales como La Noria, Coyula, Altos de Zalatlán, Vía Nova y Arcos de Zalatlán, entre otros. Estos sectores, al igual que las otras zonas de recarga, presentan una vegetación densa y un uso de suelo agrícola. El resto de la Zona 7 se caracteriza por tener una recarga “Moderada”.



Figura 69. Mapa de la recarga relativa de agua subterránea en las Zonas "Zona de El Salto - El Ahogado - Juanacatlán".  
Elaboración propia mediante la metodología propuesta por Piscopo (2001).

La mayoría de las seis zonas de recarga seleccionadas presentan recarga "Moderada", debido a su litología y uso de suelo. Aunque la litología y la textura del suelo en el AMG favorecen la recarga de agua subterránea, el que gran parte del área urbana se encuentre cubierta por una superficie impermeable (*i.e.*, concreto, asfalto) reduce la infiltración a los sistemas hidrogeológicos, salvo en áreas como parques y bosques urbanos. La vegetación intraurbana presenta recarga "Muy Alta", indicando su importancia en la infiltración de agua. En menor medida, las áreas agrícolas que se encuentran dentro de la zona urbana presentan recarga "Alta", como es el caso de Tesistán que aún no está completamente urbanizada y conserva espacios agrícolas. Es importante mencionar que las zonas con "Muy alta" y "Alta" recarga de agua subterránea también son áreas que presentan una mayor vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, ya que, mientras mayor sea la facilidad que tiene el agua para infiltrarse a los sistemas hidrogeológicos, el grado de atenuación natural ante algún derrame en la superficie o contaminante en el agua disminuye. Dicha relación se puede observar dentro del análisis de vulnerabilidad en la sección 6. *Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca acuífera a la contaminación.*



## 8. Caracterización hidrogeoquímica de los sistemas hidrogeológicos delimitados

En las últimas décadas, se ha llevado a cabo algunas investigaciones sobre la hidrogeoquímica en del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), con el propósito de abordar la caracterización de la calidad del agua subterránea en los sistemas hidrogeológicos que abastecen a la ciudad. Estos trabajos han estado enfocados en la comprensión de los procesos geoquímicos que rigen la composición del agua, así como en el análisis de las posibles influencias antropogénicas que puedan afectar estos procesos. Dichos esfuerzos han abarcado tanto el análisis exhaustivo de los datos disponibles como la generación de datos primarios mediante campañas de muestreo específicas.

Las campañas de muestreo, efectuadas en trabajos previos, han tenido como objetivo principal capturar representativamente las características hidroquímicas de estos sistemas subterráneos. Una instancia inicial en este contexto data del año 2003, donde se llevó a cabo un análisis hidrogeoquímico en colaboración entre el SIAPA y la empresa GeoEx. Este análisis focalizó su atención en parámetros establecidos por la normativa NOM-127-SSA1-1994. La estrategia de muestreo implementada comprendió la recolección de muestras provenientes de diversas fuentes acuíferas (*i.e.*, pozos, norias y manantiales) con el fin de obtener un panorama representativo de la composición química del agua en el área de estudio. La selección de los momentos para llevar a cabo estas campañas se basó en la intención de reducir al mínimo la influencia de la recarga pluvial, lo que contribuyó a lograr una mayor precisión en los resultados obtenidos. Adicionalmente a los análisis hidroquímicos tradicionales, se llevaron a cabo análisis isotópicos con el propósito de elucidar los procesos de recarga y descarga en las áreas identificadas como críticas en el sistema hidrogeológico del AMG. Entre los resultados más relevantes de este estudio, se constató que la temperatura registrada en el agua subterránea varió predominantemente entre 25 y 30 °C, con registros superiores a 36 °C en pozos profundos ubicados en formaciones geológicas fracturadas. En el contexto de los pozos profundos operados por el SIAPA en el valle de Toluquilla, se observaron niveles elevados de magnesio ( $Mg^{+2}$ ) y calcio ( $Ca^{+2}$ ), iones que contribuyen significativamente a la dureza del agua subterránea. La evaluación de la concentración de flúor (F<sup>-</sup>) reveló valores que excedieron los umbrales establecidos por la normativa en algunos pozos ubicados en la cuenca de Atemajac y la zona occidental del valle de Toluquilla. Asimismo, se identificó una concentración elevada de nitratos ( $NO_3^+$ ) en puntos de aprovechamiento superficial, particularmente en norias y manantiales. Esta elevada concentración de  $NO_3^+$  se asoció a la posible influencia de contaminantes orgánicos provenientes de los sistemas de drenaje de la zona urbana circundante.

Con base en los resultados de los análisis químicos realizados en los pozos operados por el SIAPA, se elaboraron representaciones gráficas conocidas como diagramas de Stiff (véase Figura 70) y Piper (véase Figura 71). Estas representaciones permitieron definir las diferentes facies hidroquímicas presentes en el área de estudio. La facies de agua bicarbonatada sódica ( $NaHCO_3$ ) se destacó como la más prevalente en los valles de Atemajac y Toluquilla. Las investigaciones hidrogeoquímicas realizadas en los sistemas hidrogeológicos del AMG han proporcionado una comprensión más profunda de la calidad del agua subterránea y los procesos geoquímicos en juego. Estos hallazgos son esenciales para orientar estrategias de gestión y conservación del recurso hídrico, especialmente en un contexto urbano donde la demanda y la presión antropogénica son significativas.



Unos años antes, en el marco del estudio hidrológico de Jalisco realizado, INEGI en 2001, efectuó un análisis de las perforaciones que superaban la profundidad de 200 m en la región. Estas perforaciones, ubicadas en la franja central del AMG, presentaron un perfil químico donde los iones de magnesio ( $Mg^{+2}$ ) y calcio ( $Ca^{+2}$ ) exhibieron una mayor presencia. Este hallazgo condujo a la identificación y definición de una familia de agua caracterizada como bicarbonatada-magnésico-sódica ( $MgNaHCO_3$ ) específicamente en la región sur del valle de Toluquilla. Esta particular caracterización hidroquímica se interpretó como el resultado directo de diversos procesos endógenos, tales como actividades volcánicas y geotermales. La influencia de estos procesos en la composición del agua subterránea se refleja en la prevalencia de los mencionados iones en la mencionada familia de agua.

A través de la aplicación de análisis isotópicos, que constituían una parte integral del estudio llevado a cabo en colaboración entre GeoEx y el SIAPA (2003), se logró establecer con mayor certeza el origen de la recarga de los sistemas hidrogeológicos presentes en las cuencas de Atemajac y Toluquilla. Dichos análisis isotópicos arrojaron resultados que indican que la recarga de estos sistemas hidrogeológicos es un proceso de flujo local. Este flujo local se origina a partir de la infiltración de aguas meteóricas en las zonas altas de las cuencas, que luego se desplazan hacia las zonas más bajas, contribuyendo al abastecimiento de los sistemas hidrogeológicos en cuestión.

Un aspecto relevante identificado a partir de los análisis isotópicos es que los pozos de mayor profundidad presentan composiciones isotópicas menos enriquecidas en isótopos estables, como  $\delta^2H$  y  $\delta^{18}O$ . Esta tendencia puede ser atribuida al origen de su recarga, que proviene de las partes más elevadas de la cuenca. En este trayecto descendente desde las partes altas hasta las más bajas, se produce un decaimiento en las concentraciones isotópicas mencionadas.

Los resultados derivados del estudio hidrológico de Jalisco y las investigaciones colaborativas entre GeoEx y SIAPA han permitido una comprensión más profunda de la composición química del agua subterránea en la región. La identificación de la familia de agua bicarbonatada-magnésico-sódica y el análisis isotópico de la recarga acuífera han arrojado luz sobre la influencia de procesos geológicos y endógenos en la hidroquímica local, contribuyendo a un mejor entendimiento del ciclo hidrológico en esta área específica.

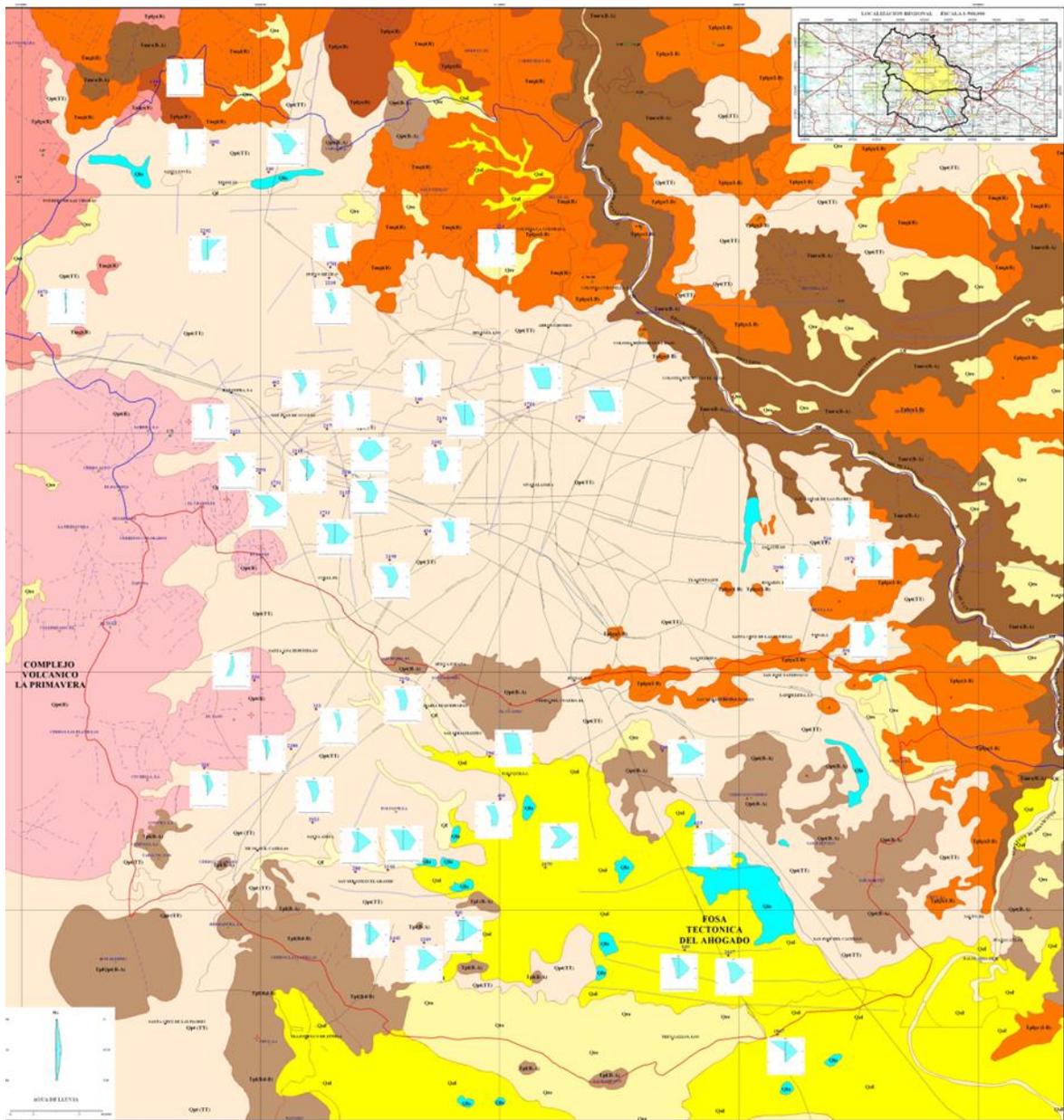


Figura 70. Plano de ubicación con diagramas de Stiff para estudio de pozos del SIAP en las cuencas Atemajac y Toluquilla (2003). Fuente: (GEOEX-SIAP, 2003).

## ATEMAJAC-TOLUQUILLA

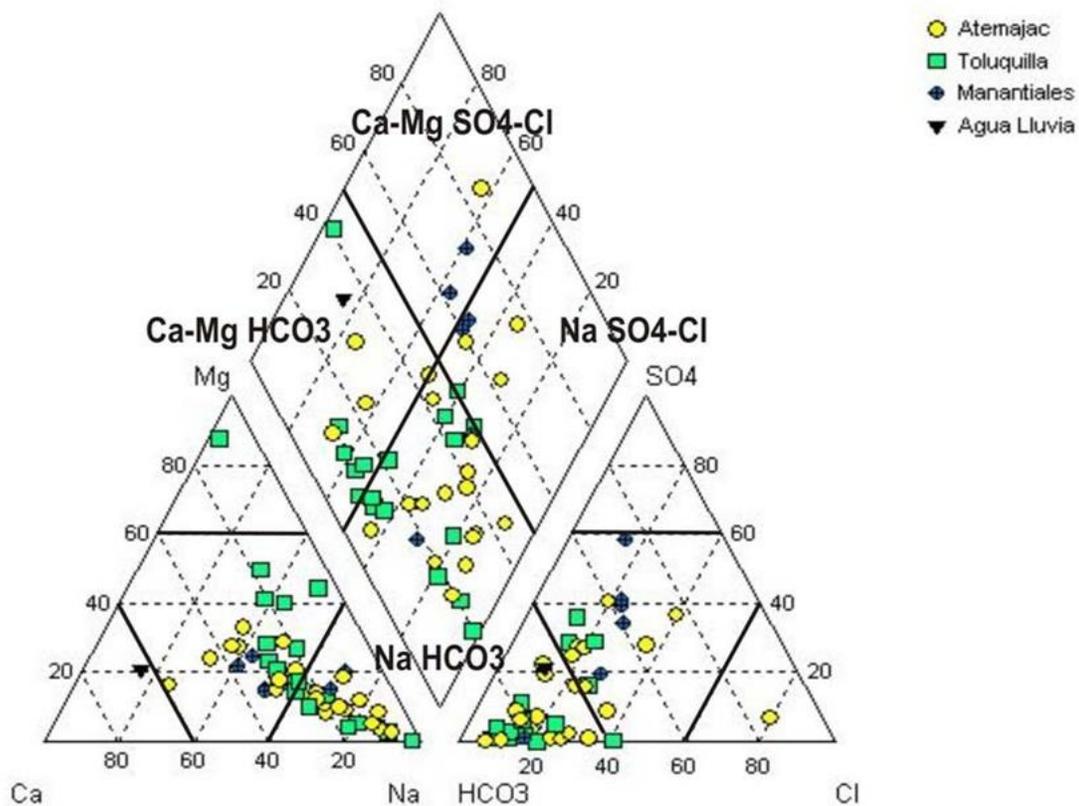


Figura 71. Diagrama de Piper con información hidrogeoquímica de pozos del SIAPA en los acuíferos Atemajac y Toluquilla (2003). Fuente: (GEOEX-SIAPA, 2003).

En el contexto particular del ion flúor ( $F^-$ ), un estudio en el campo de la interacción agua-roca, dirigido por Sánchez Díaz en 2007, aportó valiosa información sobre las concentraciones de este ion en el agua lixiviada proveniente de rocas volcánicas. De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se observó que la concentración máxima de  $F^-$  en el agua lixiviada de rocas volcánicas básicas exhibía una variación que oscilaba entre 0.04 y 0.70 mg/l. En contraste, en las rocas volcánicas de carácter ácido, esta concentración mostraba un rango de fluctuación más amplio, situándose entre 0.26 y 2.47 mg/l. La interpretación de las concentraciones de  $F^-$ , conjuntamente con el análisis de información geológica, hidrológica y geoquímica, condujo a la formulación de dos mecanismos posibles para la liberación de este ion en los valles de Atemajac-Toluquilla. El primer mecanismo se relacionó con la meteorización química de rocas ígneas de composición ácida, proceso seguido por la infiltración y recarga de aguas frías en un flujo local. El segundo mecanismo contempló la influencia de la temperatura del agua, que podría aumentar debido a un flujo regional vertical ascendente o debido al gradiente geotérmico. Adicionalmente, la disolución de plagioclasas cálcicas y el  $F^-$  contenido en las rocas básicas de la zona estudiada, también se consideraron como factores contribuyentes en este segundo mecanismo. El enfoque aplicado en los estudios relacionados al  $F^-$  enriquece el entendimiento de los procesos de recarga y descarga dentro del sistema subterráneo del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), en comparación con lo

establecido en el estudio hidrológico de Jalisco llevado a cabo por el INEGI en 2001. Este análisis amplía la perspectiva existente al respecto. El estudio de Sánchez Díaz subraya que la recarga del acuífero superior puede manifestarse tanto de manera local como regional. La recarga local está directamente vinculada con la infiltración y recarga en las áreas topográficamente elevadas, particularmente en los domos riolíticos presentes en la caldera de La Primavera. Por otro lado, el flujo regional se relaciona con la recarga a través de un flujo vertical ascendente, lo cual da origen a la presencia de aguas termales en un tramo situado entre los poblados de Santa Anita y Toluquilla. La naturaleza isotópica de estas aguas muestra indicios de un proceso de evaporación, proporcionando información esencial sobre la historia hidrogeológica de la región (véase Figura 72).

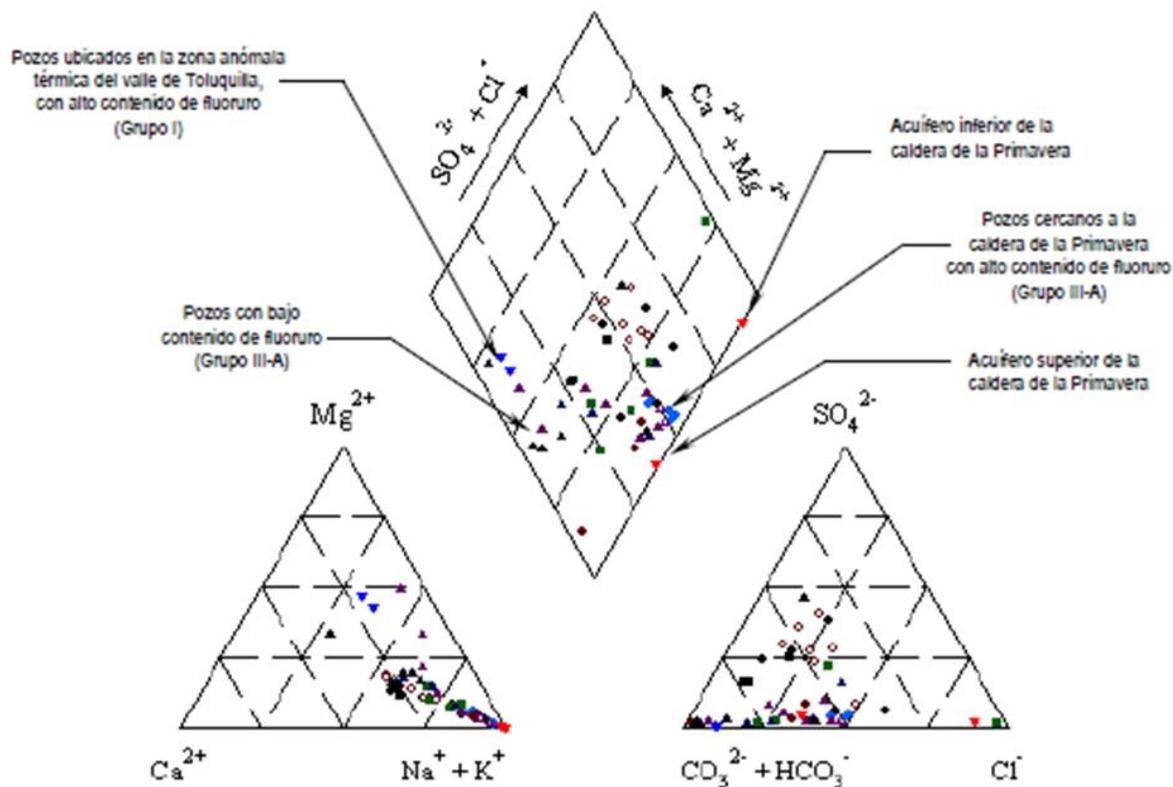


Figura 72. Grupos de agua identificados para el acuífero superior de los valles de Atemajac y Toluquilla (2001). Fuente: (Sánchez Díaz, 2007)

En el año 2011, durante la estación de estiaje, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de 40 muestras de agua provenientes de pozos de abastecimiento. Estos pozos fueron seleccionados de manera equitativa en términos de distribución geográfica, abarcando diversas zonas de la región. La evaluación se enfocó en una serie de iones y variables fisicoquímicas, cuya descripción detallada se encuentra en la Figura 73 del informe. Estos datos, en conjunción con la información isotópica correspondiente a los valores de  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  y  $3\text{H}$ , se utilizaron como base para la elaboración de un modelo conceptual que describe las características fundamentales de las aguas subterráneas, los patrones de flujo y mezcla presentes en la zona de estudio. Este proceso metodológico culminó con la clasificación de las aguas subterráneas presentes en el AMG, en cuatro categorías.

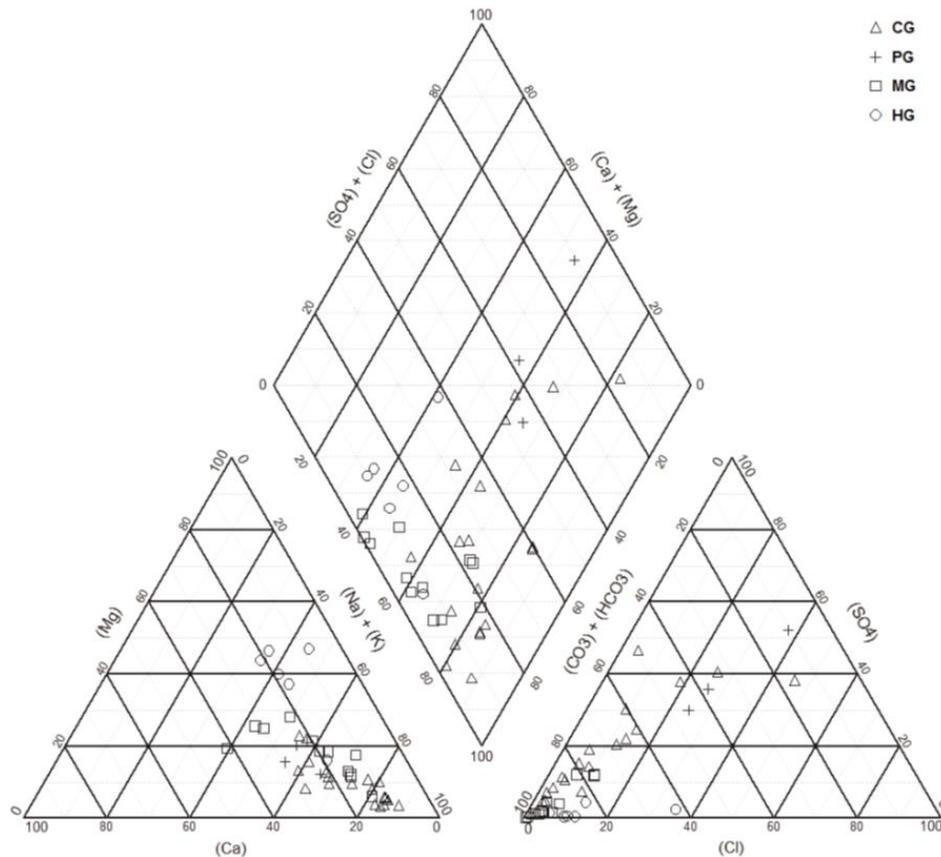


Figura 73. Diagrama de Piper con información hidrogeoquímica de pozos en los acuíferos Atemajac y Toluquilla (2011).  
Fuente: (Hernández-Antonio et al., 2015)

Los grupos de aguas subterráneas que conforman el modelo conceptual desarrollado por Hernández Antonio *et al.* (2015), presentan las siguientes características:

- Agua subterránea fría: caracterizada por bajas temperaturas, salinidad y concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , con una facie hidrogeoquímica predominante de tipo  $\text{NaHCO}_3$ . Se considera originada como el agua de recarga de la caldera de La Primavera y propia de pozos de la parte superior del Valle de Atemajac.
- Agua hidrotermal: caracterizada por alta salinidad, temperatura, presencia de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y la presencia de elementos menores. Es un tipo mixto de agua bicarbonatada en pozos del Valle de Toluquilla y se asocia a la circulación del flujo regional a través de rocas basálticas y andesíticas.
- El agua subterránea contaminada, se caracteriza por niveles elevados de concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  y generalmente se deriva del ciclo urbano del agua y en segunda instancia, por flujos de retorno agrícola.
- Aguas subterráneas mixtas, principalmente con la mezcla de componentes de las aguas subterráneas frías y del grupo de hidrotermales, características de la parte baja del Valle de Atemajac.

Mediante un enfoque integral de investigación, se generó un modelo hidrogeoquímico basado en un programa de muestreo exhaustivo realizado durante el año 2011. El propósito de esta

aproximación fue evaluar tanto los procesos que comprometen la calidad del agua subterránea como la distinción entre las influencias de salinidad de origen natural y antropogénico. La recolección de muestras de agua se llevó a cabo en 38 pozos productivos y un manantial, abarcando una selección representativa de sitios de muestreo. El análisis de los resultados se centró en la identificación de diversos procesos, como mezclas, intercambio iónico, interacciones agua-roca-roca, así como la detección y caracterización de la contaminación por nitratos y los procesos de desnitrificación. Esta evaluación exhaustiva fue desarrollada por Morán-Ramírez *et al.* (2016). Los hallazgos señalan que la facie predominante es la bicarbonatada sódica ( $\text{NaHCO}_3^-$ ), cuya presencia se relaciona con la naturaleza volcánica del sistema hidrogeológico. A continuación, se identifican las familias hidroquímicas  $\text{Na}+\text{Mg}+\text{Ca}+\text{HCO}_3$  y  $\text{Na}+\text{Ca}+\text{HCO}_3$ .

En términos de la evolución geoquímica en el AMG, se ha destacado la influencia de procesos de recarga caracterizados por la disolución de  $\text{CO}_2$  del suelo, calcita, yeso, albita y biotita, así como el intercambio  $\text{Ca}/\text{Na}$ . Por otro lado, los procesos de no recarga evidencian una disminución en la producción de ácido carbónico y en el intercambio  $\text{Ca}/\text{Na}$ . En el mismo estudio, la fuente probable de la contaminación por nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) es identificada como los fertilizantes utilizados en áreas rurales y las aguas residuales en zonas urbanas. En este contexto, la presencia de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), derivados de fuentes antropogénicas, así como las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , que están vinculadas a la actividad volcánica, emergen como los componentes clave de mezclado. Estos componentes se mezclan con las aguas más antiguas a medida que el flujo gravitacional progresa hacia la zona de descarga, representada por el río Santiago. Estos resultados se basan en una investigación publicada por Mahlknecht *et al.* (2017). Adicionalmente, este documento también resalta la infiltración de componentes urbanos en la cuenca de Atemajac y elementos de carácter agrícola en el valle de Toluquilla, lo que contribuye a una comprensión más completa de la influencia antropogénica en la hidrogeoquímica de la región.

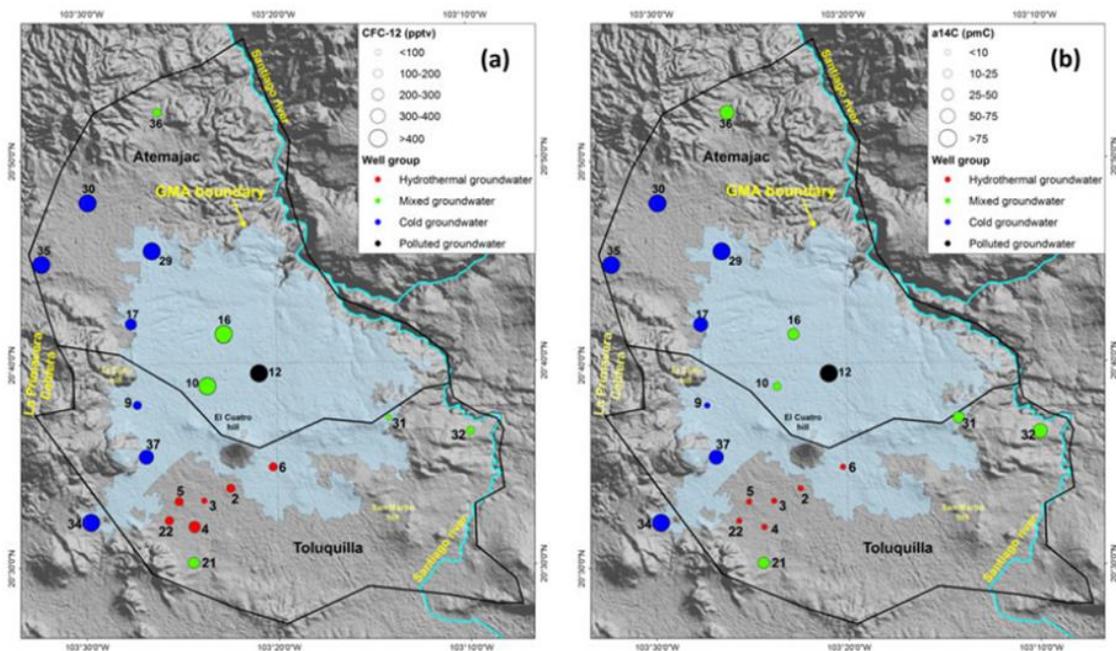


Figura 74. Distribución espacial de trazadores para relacionar grupos de agua y edades en el área de estudio. Fuente: (Hernández-Antonio *et al.*, 2015)



Se construyó un diagrama de Piper, presentado en la Figura 75, empleando información recopilada de cuatro conjuntos de datos distintos, los cuales derivan de las siguientes fuentes de información: el estudio de GEOEX en colaboración con SIAPA en 2003, el trabajo de Sánchez Díaz (2007), los registros proporcionados por CONAGUA (2011) y el estudio de Hernández Antonio *et al.* (2015). Es importante señalar que se ha restringido el análisis a los registros que se encuentran dentro del ámbito de estudio. En específico, los valores empleados en la generación de este diagrama corresponden a 165 registros extraídos del estudio llevado a cabo por GEOEX-SIAPA (2003), 41 muestras provenientes del trabajo focalizado en el ion flúor (F<sup>-</sup>) dirigido por Sánchez Díaz en 2007, 37 registros de pozos muestreados extraídos de un archivo shapefile (.shp) provisto por CONAGUA en 2011, y finalmente, 37 registros obtenidos de los pozos referenciados en el estudio conducido por Hernández Antonio *et al.* 2015.

El análisis de la información empleada en el diagrama de Piper destaca la distribución predominante del anión bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y el catión sodio (Na<sup>+</sup>). Esta composición química ha sido observada consistentemente desde los primeros estudios realizados en el AMG, según lo documentado por INEGI (2001). Esta tendencia se relaciona directamente con procesos de intercambio iónico, tal como se ha indicado en el trabajo de Sánchez Díaz (2007).

En conjunto, el diagrama de Piper proporciona una representación visual de la distribución relativa de los componentes químicos presentes en las aguas subterráneas en el área de estudio. La inclusión de datos provenientes de múltiples fuentes a lo largo del tiempo refuerza la robustez de los hallazgos y resalta la consistencia de la composición química predominante en las aguas subterráneas de la región del AMG. De conformidad con la información procesada, y según se exhibe en la Figura 75, se distinguen las siguientes facies hidrogeoquímicas:

### **1. Grupo de NaCaMgHCO<sub>3</sub> o bicarbonatada cálcica magnésica**

La presencia de magnesio se ha localizado en pozos profundos, principalmente en pozos profundos del valle de Toluquilla (GEOEX-SIAPA, 2003; INEGI, 2001).

Esta familia de agua se ha descrito en estudios previos como de temperaturas más elevada, con presencia de salinidad y algunos componentes menores, ello es un indicador de influencia de agua hidrotermal y, por tanto, se refiere a un flujo de agua con mayor antigüedad o un flujo de tipo regional (Hernández Antonio, Mahlkecht, & Ramos Leal, 2015; Mahlkecht *et al.*, 2017).

### **2. Grupo de bicarbonatada sódica mixta.**

Se considera una familia de agua diferente del resto, principalmente por la incorporación relativamente significativa de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, y conforme a la posición de algunos puntos en el Diagrama de Piper, obtenidos del estudio de Hernández Antonio *et al.* 2015.

La presencia de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> es asociada a actividades antropogénicas (Morán-Ramírez *et al.*, 2016), y proveniente de flujos superiores principalmente a su paso por la mancha urbana del valle de Atemajac (flujo local) (Hernández-Antonio *et al.*, 2015; Mahlkecht *et al.*, 2017).

Se identificaron concentraciones significativas de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en las mediciones obtenidas en zonas de recarga local, principalmente en la porción oeste del área de estudio (*e.g.*, Venta del

Astillero), y relacionadas con el empleo de fertilizantes o la difusión del drenaje urbano (Mahlknecht *et al.*, 2017).

### 3. Grupo de $\text{NaHCO}_3$ o bicarbonatada sódica.

Corresponde a aguas de recarga principalmente causada por la infiltración meteórica sobre la Sierra La Primavera, y que fluye sobre los valles de Atemajac y Toluquilla. Se define también por bajas temperatura y contenidos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ . De acuerdo con los levantamientos isotópicos previos, se considera un agua de recarga reciente (GEOEX & SIAPA, 2003; Mahlkecht *et al.*, 2017; Hernández Antonio, Mahlkecht, & Ramos Leal, 2015).

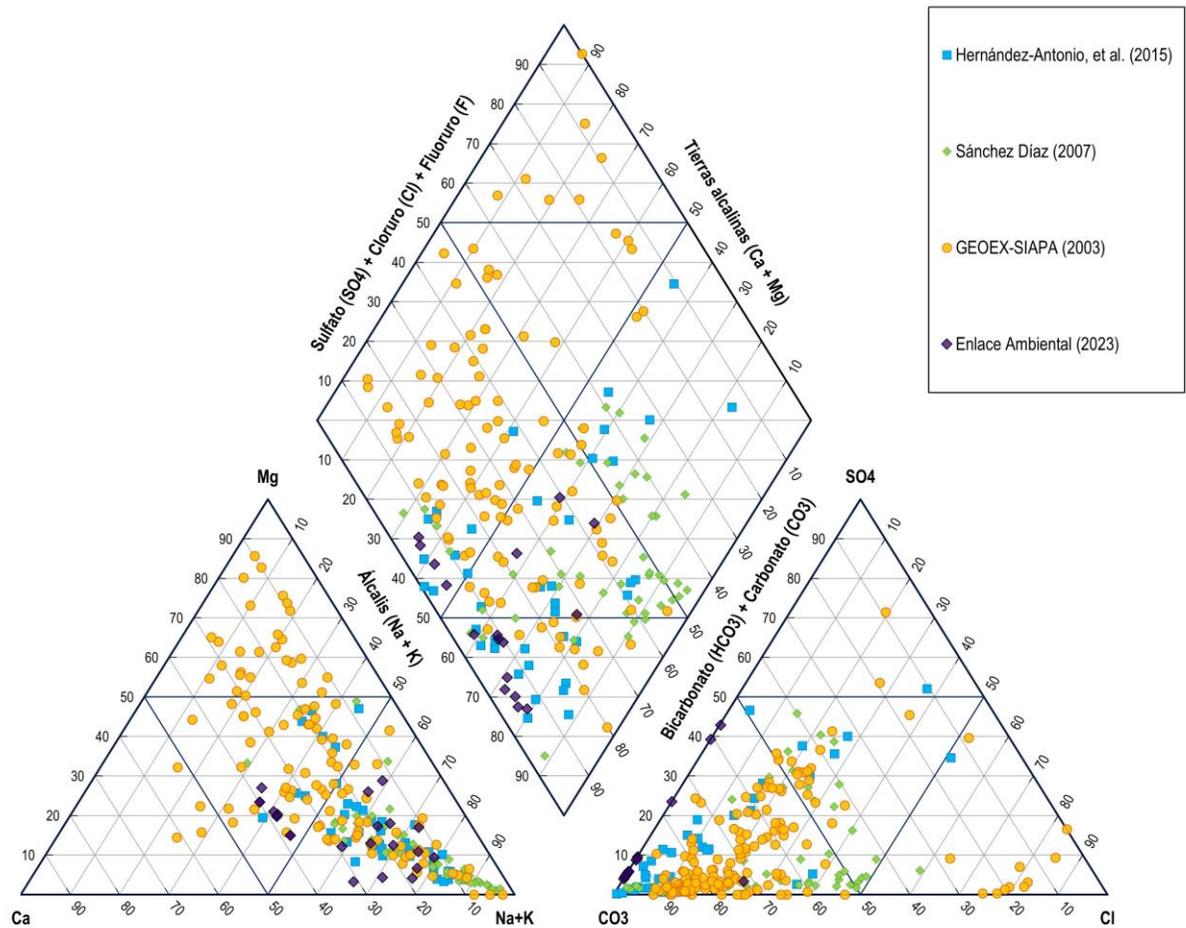


Figura 75. Diagrama de Piper con información hidrogeoquímica analizada. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Con base en los sistemas hidrogeológicos propuestos para el AMG, se agruparon los datos hidrogeoquímicos para construir un diagrama de Piper con los resultados de los muestreos obtenidos en campo y las series analizadas previamente (véase Figura 76).

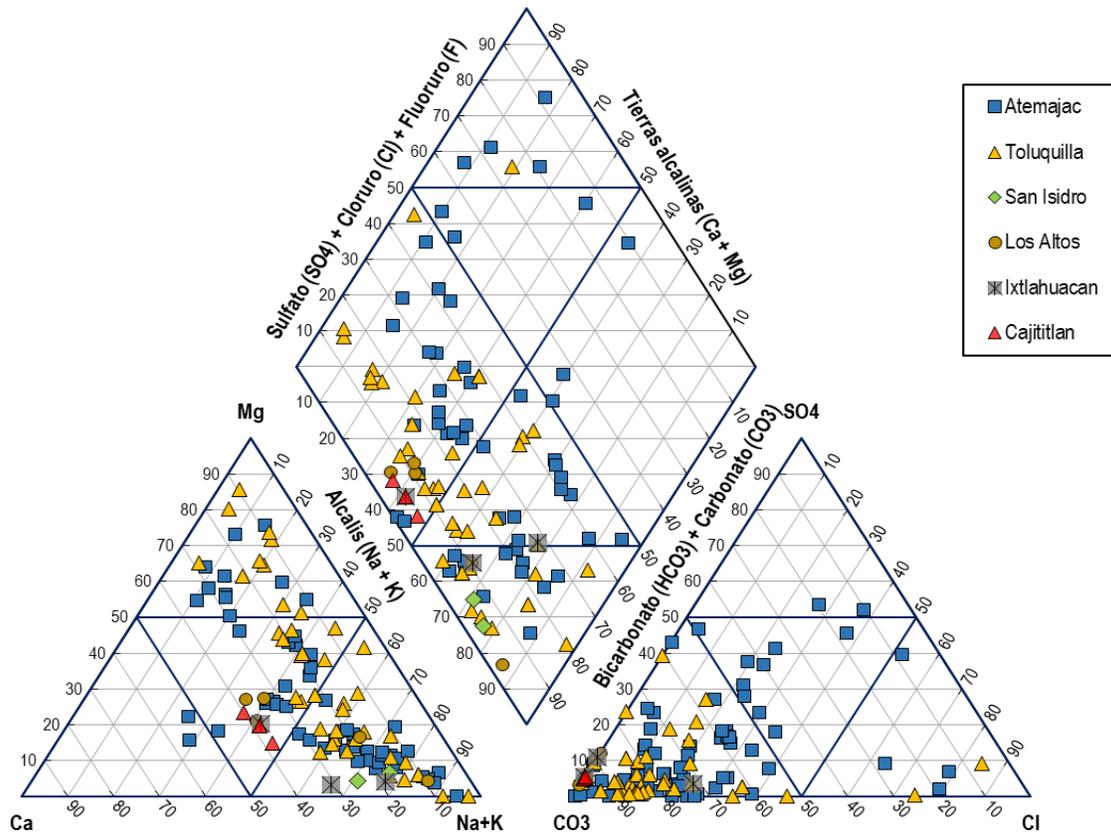


Figura 76. Diagrama de Piper agrupados por sistemas hidrogeológicos utilizando resultados de muestreos y series de datos de estudios previos. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C

Junto a la elaboración de los diagramas de Piper, se procedió a la generación de los diagramas de Stiff correspondientes a los pozos que fueron objeto de muestreo. Estos diagramas de Stiff brindaron una herramienta visual esencial para la identificación de las particularidades inherentes a cada punto analizado (véase Anexo 2. Caracterización hidrogeoquímica). Por ejemplo, permitieron observar las concentraciones de magnesio ( $Mg^{+2}$ ) presentes en los pozos localizados en el valle de Toluquilla. Estos diagramas, al enfocarse en muestras individuales, facilitaron la detección de características químicas específicas de cada punto de muestreo. En un enfoque más amplio, al agrupar los pozos muestreados en sus respectivos sistemas hidrogeológicos, los diagramas de Stiff posibilitaron la identificación de similitudes en la composición química entre los distintos puntos de muestreo. Esta comparación permitió corroborar la coherencia de los límites establecidos en el análisis, utilizando ejemplos concretos. Por ejemplo, los diagramas de Stiff demostraron la comparabilidad de las morfometrías de los diagramas en los sistemas hidrogeológicos de Cajitlán y San Isidro. Esta correspondencia en las morfometrías subraya la consistencia en las características químicas entre estos sistemas. Los diagramas de Stiff, en conjunción con los diagramas de Piper, contribuyeron significativamente a la caracterización química e hidrogeológica de los puntos de muestreo. Además de ofrecer una representación visual accesible, estos diagramas permitieron la identificación de singularidades y semejanzas en la composición química de las aguas subterráneas en el área de estudio. Esta información reforzó la confiabilidad y solidez de las conclusiones obtenidas y validó la coherencia de los límites y categorizaciones propuestas en el análisis.



## 9. Propuesta de sistema de control hidrogeológico

En esta sección se presenta la propuesta del sistema de control hidrogeológico para el AMG, utilizando la metodología desarrollada previamente. Asimismo, se tomó en cuenta la propuesta de la red piloto de monitoreo en las cuencas de Atemajac y Toluquilla, generada por GEOEX y SIAPA en 2003.

Objetivo general: Desarrollar un sistema integral de control hidrogeológico para el área de estudio, con el fin de monitorear y evaluar de manera efectiva la piezometría y la calidad del agua subterránea, asegurando un uso sostenible y adecuado del recurso hídrico.

Objetivos específicos:

- **Piezometría:** Implementar un sistema de monitoreo para controlar la variación de niveles piezométricos, calcular la recarga de los sistemas hidrogeológicos y modelar las superficies piezométricas y redes de flujo. Estas acciones permitirán comprender la dinámica hidrogeológica y asegurar un balance entre extracciones y recarga.
- **Hidrogeoquímica:** Validar un modelo hidrogeológico conceptual, interpretando el origen y la evolución del recurso hídrico subterráneo. Se establecerán relaciones entre los diferentes compartimentos del ciclo hidrológico y se determinarán los tiempos de residencia y edad del agua. Este análisis permitirá entender los procesos hidrogeoquímicos y garantizará la protección de la calidad del agua subterránea.
- **Calidad del agua:** Evaluar la calidad del agua subterránea mediante el cumplimiento de las normas de calidad requeridas para su uso, incluyendo el consumo humano. Se identificarán fuentes de contaminación y se establecerán medidas de manejo para proteger el sistema hidrogeológico y asegurar su uso sostenible a largo plazo.
- **Comunicación:** Generar una herramienta de comunicación de resultados del sistema de control hidrogeológico.

En función de los objetivos planteados, se han elaborado dos propuestas: una ideal y otra factible. A continuación, se presenta el diagrama de flujo diseñado para el sistema de control hidrogeológico del AMG.

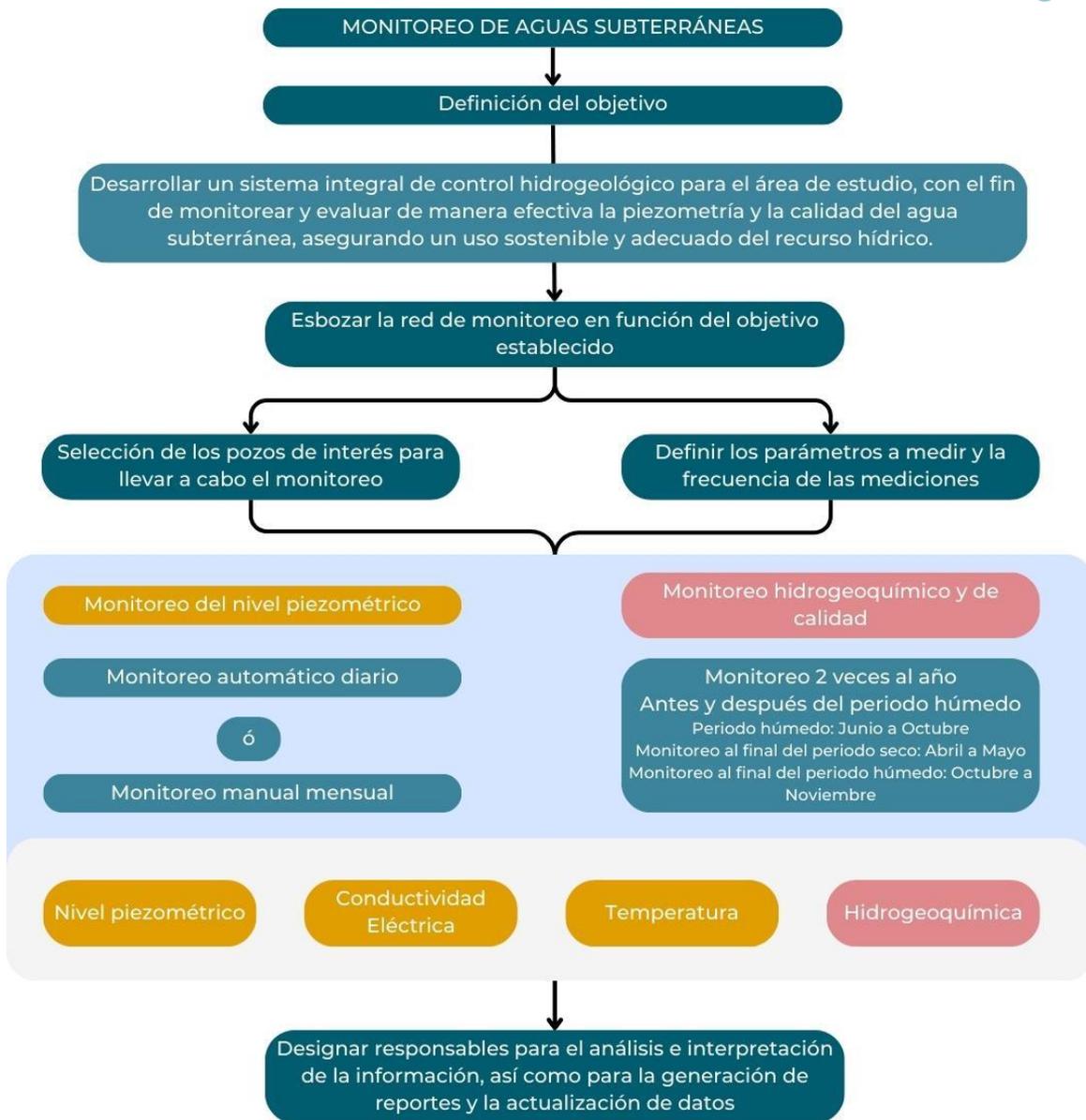


Figura 77. Diagrama de flujo para el sistema de control hidrogeológico del AMG. Elaboración por Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

## 9.1. Propuesta ideal

Esta propuesta establece las zonas donde se sugiere aplicar el monitoreo para obtener una visión integral de los sistemas hidrogeológicos, considerando la densidad de puntos o pozos de control necesarios. Para ello, se ha diseñado una red de control hidrogeológico en función de la densidad de puntos de monitoreo y la cuadrícula diseñada. A través de un análisis de representatividad, se realizó el cálculo del número de puntos recomendados, los cuales se detallan en la Tabla . De acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó que se necesitarán un total de 96 puntos de muestro para cubrir los seis sistemas hidrogeológicos del AMG.

Tabla 14. Número de puntos recomendados por análisis de representatividad

Puntos de control recomendados				
Sistemas hidrogeológicos	Superficie (km <sup>2</sup> )	Pozos por cada 20 km <sup>2</sup>	Pozos por cada 25 km <sup>2</sup>	Promedio
Atemajac	511.06	26	21	23
Toluquilla	385.44	20	16	18
Los Altos de Jalisco	786.56	40	32	35
San Isidro	160.55	9	7	8
Cajititlán	98.56	5	4	5
Ixtlahuacán de los Membrillos	140.81	8	6	7
<b>Total:</b>	<b>2,082.98</b>	<b>108</b>	<b>86</b>	<b>96</b>



Figura 78. Propuesta ideal del sistema de control hidrogeológico.

En caso de encontrarse zonas donde no exista infraestructura para la extracción de agua subterránea y, por tanto, no sea posible realizar mediciones directas, se propone la instalación de piezómetros. En el siguiente apartado se explica a detalle dicho procedimiento.



### 9.1.1. Generación de piezómetros

Para asegurar un diseño adecuado y una ejecución correcta de los piezómetros, es recomendable leer con detenimiento la guía de buenas prácticas para el diseño, construcción, sellado y clausura de pozos de captación de agua subterránea (Martos-Rosillo *et al.*, 2022). Esta guía proporciona un valioso apoyo al abordar diferentes aspectos, que van desde los estudios hidrogeológicos iniciales hasta el sello y clausura de los pozos de monitoreo. Es necesario considerar los aspectos generales de la planificación, diseño, proyecto constructivo y la ejecución en obra, así como los ensayos de bombeo y la evaluación del caudal y calidad del agua. Además, la guía ofrece recomendaciones sobre el equipo electromecánico, la protección sanitaria y la desinfección final, garantizando la integridad del agua subterránea. Es importante destacar que la guía anteriormente mencionada, también abarca aspectos relevantes previos al diseño de un sondeo, como el diámetro aplicable y el mismo diseño, en diferentes tipos de rocas, incluyendo rocas cristalinas, duras, consolidadas y no consolidadas.

Los pozos piezométricos recomendados no tienen la función de extracción de agua subterránea, por lo que se tendrá que considerar, en el diseño, una toma de muestras de agua para su análisis en laboratorio. Por tanto, se sugiere que los piezómetros estén condicionados para el ingreso de una bomba de extracción, en caso de que sea necesario obtener muestras adicionales para análisis detallados.

## 9.2. Propuesta factible

Esta propuesta se basa en una evaluación integral de la situación actual de los municipios del AMG, considerando la infraestructura existente y otros factores relevantes para el monitoreo. Esto incluye la ubicación estratégica de los pozos, el conocimiento previo sobre su construcción, su estado actual y su viabilidad de adaptación al sistema. Además de estos aspectos, se toma en cuenta el uso de suelo en las proximidades de los pozos, identificando zonas de recarga significativa, vulnerabilidad a la contaminación, y considerando la accesibilidad a cada sitio de monitoreo, como se ve en la Figura 79. De esta manera, se optimiza el diseño del sistema de control hidrogeológico, asegurando su eficiencia y efectividad. La evaluación de la infraestructura existente permite aprovechar los recursos disponibles y minimizar costos adicionales, al seleccionar pozos que puedan ser adecuados para el monitoreo, sin necesidad de construir nuevas estructuras. Esto agiliza la implementación del sistema y facilita la obtención de datos relevantes sobre el comportamiento de los sistemas hidrogeológicos.

## Lineamientos para la selección de puntos del sistema de monitoreo

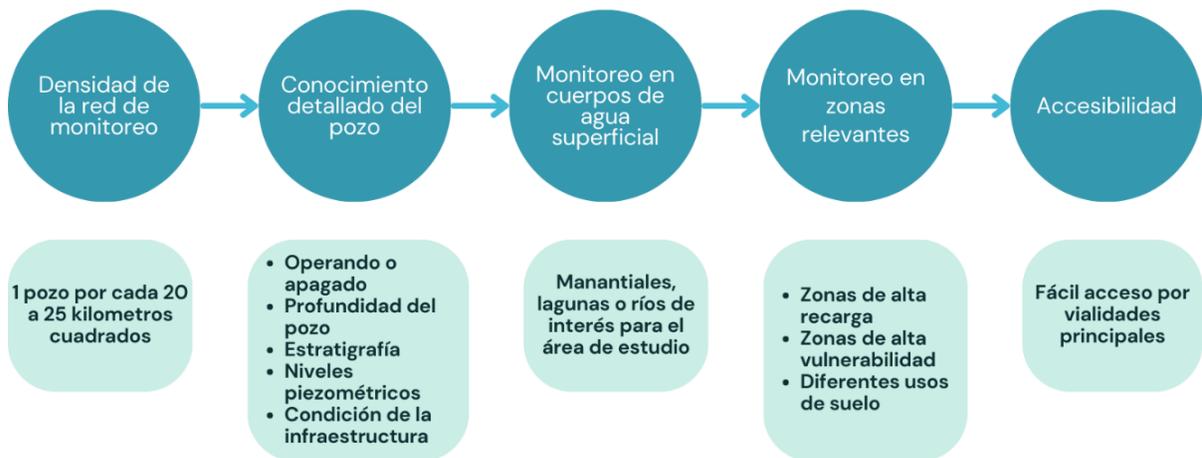


Figura 79. Ejemplo de lineamientos para la selección de puntos del sistema de control hidrogeológico.

Para la selección de pozos de monitoreo se escogieron perforaciones ya existentes (pozos en operación y sin operar). Dentro de la selección de pozos se agregaron algunos pozos que estaban fuera de operación, pues GEOEX-SIAPA (2003) recomienda usar estos pozos como piezómetros. La Figura 80 muestra la densidad (promedio) de pozos de extracción por sistema hidrogeológico, de los cuales se debe seleccionar un pozo en cada cuadrante.



Figura 80. Densidad de puntos de control del AMG.

En algunas zonas del AMG existen pozos de extracción activos que servirán para el monitoreo. Sin embargo, algunas zonas carecen de infraestructura, lo que significa que no hay pozos de agua, como es el caso del S.H. San Isidro y S.H. Los Altos. Para abordar esta situación se propone la instalación de piezómetros en ciertas regiones, tomando en consideración los pozos de la propuesta ideal, con el fin de lograr los objetivos del sistema de monitoreo. La implementación de esta propuesta se llevaría a cabo en dos fases. La primera fase involucra los pozos existentes, de los cuales se eligieron 53 (puntos de color azul) distribuidos en los sistemas hidrogeológicos. Para la segunda fase, se instalarían piezómetros en áreas donde no se tengan pozos de esta índole, resultando en un total de 47 ubicaciones (puntos de color naranja) (véase Figura 81).



Figura 81. Propuesta factible del sistema de control hidrogeológico.

La Tabla muestra el número de pozos propuestos por sistema, así como su comparación con la propuesta ideal. La propuesta factible consta de 53 pozos ya existentes (para conocer las especificaciones de los pozos (véase Anexo 7. Selección de puntos de control) y 47 piezómetros propuestos. Si se opta por la implementación solo la primera fase (i.e., 53 pozos existentes), los pozos constituirán el 54% de los pozos requeridos para complementar la propuesta ideal. En caso de decidir implementar ambas fases (i.e., pozos y piezómetros), se acercaría a la configuración de la propuesta ideal.

Tabla 15. Número de pozos factibles para el análisis de representatividad.

Sistemas hidrogeológicos	Pozos de control factibles, y su reto a la propuesta ideal				Promedio propuesta ideal
	Superficie (km <sup>2</sup> )	Pozos existentes propuestos	Piezómetros propuestos	Total	
Los Altos	786.56	10	27	37	35
Atemajac	511.06	15	7	22	23
Cajititlán	98.56	5	1	6	5
Ixtlahuacán de los Membrillos	140.81	6	3	9	7

Pozos de control factibles, y su reto a la propuesta ideal					
Sistemas hidrogeológicos	Superficie	Propuesta factible			Promedio propuesta ideal
	(km <sup>2</sup> )	Pozos existentes propuestos	Piezómetros propuestos	Total	
<b>San Isidro</b>	160.55	4	4	8	8
<b>Toluquilla</b>	385.44	13	5	18	18
<b>Total:</b>	<b>2082.98</b>	<b>53</b>	<b>47</b>	<b>100</b>	<b>96</b>

Para el Sistema hidrogeológico de Atemajac, se proponen 15 pozos existentes y siete piezómetros, como se muestra en la Figura 82. Debido a que este sistema cuenta con una mayor densidad de pozos, fue posible proponer más pozos que sirvieran para su monitoreo, al ser una de las zonas más urbanizadas y con mayor presencia de pozos de extracción se propone que sea la primera zona en monitorear, además el 43% del área tiene una vulnerabilidad a la contaminación alta y 55% vulnerabilidad media. Es fundamental buscar, rehabilitar e implementar pozos de monitoreo en la zona sur de Tesistán y en el centro de Guadalajara. En el caso especial del centro de Guadalajara, que forma parte de la red de SIAPA, se sugiere establecer un convenio que facilite el uso de las instalaciones existentes, con posibles modificaciones necesarias para integrar los pozos al sistema de control hidrogeológico.



Figura 82. Pozos seleccionados para el control del S.H. Atemajac.

Dentro del Sistema Hidrogeológico Toluquilla se proponen 13 pozos existentes y cinco piezómetros adicionales, tal como se muestra en la Figura 83. Este sistema cuenta con una densidad grande de pozos de extracción de agua subterránea, es una de las zonas más urbanizadas y el 44% del sistema presenta una vulnerabilidad alta y 52% vulnerabilidad media, por lo que la implementación del sistema de monitoreo en pozos existentes es importante para el cuidado de los recursos hídricos de la ciudad.

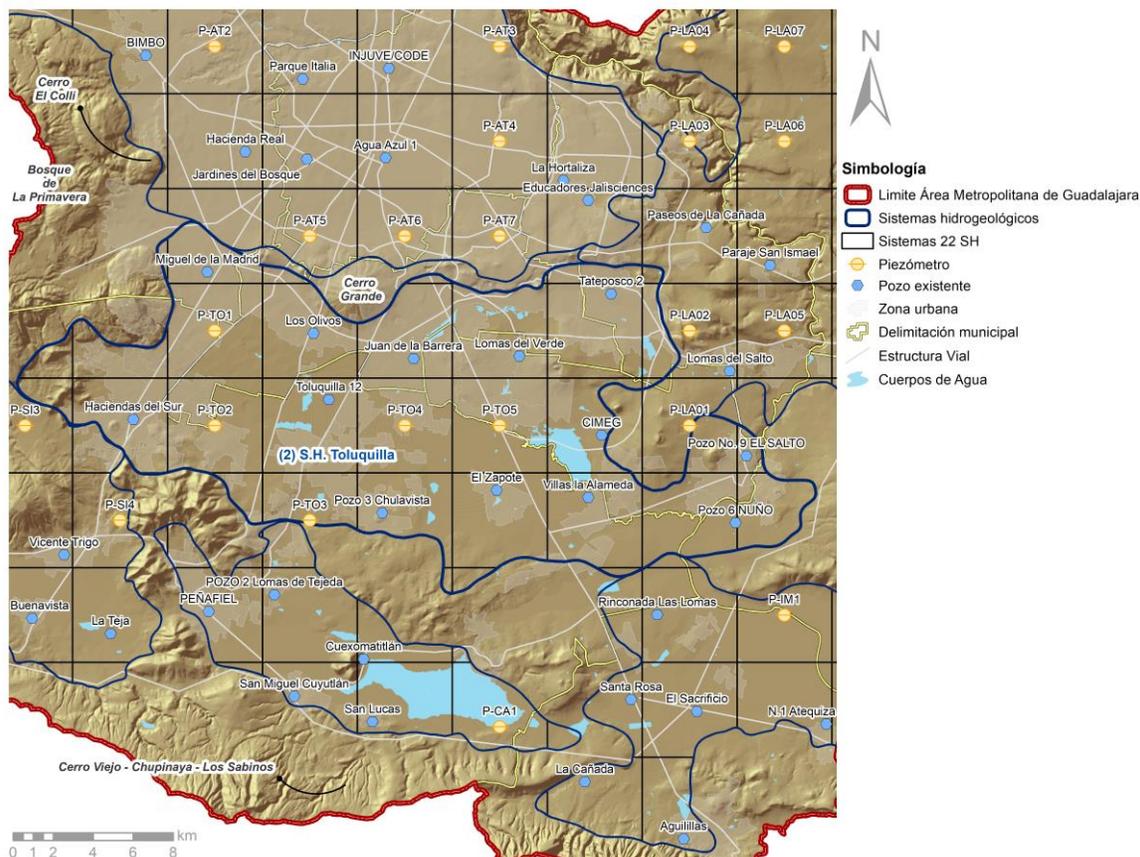


Figura 83. Pozos seleccionados para el control del S.H. Toluquilla.

En el S.H. Los Altos se proponen 10 pozos existentes y 27 piezómetros, como se ve en la Figura 84. Este sistema a diferencia de otros no cuenta con tantos pozos de extracción, y es el que mayor extensión tiene y el 67% del área tiene una vulnerabilidad medio y el 28% Alta. Por esta razón, se sugiere la instalación de piezómetros o la identificación y reactivación de pozos en desuso. Es fundamental abarcar áreas remotas y poco habitadas, como las regiones noroeste y sur del sistema, así como aquellas fuera de los límites municipales de Zapotlanejo. Para lograr esto, se recomienda la colaboración entre municipios, especialmente en las áreas que involucren a otros municipios como Acatic y Tepatitlán de Morelos. Esto no solo facilitaría la estrategia de comunicación, sino también el establecimiento de acuerdos necesarios para la implementación exitosa.



Figura 84. Pozos seleccionados para el control del S.H. Los Altos.

En el caso del sistema San Isidro se proponen cuatro pozos existentes y cuatro piezómetros, como se observa en la Figura 85. No obstante, se sugiere llevar a cabo una revisión exhaustiva en las áreas noroeste y oeste del sistema hidrogeológico, el 69% del sistema esta categorizado con vulnerabilidad Alta. Esto tiene como finalidad identificar posibles pozos, ya sean propiedad del municipio o de entidades privadas, que podrían ser habilitados y unidos al sistema de monitoreo mediante acuerdos formales, si fuese necesario. Asimismo, se plantea la posibilidad de colaboración con otros municipios. La consideración de acuerdos colaborativos podría facilitar la incorporación de pozos que se encuentren fuera de los límites del AMG, potencialmente en el municipio de Tala. Esta acción podría contribuir significativamente a fortalecer el sistema de monitoreo y ampliar su alcance.

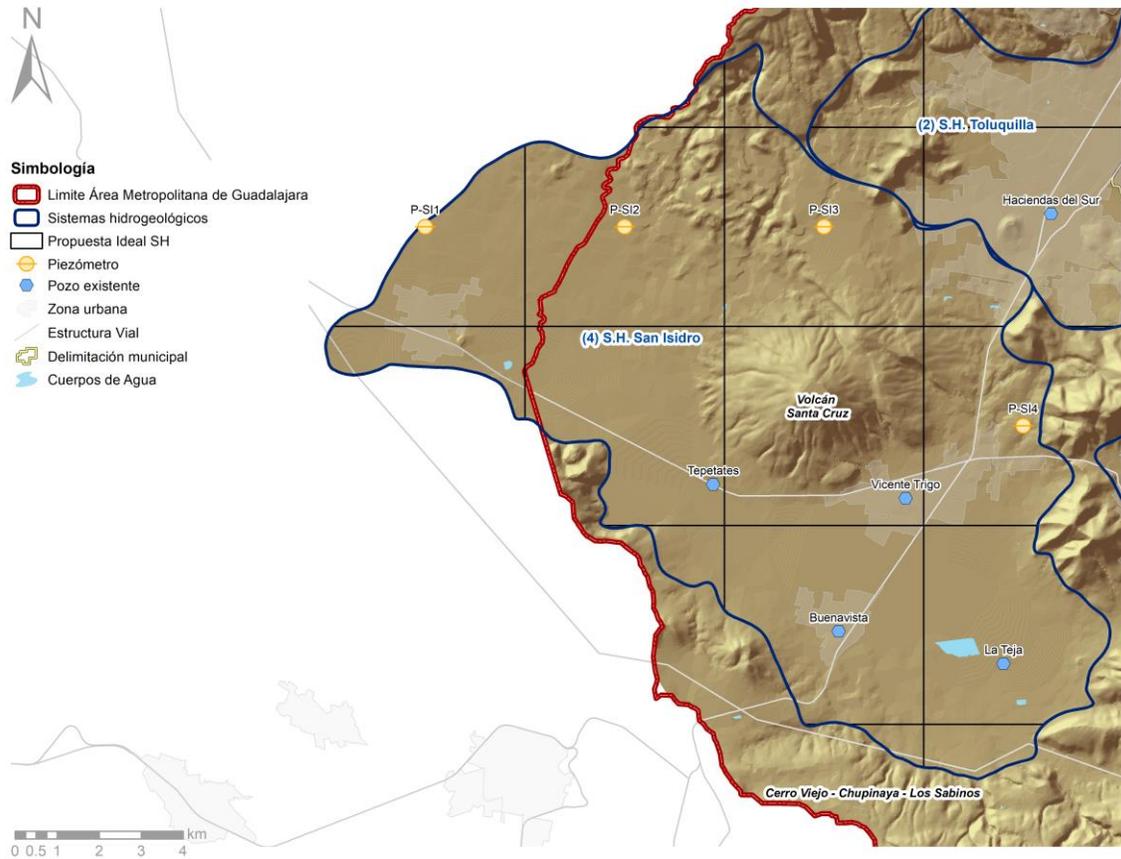


Figura 85. Pozos seleccionados para el control del S.H. San Isidro.

Para el S.H. de Cajitlán se proponen 5 pozos existentes y 1 piezómetro, como se ve en la Figura 86. Este sistema tiene zonas de recarga alta las cuales presentan una con 36% vulnerabilidad Alta y 46% de vulnerabilidad media a la contaminación, por lo que la implementación de un sistema de monitoreo es importante.

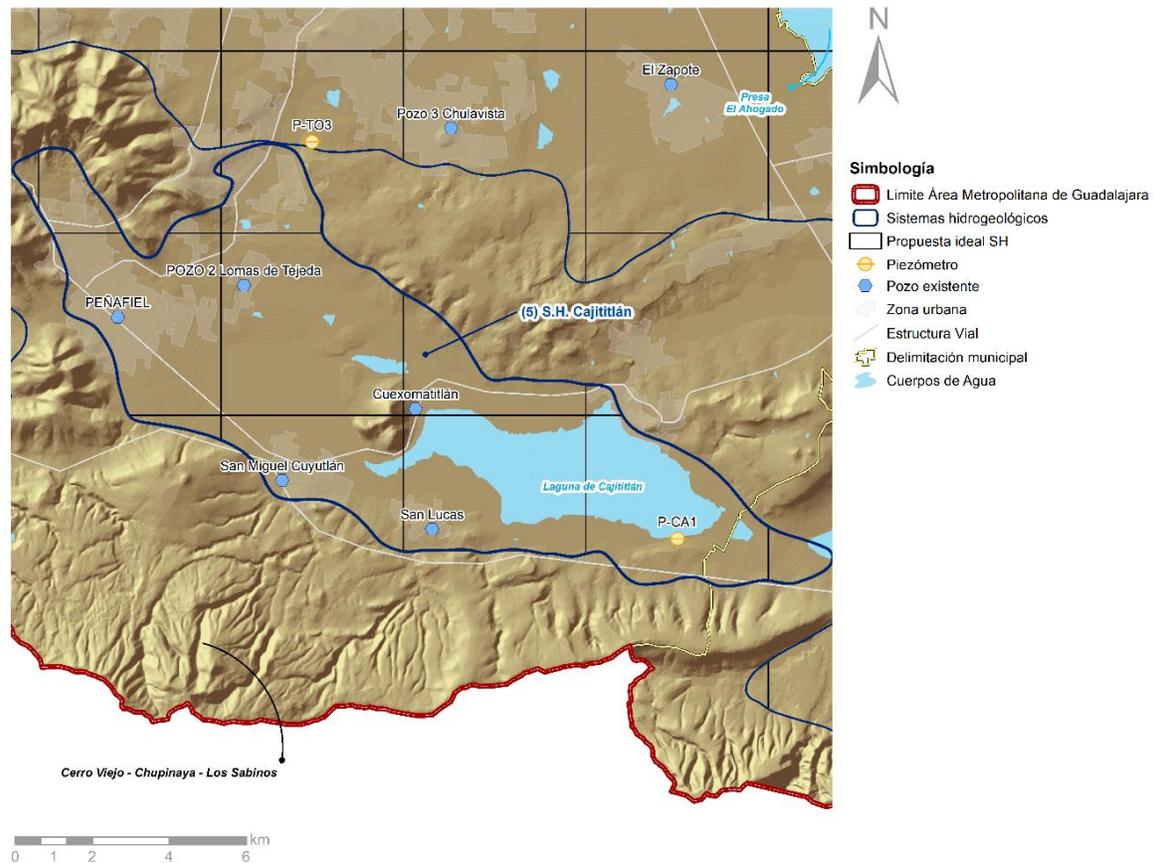


Figura 86. Pozos seleccionados para el control del S.H. Cajititlán.

Para el S.H. de Ixtlahuacán de los Membrillos se proponen 6 pozos existentes y 3 piezómetros, como se ve en la Figura 87. No obstante, se recomienda revisar si existe infraestructura de pozos en la zona norte del sistema, ya sea de privados o del municipio, que se encuentren en operación o en desuso, para incorporar en un futuro más pozos de monitoreo. Además, el 52% de la superficie del sistema se catalogó con vulnerabilidad Alta.

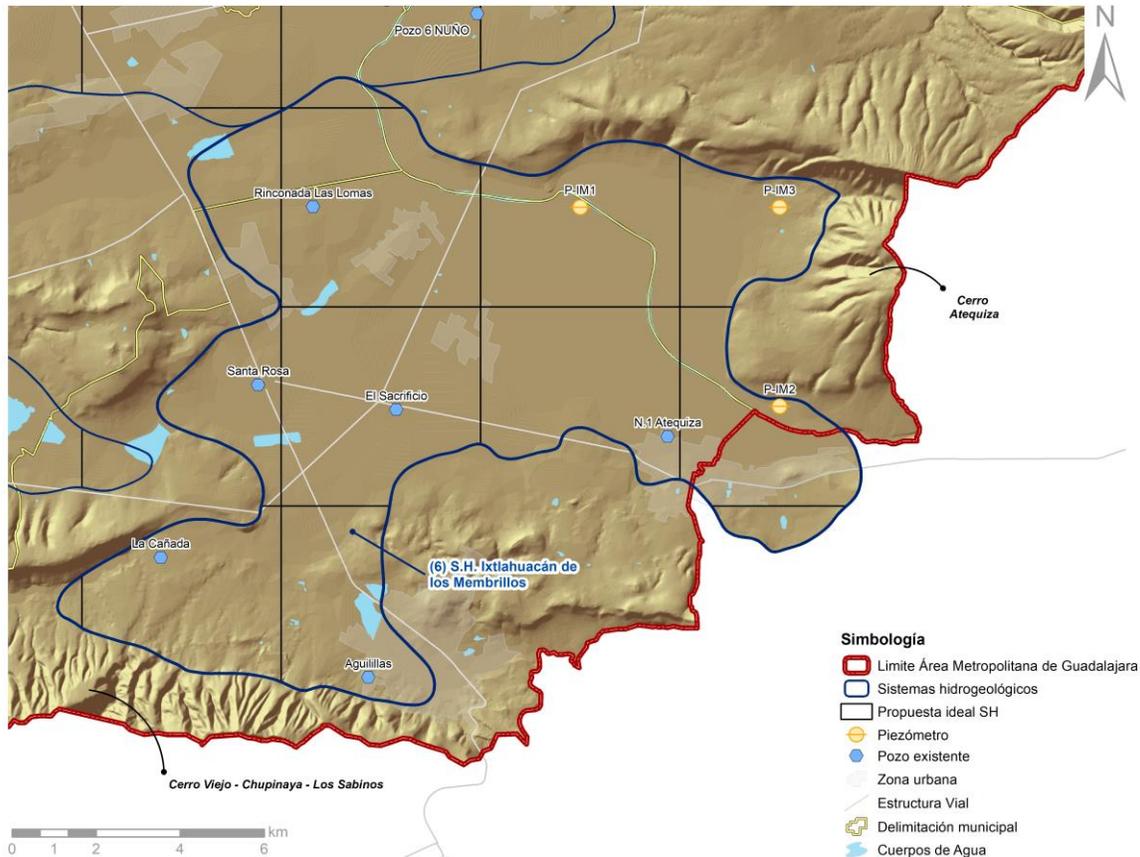


Figura 87. Pozos seleccionados para el control del S.H. Ixtlahuacán de los Membrillos.

Se espera que la correcta implementación de la red de monitoreo y el funcionamiento adecuado de los convenios establecidos con todas las partes interesadas abonen a la mitigación del cambio climático y, por ende, a la protección de los recursos hídricos subterráneos. Además, el éxito de dicho sistema de control también abriría las puertas a la implementación de distintas iniciativas con el mismo fin, lo cual resultaría en un conocimiento mucho más extenso del funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos y, consecuentemente, ayudaría a asegurar la calidad y cantidad de agua dulce en el AMG para las siguientes generaciones.

### 9.3. Equipo de monitoreo

Para el monitoreo de niveles piezométricos y variables fisicoquímicas, se propone que el control se realice con registradores automáticos, los costos aproximados se muestran en la Tabla , tanto para el equipo, como para los accesorios necesarios para la comunicación de la información.



Tabla 16. Registradores automáticos, instrumentos y accesorios.

Propuesta Factible		
Equipo	Rango inferior	Rango superior
Levellogger	\$12,000.00	\$21,000.00
Barologger	\$12,000.00	\$21,000.00
Módulo de sensor de medidor TDS para monitoreo de la calidad del agua	\$200.00	\$500.00
Paquete de comunicación lectura directa para Levellogger (dependiendo de la profundidad del pozo)	\$4,000.00	\$10,000.00
Paquete de conectores lectura directa para Levellogger	\$3,000.00	\$8,000.00
Paquete de conectores lectura directa para Barologger	\$4,000.00	\$15,000.00
Leveloder con cable de interfase para Levellogger	\$4,000.00	\$10,000.00
<b>Total:</b>	<b>\$39,200</b>	<b>\$85,500</b>

El registrador automático "Levellogger" de la marca "Solinst" es un versátil instrumento que mide presión, temperatura y conductividad eléctrica. Existen varios modelos disponibles, con una duración de batería de 8 a 10 años, dependiendo de la frecuencia de las lecturas programadas. Estas mediciones pueden realizarse en intervalos que van desde 0.5 segundos hasta 99 horas. Este equipo se puede instalar suspendido con un cable de acero o conectado directamente a la superficie mediante un cable de lectura directa, lo cual es recomendado. Esta conexión permite transmitir información o reprogramar el instrumento sin sacarlo del agua, brindando mayor seguridad en su manejo. En general, los modelos sencillos pueden sumergirse en el agua hasta una profundidad de 100 metros, y al medir el nivel piezométrico, el error máximo es de 1 metro, en un rango de -10 °C a + 40 °C. El proceso de programación y descarga de datos se realiza a través de un lector óptico conectado a una computadora. Se inserta el "Levellogger" en el lector óptico y se programa con la información necesaria. Luego, se puede iniciar el muestreo, pero es recomendable tomar una medición manual inicial del nivel estático en el pozo como referencia.

El "Barologger" es otra herramienta importante, ya que mide la presión absoluta, que incluye la presión del agua como la presión atmosférica. Utilizar este equipo para realizar compensación de presión atmosférica permite obtener mediciones precisas de los niveles de agua, evitando problemas y errores asociados con la acumulación de humedad en los cables.

Para tener comunicación directa con el "Levellogger" y "Barologger" sin retirarlos del agua, se emplean los cables de lectura directa. Estos cables vienen en diferentes prediseños de longitud, como 15, 30, 60, 80 y 100 metros, pero también pueden solicitarse en otras longitudes según las necesidades específicas del sitio de monitoreo.

Existen otros sensores como el multiparamétrico de Nivel KELLER Serie 36XiW-CTD es una herramienta avanzada que puede medir el nivel, la conductividad, la temperatura y la profundidad de las masas de agua. Su costo aproximado es de \$35,000, y es equiparable a los antes mencionados, los cuales tienen un costo de adquisición aproximado de \$12,000 a \$21,000 cada uno, más los equipos de interconexión. Al utilizar el Sensor multiparamétrico, se reduce la cantidad de equipo y conexiones necesarias en los pozos, lo que disminuye la probabilidad de daños y facilita la instalación y mantenimiento.

Se proponen utilizar estos sensores para automatizar las mediciones de las diferentes variables. En caso de que no sea posible incorporar estos equipos, se realizará de forma manual la toma de datos

mensuales. Además, se sugiere realizar el muestreo de agua al menos dos veces al año, durante la temporada de estiaje y la temporada húmeda, con el fin de obtener una comparativa significativa.

## 9.4. Estimación económica de la implementación

La investigación sobre diferentes sistemas de monitoreo utilizados en América Latina y otros países permitió contrastar diversas formas de obtención de datos, desde métodos manuales con intervalos más espaciados hasta sistemas de información en tiempo real. Con el propósito de brindar una visión general de la inversión requerida, a continuación, se presentan dos ejercicios que determinan el monto aproximado para implementar un sistema de monitoreo de pozos en la ciudad.

### 9.4.1. Sistema de monitoreo manual

En algunos países de América Latina, incluyendo la AMG, se lleva a cabo un monitoreo manual bajo un programa permanente de seguimiento e interpretación de los datos obtenidos. Aunque este sistema puede ser más costoso y propenso a errores humanos a lo largo del tiempo, tiene la ventaja de poder implementarse de manera inmediata y proporcionar datos que actualmente no están disponibles, generando así un valioso historial de datos.

Los costos asociados a este sistema son principalmente cuatro: el personal encargado de la toma de datos, los gastos operativos, la inversión en equipamiento y los honorarios de especialistas para la interpretación de los datos. La Tabla muestra el costo de inversión y operación de un año para la toma de muestras de 61 pozos, tres veces al año.

Tabla 17. Costo aproximado del sistema de monitoreo manual.

Supervisión Manual de Pozos						
No	Concepto	Cantidad	Precio unitario	Salario Anual	Estimación	Monto total
1	Inversión. Sonda de 400 metros con sensor para medir profundidad, pH, temperatura y conductividad	3	\$95,000	NA	NA	\$285,000
2	Inversión. Sonda sónica para determinar profundidad	1	\$35,000	NA	NA	\$35,000
3	Inversión. Camioneta	1	\$550,000			\$550,000
4	Gasto. Combustible	NA	NA	NA	\$450,000	\$450,000
5	Gasto. Salario de operador	2	NA	\$300,000	NA	\$600,000
6	Gasto. Pruebas de laboratorio	183	\$12,000	NA	NA	\$2,196,000
7	Honorarios. Interpretación de resultados	1	NA	\$150,000	NA	\$150,000
<b>Total</b>						<b>\$4,266,000</b>

Es importante destacar que este costo estimado se basa en el supuesto de que el gobierno decida llevar a cabo el monitoreo y no incluye un análisis detallado de depreciación ni gastos imprevistos. Sin embargo, este presupuesto de aproximadamente cuatro a cinco millones de pesos

proporcionaría información continua sobre la profundidad y calidad del agua subterránea de la ciudad.

#### 9.4.2. Sistema de monitoreo automatizado

La implementación de un sistema de monitoreo automatizado requiere un proyecto ejecutivo que contemple el levantamiento de requerimientos de energía eléctrica e infraestructura para equipar cada uno de los pozos seleccionados, así como los gastos de instalación y mantenimiento preventivo, incluyendo la reposición periódica de los sensores de medición. Los costos presentados en la Tabla se enfocan en la inversión inicial y los gastos asociados al operador y técnico encargado de interpretar los resultados.

Tabla 18. Costo aproximado el sistema de monitoreo automatizado

Supervisión automatizada de Pozos						
No	Concepto	Cantidad	Precio unitario promedio	Salario Anual	Estimación	Monto total
1	Inversión. Equipo de monitoreo automáticos para pozos	100	\$25,000	NA	NA	\$2,500,000
3	Inversión. Camioneta	1	\$550,000			\$550,000
4	Gasto. Combustible	NA	NA	NA	\$450,000	\$450,000
5	Gasto. Salario de operador	1	NA	\$300,000	NA	\$300,000
6	Gasto. Pruebas de laboratorio	183	\$12,000	NA	NA	\$2,196,000
7	Gasto. Interpretación de resultados	1	NA	\$150,000	NA	\$150,000
<b>Total</b>						<b>\$6,146,000</b>

Este ejercicio básico de costos proporciona una visión preliminar de la inversión y los gastos operativos asociados con ambos sistemas de monitoreo. Si bien estos datos no son concluyentes ni suficientemente sólidos para una licitación formal, sí indican que se necesita una inversión inicial significativa y un gasto operativo constante para ambos sistemas. Para obtener costos detallados, sería necesario desarrollar un proyecto o programa específico para cada opción y someterlo a diferentes proveedores de tecnología para obtener un balance preciso de los costos.



## 10. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto ha alcanzado exitosamente sus objetivos planteados. Uno de estos objetivos fue llevar a cabo la delimitación de los sistemas hidrogeológicos a través de la aplicación de criterios hidrogeológicos respaldados por una amplia revisión bibliográfica de distintas metodologías y estudios previos. Además, se logró la identificación de las áreas más susceptibles a la contaminación intrínseca, junto con una clasificación de la capacidad de recarga relativa en la superficie de la ciudad. Este análisis resultó en la identificación de las zonas con mayor potencial de recarga de agua subterránea, un aspecto fundamental para reconocer las regiones más propensas a la contaminación. Asimismo, se ha elaborado una propuesta para un plan de monitoreo de aguas subterráneas. Dicho plan se basa en puntos de muestreo seleccionados de manera estadística, asegurando así un control integral de los sistemas hidrogeológicos que proveen de agua al Área Metropolitana de Guadalajara (AMG).

En cuanto a la delimitación de los sistemas, se han identificado seis sistemas hidrogeológicos principales en el AMG: (1) Atemajac, (2) Toluquilla, (3) Los Altos, (4) San Isidro, (5) Cajitlán y (6) Ixtlahuacán de los Membrillos. Cada uno de estos sistemas se ha delimitado considerando aspectos geológicos, hidrológicos y topográficos, lo que proporciona un mejor entendimiento del funcionamiento hidrogeológico y contribuye a una planificación urbana más adecuada.

La categorización de la superficie del AMG en términos de capacidad de infiltración ha permitido identificar zonas de recarga baja, moderada, alta y muy alta. Este enfoque ha permitido clasificar las áreas de mayor recarga relativa, que corresponden a regiones con valores de "Alta" y "Muy alta", abarcando más del 56% de los municipios del AMG. Además, se ha modelado la vulnerabilidad intrínseca de cada sistema en relación con la contaminación del agua subterránea desde la superficie. Esto ha revelado una correlación directa entre la capacidad de recarga y la susceptibilidad de los recursos hídricos subterráneos, sentando las bases para la consideración de criterios hidrogeológicos en la planificación urbana, con el propósito de proteger las fuentes de agua y mantener el equilibrio ecológico de la región.

Por último, el sistema de control propuesto para la gestión integral del agua subterránea se ha adaptado para ser implementado con las infraestructuras existentes, permitiendo así el inicio del monitoreo del agua subterránea en el AM. Además, promueve la participación activa de la ciudadanía, ya que el éxito de la implementación depende de establecer diálogos continuos con las comunidades locales, estancias gubernamentales, autoridades responsables de la gestión del agua y expertos. Este enfoque incorpora el ejemplo de un programa de ciencia ciudadana que busca fortalecer la base de conocimiento acerca del sistema hidrogeológico mediante información proporcionada por la población. Esto favorecerá la identificación de áreas de oportunidad para optimizar la generación de información sobre los recursos hídricos, al mismo tiempo que promueve la participación ciudadana y el apoyo de las autoridades. Estos elementos son cruciales para la conservación de agua de calidad para las generaciones actuales y futuras de esta región.



## 11. Recomendaciones y trabajo futuro

En esta sección se exponen dos segmentos correspondientes a las recomendaciones generales y consideraciones necesarias al llevar a cabo la implementación del sistema de monitoreo.

### 11.1. Consideraciones generales

- Es necesario dar mantenimiento a los pozos de extracción de agua subterránea, ya que, durante las visitas de campo, se observó que algunos estaban abiertos y sin protección; lo cual los convierte en ventanas de contaminación directas a los sistemas hidrogeológicos, pues puede ocurrir algún derrame o algún vector puede entrar y contaminar la fuente de abastecimiento.
- Prestar atención en las fuentes potenciales de contaminantes (*e.g.*, rellenos sanitarios, estaciones de transferencia, gasolineras, etc.), identificadas dentro de zonas de vulnerabilidad “Alta” y “Muy alta” de los sistemas hidrogeológicos. La implementación de planes de prevención y respuesta a derrames en estas áreas contribuirá significativamente a proteger la calidad del agua subterránea.
- El AMG requiere de una nueva fuente de abastecimiento de agua potable, que sea permanente y sustentable, por lo que pensar en opciones como reutilización de agua en actividades productivas.
- Por cuestiones de salud pública, es urgente implementar sistemas de control de calidad en las fuentes profundas de abastecimiento (*i.e.*, pesticidas, hidrocarburos, contaminantes emergentes), mismas que pueden ser operadas por SIAPA u otros particulares, particularmente en el sistema hidrogeológico Toluquilla.
- Se deben instalar medidores en las fuentes de aprovechamiento que no tienen. Es recomendable llevar a cabo en un control del consumo de agua, con base en el consumo de energía eléctrica.
- Se requiere fomentar, permanentemente, la cultura del ahorro y consumo responsable del agua, particularmente en actividades productivas.
- Fomentar los estudios hidrológicos e hidrogeológicos de los sistemas propuestos, con el objetivo de obtener una mayor cantidad de información y lograr un conocimiento más detallado de los mismos.
- Implementar programas de supervisión y monitoreo de los parámetros de calidad del agua, en las descargas de las plantas de tratamiento de agua residual, tanto públicas como privadas.
- Establecer programas de monitoreo en las zonas en donde existan actividades potencialmente contaminantes, esto para mantener un control de la calidad del agua subterránea del sistema hidrogeológico en el que se encuentran.
- Para todas las infraestructuras y rellenos sanitarios ubicados en zonas de vulnerabilidad muy alta y alta, es fundamental implementar prácticas de manejo adecuadas para prevenir la filtración de sustancias peligrosas y garantizar la protección del recurso hídrico subterráneo.

- 
- Para aquellas infraestructuras de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), ubicadas en zonas de vulnerabilidad muy alta y alta, se recomienda implementar planes de manejo de residuos adecuados, así como monitoreo constante los sitios por parte de las autoridades competentes, para evitar la infiltración de contaminantes.
  - En las zonas de vulnerabilidad alta y muy alta de los sistemas hidrogeológicos, donde la densidad de las estaciones de PEMEX sea alta, se recomienda mantener las gasolineras bajo supervisión de seguridad de derrames, para evitar la infiltración de hidrocarburos a los sistemas hidrogeológicos.
  - Para lograr un entendimiento más completo de la relación entre los cauces superficiales y los sistemas subterráneos, se recomienda realizar estudios detallados, cuyo impacto en la planificación y gestión territorial es relevante. Incrementar el conocimiento del modelo conceptual hidrológico ayuda a mejorar la gestión y suministro del agua, la infraestructura y el entorno urbano en general. Esta información proporciona una base más sólida para una planificación urbana más resiliente, sostenible y adaptada a los desafíos que enfrenta el AMG.
  - Se encontró que gran parte de las zonas de “alta y muy alta” recarga relativa, corresponden a espacios verdes, como parques y bosques urbanos. Debido a lo anterior, se recomienda conservar y realizar actividades de restauración y mantenimiento a estas áreas urbanas de recarga.
  - Si se pretende llevar a cabo proyectos de recarga gestionada de los sistemas hidrogeológicos, resulta recomendable ejecutarlos en las áreas más occidentales del área de estudio. Concretamente, se sugiere dirigir la atención hacia los sectores llanos de la Sierra La Primavera, donde se encuentran zonas evaluadas como de “alta recarga”. En estos puntos, los cauces de escorrentía superficial mantienen su régimen natural, sin transportar consigo los contaminantes habituales de las zonas urbanas. Esta iniciativa podría tener el potencial de incrementar la reserva de agua subterránea del AMG, de acuerdo con los análisis piezométricos realizados, a la vez que se previenen inundaciones que causan problemas aguas abajo.
  - Se deben de conservar y establecer planes de manejo para las áreas agrícolas, las cuales, en su gran mayoría, se encuentran categorizadas como zonas de recarga alta. Debido a ello, es importante conservar su uso de suelo y regular las actividades ahí realizadas.
  - En las zonas agrícolas situadas en áreas de recarga alta y muy alta, se sugiere implementar un monitoreo constante del uso de fertilizantes, plaguicidas, fungicidas y pesticidas mediante estrategias y planes de optimización para asegurar su adecuada gestión.
  - Dentro del AMG, se exhorta establecer nuevos espacios verdes para aumentar las zonas de recarga en la sección urbana, que puedan fungir, a la vez, como mejoras en el ámbito paisajístico, ecológico, social y cultural de la ciudad.
  - Como se vio en la relación de las zonas de vulnerabilidad y recarga “Altas” y “Muy Altas”, se debe de priorizar la protección de aquellas áreas que junten estos dos criterios y que, aparte, presenten un riesgo potencial a la contaminación de los sistemas hidrogeológicos, como las estaciones de PEMEX, infraestructura para RSU, PTAR o zonas industriales.
  - Mantener bajo supervisión las descargas industriales realizadas en los cuerpos de agua superficiales, ya que las zonas aledañas se consideran, por lo regular, áreas de recarga alta



y muy alta; por lo que un derrame podría culminar en la contaminación del agua subterránea.

## 11.2. Consideraciones al implementar el sistema de monitoreo propuesto

Ambos sistemas de monitoreo propuestos consideran el contexto socioeconómico de todos los municipios, lo cual ayuda a identificar las mayores áreas de oportunidad, con el fin de optimizar el rendimiento y la precisión de la información generada sobre el agua subterránea. No obstante, la participación ciudadana y el apoyo de las distintas autoridades son factores cruciales para alcanzar la gestión integral y sustentable de todos los recursos hídricos del AMG.

Además de lo ya estipulado, se mencionan, a continuación, algunas consideraciones al implementar alguna propuesta, en búsqueda de la mejora de cualquiera de los dos sistemas de monitoreo propuestos:

- Antes de instalar nuevos pozos de monitoreo, se recomienda identificar y seleccionar, estratégicamente, pozos activos o inactivos que puedan fungir como piezómetros para el monitoreo de los sistemas hidrogeológicos definidos. En caso de no existir dichas obras de suministro, se recomienda perforar o construir pozos de monitoreo que también puedan ser utilizados como pozos de abastecimiento.
- Establecer un sistema continuo de medición de niveles piezométricos, distribuido en una densidad adecuada y equipado con los dispositivos más confiables y de mejor calidad para aumentar la precisión de los resultados.
- Los pozos propuestos deben habilitarse antes de instalar el equipo de control. Por “habilitarse” se refiere a asegurarse que la estructura del pozo se encuentre íntegra, libre de agentes externos (*e.g.*, residuos, vectores, almacenamiento de materiales que puedan derramarse, actividades potencialmente contaminantes como las granjas etc.), y completamente sellada para evitar el ingreso de contaminantes. A grandes rasgos, se espera que el pozo se encuentre en condiciones ideales para la instalación de los equipos de medición.
- En caso de ser necesario, se deben de reemplazar los pozos propuestos por aquellos cercanos (que cubran la misma zona) que se encuentren en las mismas -o mejores- condiciones, ya sea porque se haya generado un pozo nuevo, o por cuestiones de seguridad.
- Se deben instalar medidores en las fuentes de aprovechamiento que no cuenten con uno.
- Una vez instalados los equipos de medición, se debe vigilar que el pozo continúe en buenas condiciones y que el equipo opere correctamente, para lo que se recomiendan mantenimientos frecuentes.
- Se recomienda que los municipios del AMG unan esfuerzos para que el presente proyecto se convierta en un sistema de monitoreo permanente.
- Se sugiere generar una herramienta eficiente para compartir información, la cual esté actualizada y sea accesible para toda la población. Para ello, se recomienda el apoyo de IMEPLAN.

## ACRÓNIMOS Y SIGLAS

Área Metropolitana de Guadalajara (**AMG**)  
Área Natural Protegida (**ANP**)  
Comisión Estatal del Agua de Jalisco (**CEA**)  
Comisión Nacional del Agua (**CONAGUA**)  
Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (**CONABIO**)  
Diario Oficial de la Federación (**DOF**)  
Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (**IIEG**)  
Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (**IMEPLAN**)  
Instituto Nacional de Estadística y Geografía (**INEGI**)  
Modelo Digital de Elevación (**DEM**)  
Organización de las Naciones Unidas (**ONU**)  
Plan de Ordenamiento Metropolitano (**POTmet**)  
Programa de Desarrollo Metropolitana 2.0 (**PDM**)  
Programa de Ordenamiento Territorial del Estado de Jalisco (**POET**)  
Secretaría de Gestión Integral del agua (**SEGIA**)  
Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial de Jalisco (**SEMADET**)  
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (**SEMARNAT**)  
Servicio Geológico Mexicano (**SGM**)  
Servicio Meteorológico Nacional (**SMN**)  
Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (**SIATL**)  
Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (**SIAPA**)  
Sistemas de Información Geográfica (**SIG**)  
Unidades de Gestión Ambiental (**UGA**)  
*Universal Transversal de Mercator* (**UTM**)  
Objetivos de Desarrollo Sustentable (**ODS**)  
Organización de las Naciones Unidas (**ONU**)

## BIBLIOGRAFÍA

- Abu-hashim, et al. (2003). Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. *Applied Geography*, 303-324.
- Abu-hashim, M., Schöniger, B., & Schnug, E. (2011). *Impact of Land-use and Land-management on the Water Infiltration Capacity of Soils on a Catchment Scale*. .
- Aguero-Valverde, J. &. (Septiembre de 2000). *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica. Obtenido de University of Costa Rica.
- Aller, et al. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. Obtenido de EPA: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20007KU4.PDF?Dockey=20007KU4.PDF>
- Almasri, M. N., & Kaluarachchi, J. J. (2004). A GIS-based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Environmental Modelling & Software*, 19(11), 1091-1100.
- AMVA. (junio de 2017). *Manual de Monitoreo de Agua Subterránea*. Obtenido de Subdirección Ambiental Área Metropolitana del Valle de Aburrá: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.metropol.gov.co/area/Documents/transparencia/M-GAA-RR-02%20Manual%20para%20el%20monitoreo%20de%20aguas%20subterranas.pdf>
- AMVA, Red Río Aburrá-Medellín. (2018). *Informe Ejecutivo: Aunar esfuerzo para la apropiación tecnológica y el conocimiento para la gestión integral del recurso hídrico superficial y subterráneo, en el contexto de la operación de la red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río*. Obtenido de Metropol: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.metropol.gov.co/ambiental/rcurso-hidrico/Documents/calidad/operacion-red-informe-ejecutivo-2018.pdf>
- Appelo, C., & Postma, D. (2010). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Leiden: A.A. Balkema Publishers.
- ArcGIS. (3 de abril de 2023A). *Modelo de geoinformación de ArcGIS*. Obtenido de ArcGIS: <https://enterprise.arcgis.com/es/portal/latest/use/geo-info.htm>
- ArcGIS. (marzo de 2023B). *Comparar métodos de interpolación*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/comparing-interpolation-methods.htm>
- ArcGIS. (enero de 2023C). *What is ModelBuilder?* Obtenido de <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>



- Australian Government. (2013). *National Groundwater Information System*. Obtenido de Australian Government, Bureau of Meteorology: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.bom.gov.au/water/about/publications/document/InfoSheet\\_16.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.bom.gov.au/water/about/publications/document/InfoSheet_16.pdf)
- Australian Government. (2023). *Australian Groundwater Explorer*. Obtenido de Australian Government, Bureau of Meteorology: <http://www.bom.gov.au/water/groundwater/explorer/index.shtml>
- Australian Government. (2023). *National Groundwater Information System*. Obtenido de Australian Government, Bureau of Meteorology: <http://www.bom.gov.au/water/groundwater/ngis/>
- Awawdeh, et al. (2014). Groundwater Vulnerability Assessment in the Vicinity of Al-Ramtha Wastewater Treatment Plant, North Jordan. *Applied Water Science*.
- Barrera Rodríguez, D. R., & Zaragoza Vargas, D. F. (2003). *Geomorfología del Estado de Jalisco*. Obtenido de <http://siga.jalisco.gob.mx/moet/subsistemanatural/geologiaygeomorfologia/sintgeo.htm>
- Chenini, et al. (2018). Groundwater Vulnerability Mapping in Urbanized Hydrological System Using Modified Drastic Model and Sensitivity Analysis. *Environmental & Engineering Geoscience*, 293–304. Retrieved from <https://pubs.geoscienceworld.org/aeg/eeg/article-abstract/24/3/293/530526/Groundwater-Vulnerability-Mapping-in-Urbanized?redirectedFrom=PDF>
- CONAGUA. (2005). *Estadísticas del agua en México*. Distrito Federal: ISBN: 968-817-565-X.
- CONAGUA. (mayo de 2009). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Jalisco*. Obtenido de Comisión Nacional del Agua: <https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/Programa%20H%C3%ADdrico%20Visi%C3%B3n%202030%20del%20Estado%20de%20Jalisco.pdf>
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México*. Obtenido de CONAGUA: [https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2019.pdf](https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf)
- CONAGUA. (17 de 09 de 2020). *Disponibilidad Media Anual de Aguas Subterráneas*. Obtenido de CONAGUA: <https://sigaims.conagua.gob.mx/dma/acuiferos.html>
- Custodio E, L. M. (1983). *Hidrología Subterránea 2ª Edición*. Omega. Barcelona.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea. Tomo 1*. Barcelona: OMEGA. doi:ISBN: 9788428204477
- Dirección de Agua. (2022). *Monitoreo de Acuiferos*. Obtenido de Costa Rica: <https://da.go.cr/gestion-de-acuiferos-monitoreos-cti/>
- División de Estudios y Planificación. (diciembre de 2019). *Criterios para implementación de redes de monitoreo de aguas subterráneas*. Obtenido de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://snia.mop.gob.cl/sad/SUB5873.pdf>

- DOF. (2022). *NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. Wiley.
- El Bouqdaoui, K., & Aachib, M. (2018). Delimitation of the Perimeters of Protection of Groundwater Catchments of the Berrechid Aquifer (Morocco) through Hydrogeological Modeling. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6. Obtenido de <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=86249>
- Escobar, M. (2022). *Tipos de datos SIG*. Obtenido de <https://mastergis.com/blog/tipos-de-datos-sig>
- Escolero, et al. (2000). Delimitation of a hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: the Merida, Yucatan example. *Landscape and Urban Planning*, 51, 53-62. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00096-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00096-7)
- Esri. (2021). *¿Qué son los SIG?* Obtenido de ESRI: <https://www.esri.com/es-es/what-is-gis/overview>
- Faybishenko, et al. (2015). *Fluid Dynamics in Complex Fractured-Porous Systems*. American Geophysical Union. Obtenido de <https://www.perlego.com/es/book/996512/fluid-dynamics-in-complex-fracturedporous-systems-pdf>
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology 4th edition*. Petrinice-Hall.
- Flores, D. V. (2010). Red de Monitoreo de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de San Salvador y Valle de Zapopitán. *Revista científica, ERIS/USAC-GUATEMALA*, 1-10. Obtenido de [https://www.sica.int/busqueda/busqueda\\_archivo.aspx?Archivo=artc\\_62723\\_1\\_07092011.pdf](https://www.sica.int/busqueda/busqueda_archivo.aspx?Archivo=artc_62723_1_07092011.pdf)
- Fluence news team. (07 de Marzo de 2022). *Fluence*. Obtenido de ¿Qué es una ciudad esponja?: <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-una-ciudad-esponja/>
- Foster, el at. (2002). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington, DC: Banco Mundial. Obtenido de chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://documents1.worldbank.org/curated/en/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>
- Foster, S. (2020). Global Policy Overview of Groundwater in Urban Development - A Tale of 10 Cities! *Water*, <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/2/456>.
- Foster, S. S., & Chilton, P. J. (2003). Groundwater: the processes and global significance. *The royal society*, 1957-1972. doi:10.1098/rstb.2003.1380
- Foster, S. S., & Hirata, R. C. (1988). *Groundwater pollution risk assessment: A methodology using available data*. Lima: Monography. Obtenido de <https://search.bvsalud.org/gim/resource/en/lil-146657>
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Pretinice-Hall.



- García Amaro, E. (1998, re-edición 2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Obtenido de <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- GEOEX-SIAPA. (2003). *Diseño e instalación de un sistema de monitoreo del acuífero*.
- Gobierno de España. (abril de 2021). *Guía para la Evaluación del Estado de las Aguas Superficiales y Subterráneas*. Obtenido de Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico: [https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/guia-para-evaluacion-del-estado-aguas-superficiales-y-subterranas\\_tcm30-514230.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/guia-para-evaluacion-del-estado-aguas-superficiales-y-subterranas_tcm30-514230.pdf)
- Gobierno de España. (2023). *Programa químico de vigilancia*. Obtenido de Ministerio para la Transición ecológica y el Reto Demográfico: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-subterranas/red-de-calidad/Programa-quimico-de-vigilancia.aspx>
- Gobierno de Jalisco. (2013. Actualización 2016). *Plan Estatal de Desarrollo Jalisco 2013-2033. Actualización 2016*. Obtenido de Planeación y Participación Ciudadana: <https://seplan.app.jalisco.gob.mx/biblioteca/archivo/descargarArchivo/2057>
- González de Vallejo, et al. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson. Obtenido de [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod\\_resource/content/1/Livro%202.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf)
- Hernández-Antonio, et al. (2015). *Groundwater Flow Processes and Mixing in Active Volcanic Systems: The Case of Guadalajara (Mexico)*. Obtenido de Hydrology and Earth System Sciences: <https://hess.copernicus.org/articles/19/3937/2015/hess-19-3937-2015.pdf>
- Hernández-Antoniot, & Mahlkecht. (2014). *Contaminación Hidrotermal del Agua Subterránea: Atemajac-Toluquilla, Jalisco*.
- HIMAT. (1990). *Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos*. Obtenido de Centro de Documentación IDEAM: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/009198/009198.pdf>
- Houria, B., & Naima, D. (2023). Assessment of Ground water Vulnerability using GOD Method. *International Journal of Innovative Studies in Sociology and Humanities*, 185-189. Obtenido de <https://ijissh.org/storage/Volume8/Issue1/IJISSH-080119.pdf>
- Huízar Álvarez, R., & Carrillo Rivera, J. J. (2021). Hydrogeochemical Characterization of groundwater and its interaction with other components of the environment in Mexico. En *Intensified Land and Water use*.
- IDEAM. (febrero de 2013). *Toma de Muestras de Aguas Subterráneas - Bifenilos Policlorados (PCB)*. Obtenido de Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/http://www.nuevalegislacion.com/files/susc/cdj/conc/M2-SAPc-06.pdf>

- IGME. (2002). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico principios y aplicaciones. En *Muestreo del Agua: Métodos y Precauciones* (págs. 473-477). Instituto Geológico de España. doi:ISBN: 84-7840-465-1
- IGRAC. (2020). *National groundwater monitoring programmes: A global overview of quantitative groundwater monitoring networks*. Obtenido de International Groundwater Resources Assessment Centre: <https://www.un-igrac.org/stories/national-groundwater-monitoring-programmes>
- IMEPLAN. (2016). *POTmet, Plan de Ordenamiento Territorial metropolitano del MAG*. Obtenido de [https://www.imeplan.mx/wp-content/uploads/2021/12/POTmet\\_IIIIFB-BajaRes-1.pdf](https://www.imeplan.mx/wp-content/uploads/2021/12/POTmet_IIIIFB-BajaRes-1.pdf)
- IMEPLAN. (2018). *PACMetro*. Obtenido de Transparencia Jalisco: <https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/Plan%20de%20acci%C3%B3n%20clim%C3%A1tica.pdf>
- IMEPLAN. (2021). *Tomo 2: Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara*. Libro Blanco IMEPLAN (2017 - 2021). Obtenido de [https://drive.google.com/file/d/1cEU4YbFVYHLIISPdk\\_tfrX3k2fT2mDvn/view](https://drive.google.com/file/d/1cEU4YbFVYHLIISPdk_tfrX3k2fT2mDvn/view)
- IMEPLAN, Resilient Cities Network. (2022). *Agenda de Resiliencia Hídrica del Área Metropolitana de GUadalajara*. Guadalajara. Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/1WIANZP-cWJW3fKmt-XGHLvJNL0ePFRDQ/view>
- INEGI. (1998). *Estudio hidrogeológico de Jalisco*.
- INEGI. (2001). *Estudio hidrológico del estado de Jalisco*. Aguascalientes.
- INEGI. (2023). *Diccionario de datos topográficos Escala 1:50 000 (2020), versión 2022*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>
- Jin, M., Lancia, M., Tian, Y., Viaroli, S., Andrews, C., Liu, J., & Zheng, C. (2021). Hydrogeological criteria to improve the sponge city strategy of China. *Front. Environ. Sci.*
- JVC. (2003). *Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad específica*. Obtenido de Centro de Cultura, Convenciones y Negocios Jorge Vergara Cabrera "Centro JVC".
- Khosravi, et al. (2018). A Comparison Study of DRASTIC Methods with Various Objective Methods for Groundwater Vulnerability Assessment. *Science of The Total Environment*, 1032-1049. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971832206X>
- López Geta, et al. (1997). Guía Operativa para la recogida, almacenamiento y transporte de muestras de aguas subterráneas destinadas al análisis químico y bacteriológico. En *Procedimiento de Muestreo* (págs. 6-22). Obtenido de Instituto Tecnológico Geominero de España .
- Mahlknecht, J., Hernández Antonio, A., Eastoe, C., Tamez Meléndez, C., Ledesma Ruiz, R., & Ramos Leal, J. (2017). Understanding the dynamics and contamination of an urban aquifer system using groundwater age (14C, 3H, CFCs) and chemistry. *Hydrological Processes*, 31, 2365-2380.

- Mahood, G. A. (Noviembre de 1981). A Summary of the Geology and Petrology of the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 86(B11), págs. 10137-10152.
- Maliva, R. G. (2016). Aquifer Characterization and Properties. En *Aquifer Characterization Techniques*. doi:doi:10.1007/978-3-319-32137-0\_1
- MARN. (2018). *Monitoreo de niveles piezométricos del agua subterránea año 2017*. Obtenido de Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Área metropolitana de San Salvador: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://rcc.marn.gob.sv/bitstream/handle/123456789/132/Informe\_niveles%20piezom%C3%A9tricos\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martos-Rosillo, et al. (2022). *Guía de buenas prácticas para el diseño, construcción, sellado y clausura de pozos de captación de agua subterránea*. Obtenido de Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Español: <https://www.aih-ge.org/guia-de-buenas-practicas-para-el-diseno-construccion-sellado-y-clausura-de-pozos-de-captacion-de-agua-subterranea/>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*. Bogotá.
- Ministerstwo Infrastruktury. (2023). *Rocznik hydrogeologiczny 2022*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.pgi.gov.pl/psh/materialy-informacyjne-psh/rocznik-hydrogeologiczny-psh/9663-rocznik-hydrogeologiczny-panstwowej-sluzby-hydrogeologicznej-2022/file.html
- Morán-Ramírez, et al. (2016). Rock–water interactions and pollution processes in the volcanic aquifer system of Guadalajara, Mexico, using inverse geochemical modeling. *Applied Geochemistry*, 79-94. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0883292716300506>
- Naciones Unidas. (2015). *17 objetivos para transformar nuestro mundo*. Obtenido de Objetivos de desarrollo sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- OMS. (diciembre de 2022). *Arsénico*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Oroji, B. (2018). Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC and GOD in the Asadabad plain. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 1809-1816. Obtenido de [http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol9/vol9\\_N6/201-JMES-3504-Oroji.pdf](http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol9/vol9_N6/201-JMES-3504-Oroji.pdf)
- Piscopo, G. (2001). *Groundwater vulnerability map explanatory notes*. Obtenido de NSW Government: [https://water.dpie.nsw.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0004/151762/Castlereagh-map-notes.pdf](https://water.dpie.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0004/151762/Castlereagh-map-notes.pdf)
- Porta, et al. (2019). *Edafología: uso y protección de suelos*. Mundiprensa. Obtenido de <https://www.mundiprensa.mx/catalogo/9788484767503/edafologia--uso-y-proteccion-de-suelos>

- Porta, J., & et al. (2019). *Edafología: uso y protección de suelos*. Mundiprensa. Obtenido de <https://www.mundiprensa.mx/catalogo/9788484767503/edafologia--uso-y-proteccion-de-suelos>
- Rizo-Decelis, L. D. (2017). *Consideraciones sobre la calidad del agua del río Santiago (México) y cartografía de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de su cuenca, para una adecuada gestión y planificación hidrológica*. Obtenido de <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/16434>
- Russell, C. A., & Stivers, J. W. (2020). Hydrogeologic Units, Contour Maps, and Cross Sections of the Boone and Roubidoux Aquifers, Northeastern Oklahoma, 2020. *Scientific Investigations Map 3452*.
- Sánchez Díaz, L. F. (2007). Origen, transporte, distribución y concentraciones los fluoruros en el sistema hidrogeológico volcánico Atemajac-Toluquilla, Jalisco, México. UNAM.
- Sánchez San Román, F. J. (enero de 2008). *Ley de Darcy. Conductividad hidráulica*. Obtenido de [https://hidrologia.usal.es/temas/Ley\\_Darcy.pdf](https://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf)
- Sander, L. (1998). *A manual of Field Hydrogeology*. Pretince-Hall.
- SEMARNAT. (1997). *Norma Oficial Mexicana NOM-003-CONAGUA-1996, Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos*. Obtenido de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4866103&fecha=03/02/1997#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4866103&fecha=03/02/1997#gsc.tab=0)
- SEMARNAT. (2000). 2. *VEGETACIÓN Y USO DE SUELO*. Obtenido de [https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/02\\_Vegetacion/2.1\\_Vegetacion/index.htm](https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/02_Vegetacion/2.1_Vegetacion/index.htm)
- Shirazi, et al. (2012). GIS-Based DRASTIC Method for Groundwater Vulnerability Assessment: A Review. *Journal of Risk Research*. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13669877.2012.686053?scroll=top&needAccess=true&role=tab&aria-labelledby=full-article>
- Silva, J. T., Estrada, F., Rodríguez, R., Ochoa, S., Villalpando, F., & Cruz, G. (2010). Vulnerabilidad acuífera como herramienta de política ambiental para la protección de manantiales en Michoacán, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.*
- Smith, L. &. (1993). Groundwater Flow. En D. R. Maidment, *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill.
- Smith, M., Cross, K., Paden, M., & Iavan, P. (2016). *Acuíferos: Gestión sostenible de las aguas subterráneas*. San José: UICN.
- SMN. (2021). *Información Estadística Climatológica*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

- Sukmawati, et al. (2019). Assessment of Groundwater Vulnerability Using GOD Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 477. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/477/1/012020/pdf>
- Taazzouzte, M. (2020). Study of Intrinsic Vulnerability to Pollution by the GOD-Foster Method: Application to Temara Groundwater (Morocco). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 129-145. Obtenido de [https://www.scirp.org/pdf/gep\\_2020082814434900.pdf](https://www.scirp.org/pdf/gep_2020082814434900.pdf)
- UNESCO. (2021). *Ciencia Ciudadana*. Obtenido de Mejorando los Servicios Climáticos para una Mejor Gestión del Agua: <https://es.unesco.org/climwar/citizen-science>
- UNESCO. (2022). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000382894?posInSet=4&queryId=47245bec-8d5a-4078-bb57-0e8ba263b07f>.
- UNESCO. (2022). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible*. Paris. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000382894?posInSet=4&queryId=47245bec-8d5a-4078-bb57-0e8ba263b07f>
- UNICEF. (2021). *Investing in Children as we Build a Next and Better Normal: Water Security For All. An investment opportunity for the private*. Obtenido de <https://www.unicef.org/media/95706/file/UNICEF-Investment-Case-Water-Security-For-All.pdf>
- US EPA. (2022). *Chemical Contaminant Rules*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/dwreginfo/chemical-contaminant-rules>
- Vanegas-Espinosa, et al. (2022). Flood Mitigation in Urban Areas through Deep Aquifer Recharge: The Case of the Metropolitan Area of Guadalajara. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1-14. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/ijerph19063160>
- Vanegas-Espinosa, et al. (2022). Flood Mitigation in Urban Areas through Deep Aquifer Recharge: The Case of the Metropolitan Area of Guadalajara. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1-14. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/ijerph19063160>
- Villalba-Murrieta, J. C., Murrieta-Galindo, R., & Palacios-Wassenaar, O. (2021). Áreas verdes urbanas e infiltración de agua como servicio ambiental en xalapa, veracruz, méxico. *RINDERESU*, 202-224. Obtenido de [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2022/12/Articulo\\_Areas-verdes-e-infiltracion-del-agua-en-Xalapa.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2022/12/Articulo_Areas-verdes-e-infiltracion-del-agua-en-Xalapa.pdf)
- WHO. (2022). *Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum*. doi:ISBN: 978-92-4-154995-0



**Anexos**

## ANEXO I. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

En esta sección, se presenta una descripción detallada del medio físico basada en las variables analizadas, procesadas y verificadas, de acuerdo con los resultados obtenidos a través de la metodología de delimitación de los sistemas hidrogeológicos, así como la identificación de zonas de vulnerabilidad y áreas de recarga de agua subterránea.

### 11.2.1.1. Características climáticas

La sección de características climáticas cuenta con varios subapartados, como lo son: tipo de clima (según la adaptación de Köppen modificado por García (1998), régimen de lluvias y distribución espacial, régimen de temperatura y distribución espacial, régimen de evaporación y distribución espacial, años tipo y finalmente la comparación entre la precipitación y temperatura media anual.

#### Tipo de clima

La República Mexicana es un país extenso con una diversidad de climas debido a su ubicación geográfica entre los océanos Atlántico y Pacífico, y su topografía montañosa. Estas características son barreras climáticas que dan lugar a distintas condiciones en la región. En el AMG, predominan dos tipos de clima. Según la adaptación de la clasificación de Köppen realizada por García (1998), la región se caracteriza por tener climas templados subhúmedos y templados subhúmedos. Las barreras climáticas importantes en esta zona incluyen la Sierra Madre Occidental, la Mesa del Centro y el Eje Neovolcánico, que limitan la penetración de la humedad del Océano Pacífico (García Amaro, 1998, re-edición 2004).

Se logran apreciar dos tipos de clima. De acuerdo con la modificación adaptada para México por García (1998) de la clasificación de Köppen, los climas que predominan en la región son el clima templado subhúmedo y templado subhúmedo. De acuerdo con el mapa de climas (véase Figura 88 y Tabla ), el tipo templado subhúmedo (en azul) predomina en toda el área de estudio y cálido subhúmedo (en rojo) se encuentran en la zona norte, en la barranca y cauce del río Santiago.

Tabla 19. Tipo de clima en el AMG, de acuerdo con modificación a la clasificación de Köppen adaptada para México (García, 1998)

Tipo de clima	Área (m <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Cálido subhúmedo	181,642,410.2	5.56%
Templado subhúmedo	3,083,810,753	94.44%
Total, general	3,265,453,164	100%

Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Los tipos de clima pasan por una transición al cambiar notablemente la altitud. De acuerdo con (García Amaro, 1998, re-edición 2004) el clima templado subhúmedo húmedo cuenta con lluvias todo el año y temperaturas entre los 18 °C y 22°C, se localiza a partir de los 400 y 1600 msnm. El clima subcálido húmedo presenta lluvias abundantes todo el año, con precipitación mayor a 60 mm en el mes más seco, y los subhúmedos presentan lluvias torrenciales en verano; la temperatura media anual en ambos es alrededor de 22°C y se localizan a partir de los 100 y 400 msnm.

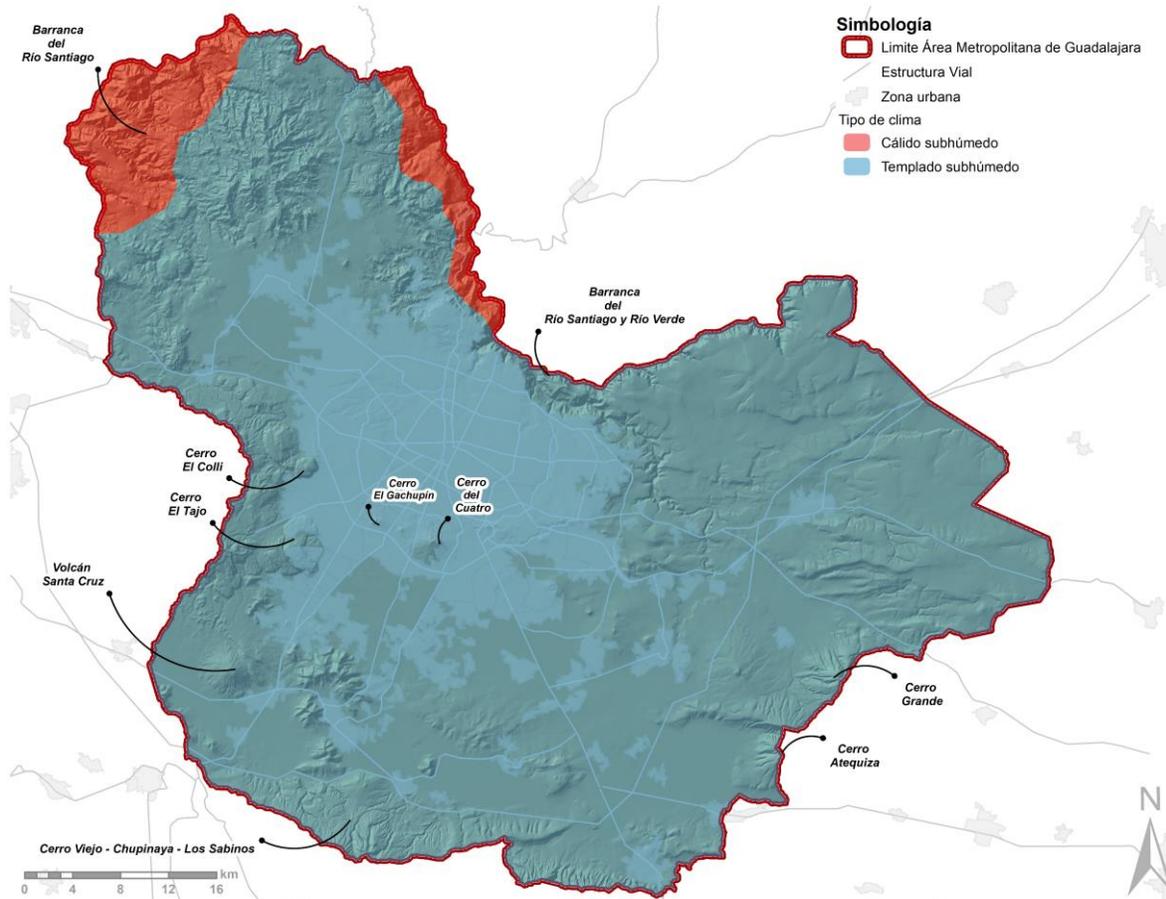
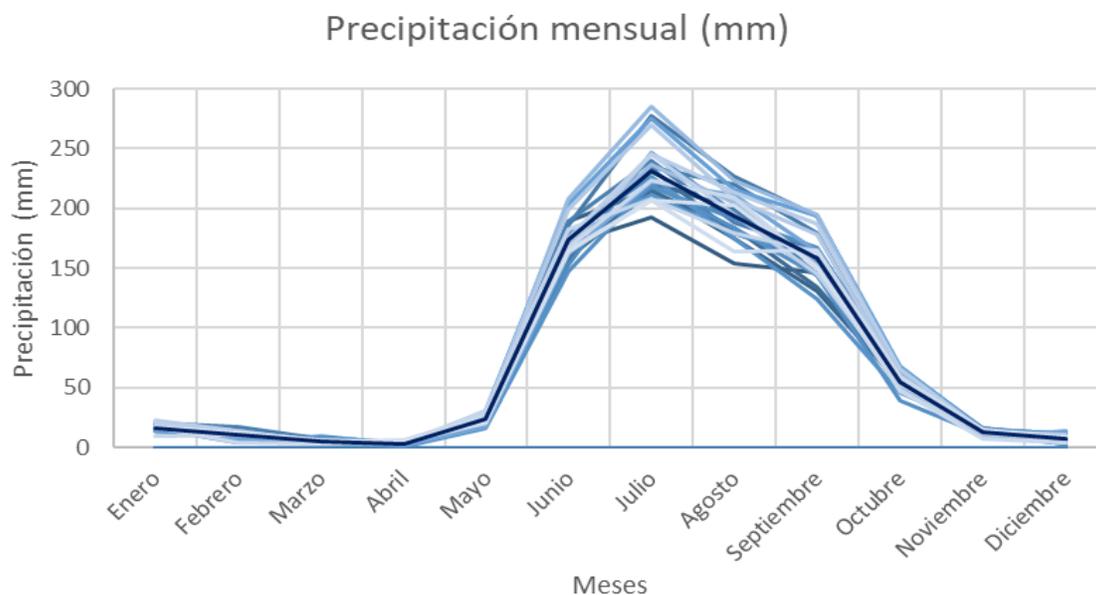


Figura 88. Mapa de tipos de clima en el AMG, de acuerdo con modificación a la clasificación de Köppen adaptada para México (García, 1998). Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

### Régimen de lluvias y distribución espacial

Para determinar el régimen de lluvias y su distribución espacial, se utilizaron las estaciones climatológicas operadas por el SMN, las cuales se encuentran disponibles para su descarga en diversas plataformas, como CONAGUA. Un análisis sencillo, con 24 estaciones de monitoreo, muestra que la precipitación media anual general es de aproximadamente 892 mm (el valor medio de las estaciones analizadas se encuentra representado por la línea azul en la Figura 89). Al observar únicamente el promedio de las estaciones (valor promedio anual), se destaca que la precipitación es considerablemente más intensa durante el periodo que abarca desde finales de mayo hasta mediados de octubre, mientras que es prácticamente nula en el resto del año.





*Figura 89. Precipitación media mensual en el AMG a partir de promedios anuales de las 24 estaciones meteorológicas consideradas para el AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.*

La Figura 90 muestra las isoyetas que se trazaron a partir de valores promedios de las 24 estaciones consideradas, con valores de precipitación media anual en el lapso de 1990-2019. La precipitación promedio va desde los 970 a 1,000 mm/año. La zona con mayor precipitación es el centro de Guadalajara y Zapopan, la cual se encuentra a 1,500-1,600 msnm, con un valor medio de 970 a 1,000 mm/año, en la parte sur y este del AMG llueve anualmente de 900 a 880 mm, en la zona noroeste del AMG, llueve alrededor de 880 a 920 mm/año.

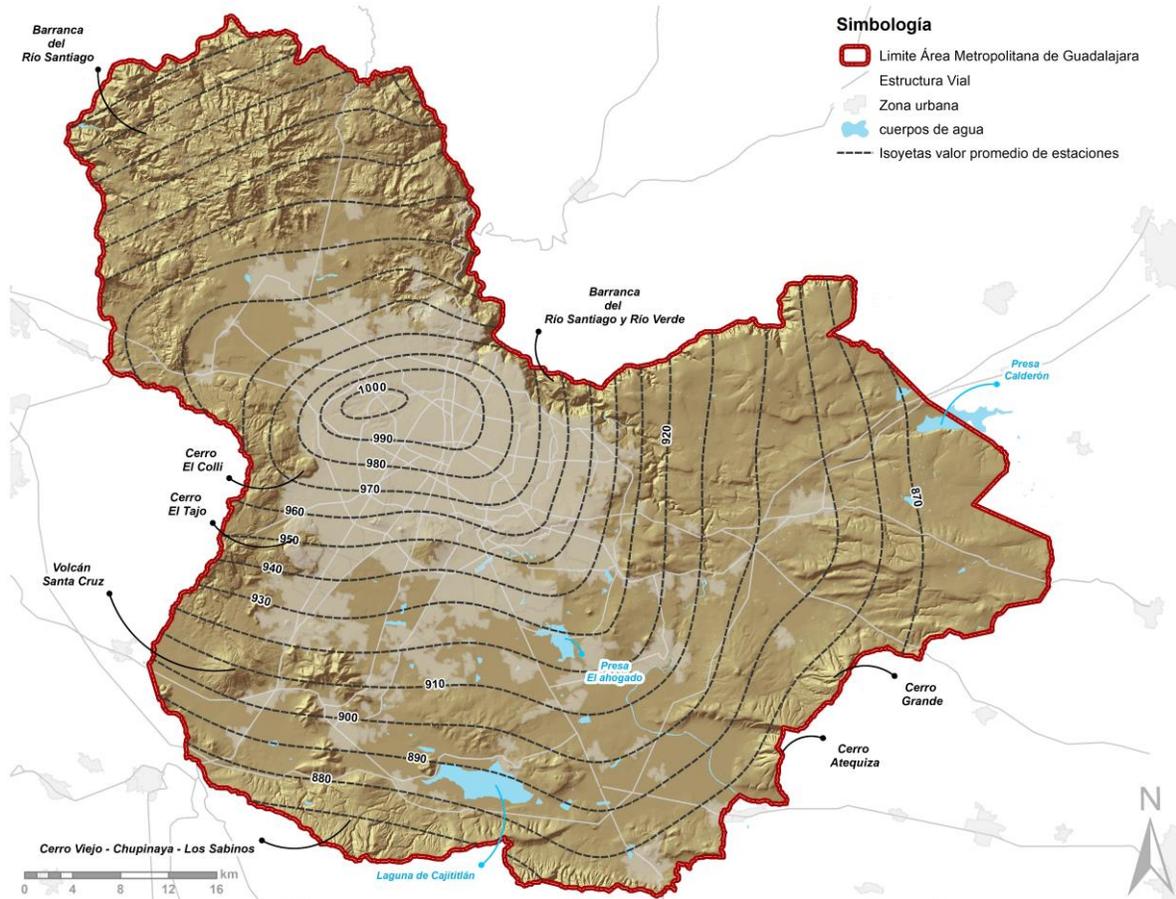


Figura 90. Mapa de isoyetas generadas a partir de promedios anuales de las 24 estaciones meteorológicas consideradas para el AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Se realizó un análisis comparativo entre la precipitación media anual y la altitud de las estaciones de monitoreo, del periodo de 1990-2019, donde se calculó el gradiente pluviométrico y se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson entre la altitud y la precipitación casi nulo (véase Figura 91). Por lo cual, no se puede decir que exista alguna relación entre la altitud y la precipitación recibida. Se considera que esto sucede debido a que la mayoría de las estaciones de monitoreo se encuentran en el AMG, entre 1,500 y 1,600 msnm, donde se observa un comportamiento bastante irregular con precipitación captada por cada estación.

La ecuación derivada para el gradiente pluviométrico carece de relevancia debido a que el coeficiente de correlación es pequeño, evidenciando una débil relación lineal entre la precipitación y la altitud. Esto podría atribuirse a las características climáticas y meteorológicas tan similares que caracterizan al AMG, donde múltiples estaciones están ubicadas a altitudes cercanas. Además, la falta de una distribución uniforme de estaciones meteorológicas en diversas áreas del área de estudio contribuye a este fenómeno, ya que las estaciones actuales no están equitativamente dispersas, lo cual puede influir en los resultados anticipados.

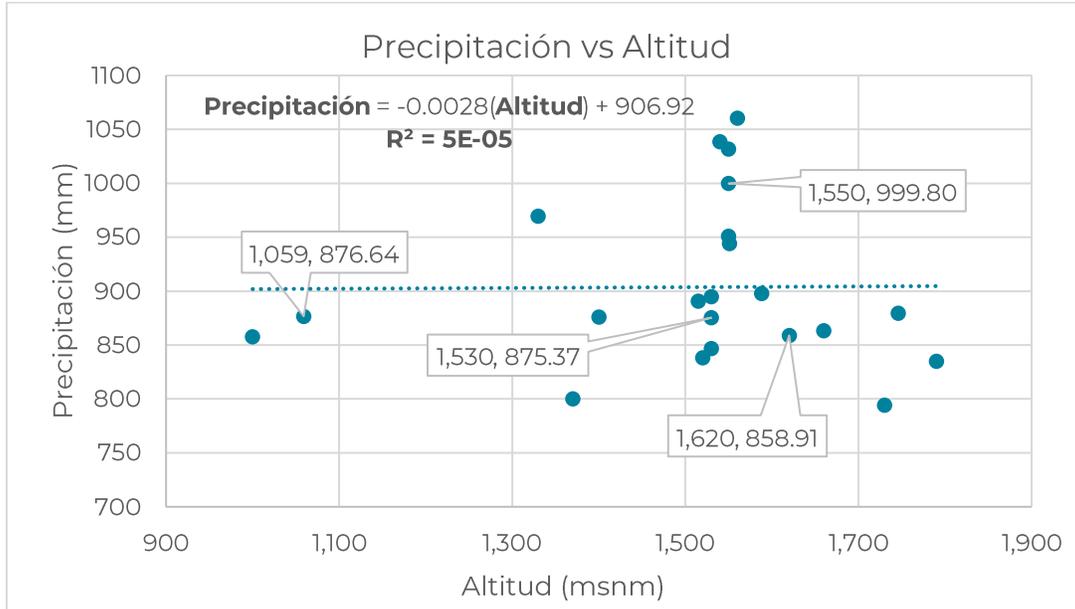


Figura 91. Gradiente pluviométrico del AMG con datos de precipitación media anual de las 24 estaciones consideradas en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

### Régimen de temperatura y distribución espacial

Para comprender el régimen de temperatura y su distribución espacial, se emplearon las estaciones climatológicas operadas por el SMN, accesibles a través de distintas plataformas como CONAGUA. Un análisis conciso basado en 24 estaciones de monitoreo indica que la temperatura media anual promedio se sitúa en 20.4°C (se puede seguir la línea roja en la Figura 92 para observar el valor medio de las estaciones analizadas). La temperatura es relativamente estable a lo largo del año, teniendo un ligero incremento en los meses de abril a junio, con un cambio significativo en julio, en el auge de la época de lluvias y una temporada baja de noviembre a febrero.

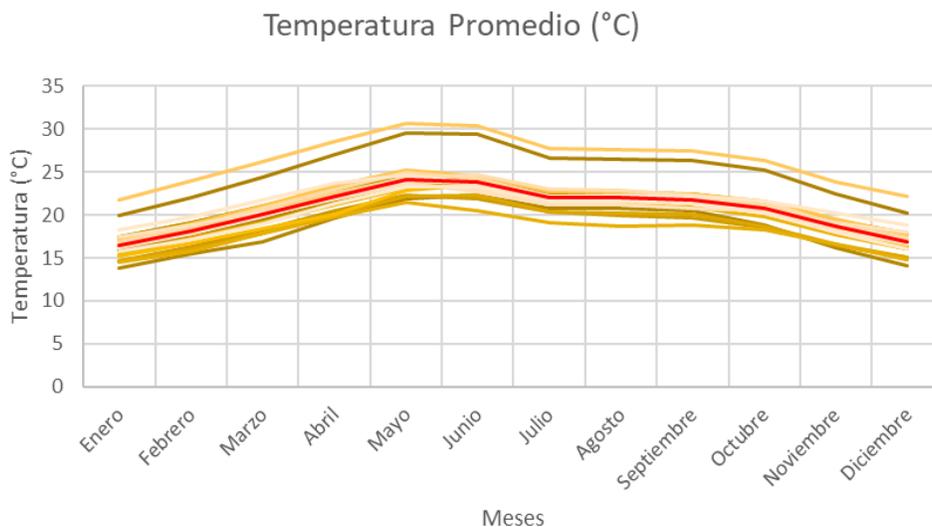


Figura 92. Temperatura media mensual en el AMG a partir de promedios anuales de las 24 estaciones meteorológicas consideradas para el AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Las isotermas fueron generadas utilizando el gradiente térmico calculado a partir de los valores promedios de las 24 estaciones consideradas, con valores de temperatura media anual de 1990 a 2019. Como se puede ver en la Figura 93, la temperatura promedio anual oscilan entre 12.5°C ya 29°C. Se destaca una elevación térmica en la zona norte y noroeste del AMG, donde los valores superan los 25°C, particularmente desde altitudes alrededor de 1,250 msnm n contraste, en la parte sur, sureste y oeste del AMG, las temperaturas se estiman entre 16 a 19 °C, correspondientes a las áreas más elevadas del AMG, situadas a altitudes superiores a 1,600 msnm.

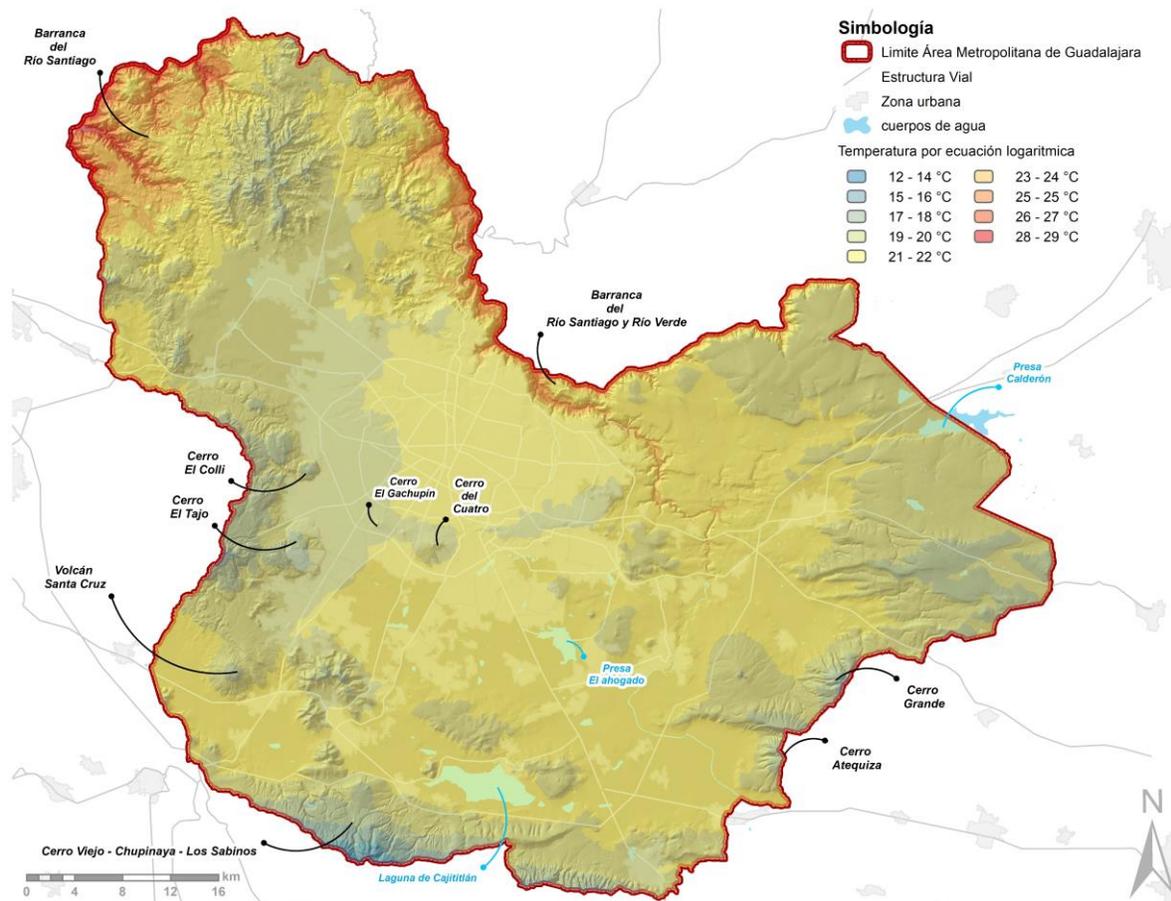


Figura 93. Mapa de isotermas generadas a partir de valores promedio anuales de las 24 estaciones meteorológicas consideradas para el AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Al llevar a cabo un análisis entre la temperatura media anual y la altitud, utilizando 24 estaciones para el periodo de 1990 a 2019, se calculó el gradiente termométrico. Los resultados muestran un coeficiente de correlación máximo de 0.799 entre la altitud y la temperatura, utilizando una ecuación logarítmica (véase Figura 94). Como se evidencia en la ecuación de regresión, ambas variables presentan una correlación logarítmica significativa. Esta relación exhibe una tendencia prácticamente inversa entre la temperatura y la altitud, lo que sugiere que, a mayor altitud, se espera una temperatura promedio menor.

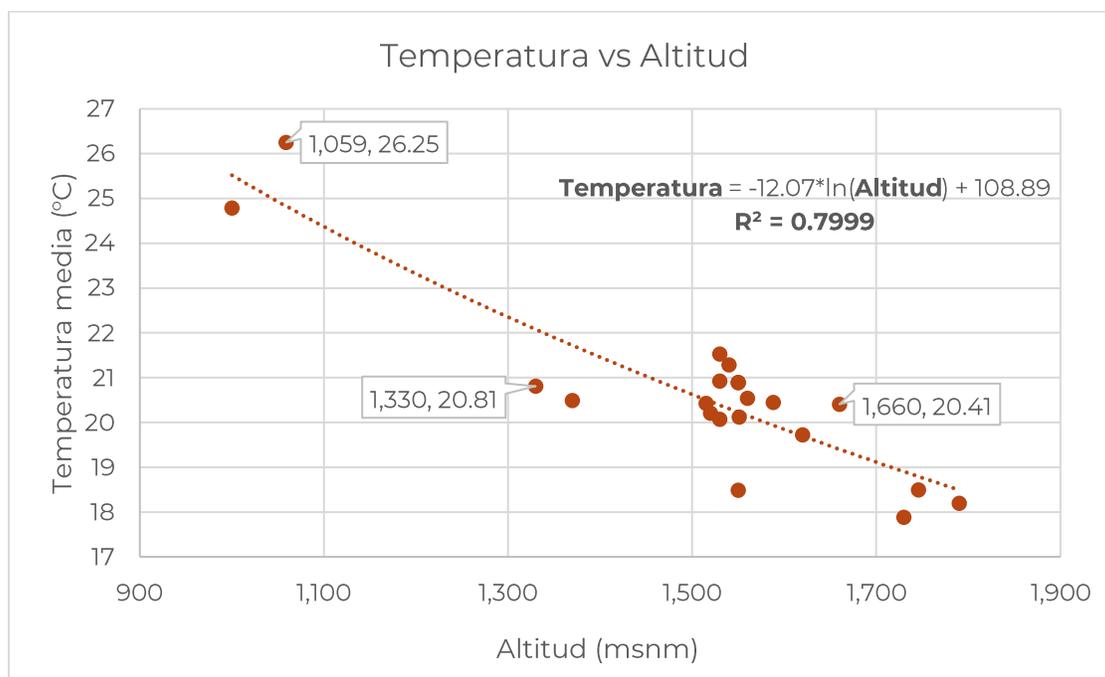


Figura 94. Valores de temperatura anual con respecto a la altitud del AMG, según las 24 estaciones consideradas desde 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

### Régimen de evaporación y distribución espacial

Para identificar el régimen de evaporación y su distribución espacial, se utilizaron las estaciones climatológicas operadas por el SMN y disponibles para su descarga en varios portales, como puede ser CONAGUA. Un análisis más detallado, con 20 estaciones de monitoreo, muestra que la evaporación anual en promedio es de 1,887 mm (se puede seguir la línea roja en la Figura 95 para observar el valor medio de las estaciones analizadas), siendo más relevante en el periodo de marzo a junio y se reduce cuando inicia el periodo de lluvias. Esto corresponde con el periodo de secas, ya que, al inicio de las lluvias intensas, la evaporación disminuye.

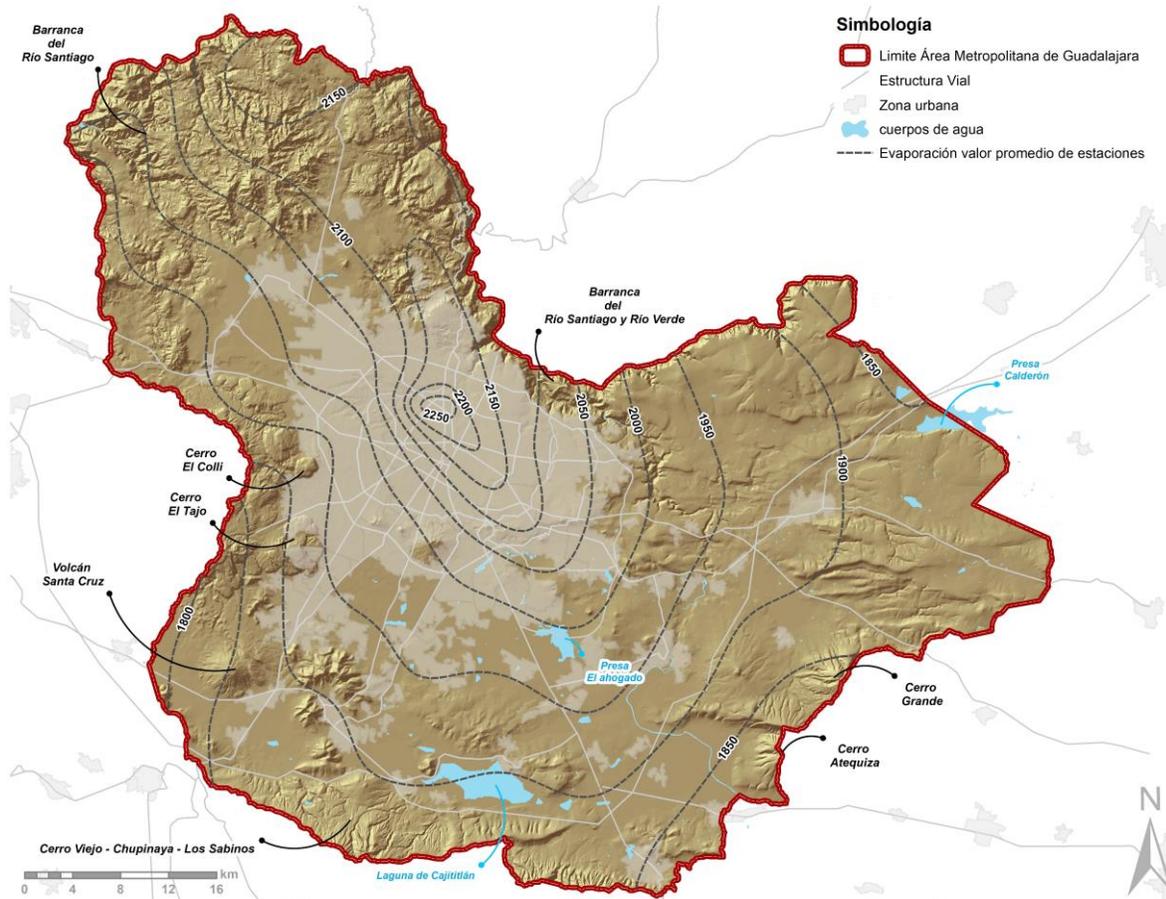


Figura 95. Evaporación media mensual en el AMG a partir de promedios anuales de las 20 estaciones meteorológicas consideradas para el AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Las líneas que representan la evaporación se generaron a partir de valores promedios de las 20 estaciones consideradas, abarcan el periodo de 1990-2019. La Figura 96 ilustra que la evaporación tiende a ser más intensa en las regiones norte y centro del AMG, presentando valores medios que oscilan entre 2,000 a 2,250 mm. En contraste, en la zona sur (de este a oeste) del AMG, se estima una evaporación de 1,900 a 1,800 mm.

## Evaporación mensual (mm)

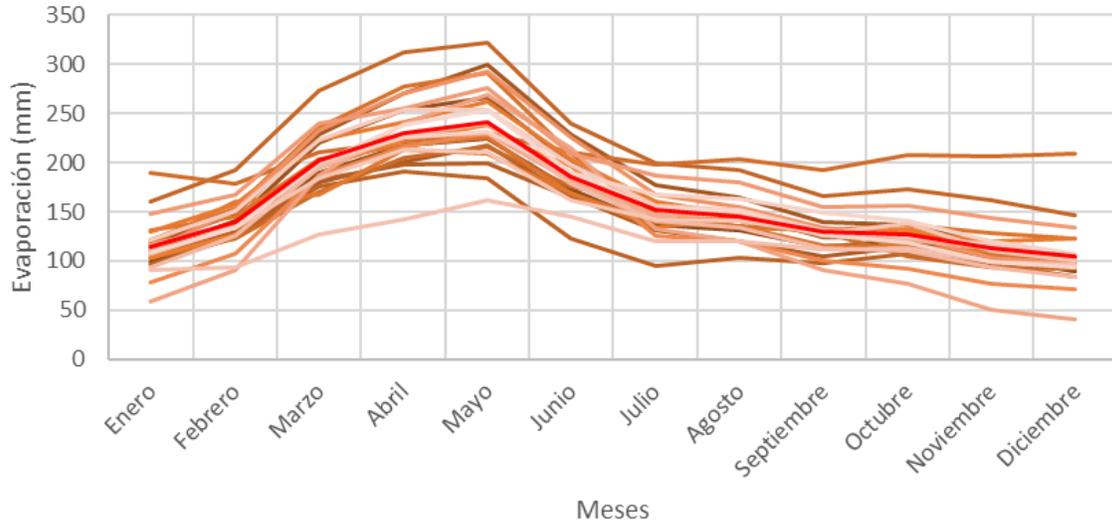


Figura 96. Mapa de isolíneas de evaporación generadas a partir de promedios anuales de las 20 estaciones meteorológicas consideradas para la evaporación del AMG, en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Al realizar un análisis similar entre la evaporación media anual y la altitud utilizando 24 estaciones durante el periodo de 1990 a 2019, se obtiene el gradiente de evaporación. Sin embargo, en este caso, el coeficiente de correlación entre la altitud y evaporación es casi nulo, registrando un valor de 0.05 (véase Figura 97). Es evidente en la ecuación de regresión que ambas variables presentan una correlación lineal baja.

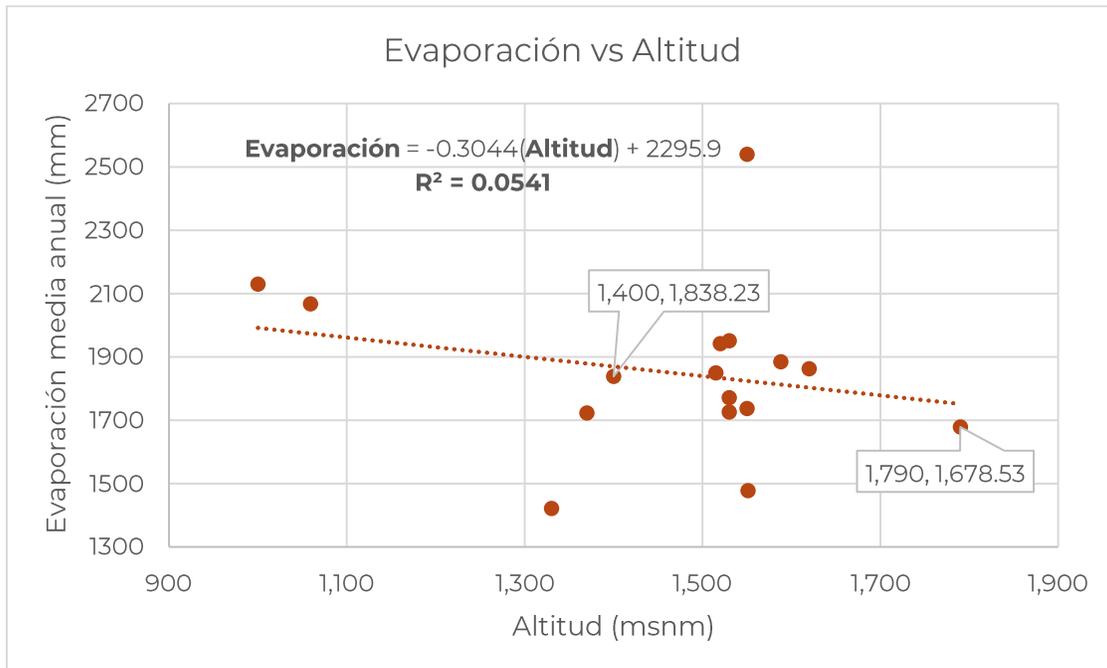


Figura 97. Valores de evaporación anual con respecto a la altitud del AMG, según las 24 estaciones consideradas desde 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

## Años Tipo

La información mensual de las 24 estaciones consideradas sirvió para obtener datos mensuales y anuales de precipitación y temperatura promedio (véase Tabla ). Estos valores sirvieron como base para seleccionar cada año tipo y generar mapas de isoyetas para el lapso de los 30 años y para cada año tipo en el AMG.

Tabla 20. Promedios medios anuales en el lapso de 1990-2019 en el AMG.

Distribución de tipos de suelo en el AMG				
Estación	Nombre	T <sub>media, AMG</sub> (°C)	P <sub>media, AMG</sub> (mm)	Evap <sub>media, AMG</sub> (mm)
14002	Acatlán De Juárez	20.49	800.20	1,723.09
14016	Atequiza	20.21	838.06	1,942.26
14038	Cuixtla	24.79	857.78	2,129.83
14039	Cuquío	18.19	834.99	1,678.53
14040	Chapala	20.92	875.37	1,726.18
14065	Guadalajara (Obs)	20.12	944.02	1,478.20
14066	Guadalajara (DGE)	20.89	1,031.78	2,539.71
14072	Huerta Vieja	18.48	950.80	1,719.06
14087	La Red	18.50	879.59	2,012.98
14090	La Yerbabuena	20.45	897.85	1,884.52
14104	Palo Verde	17.89	794.26	N/D
14111	Poncitlán	19.55	836.25	2,028.02
14113	Presa Hurtado	19.63	876.03	1,838.23
14132	Tlaquepaque	21.28	1,038.50	N/D
14136	Santa Rosa	26.25	876.64	2,067.72
14169	Zapopan	20.54	1,060.34	2,551.73
14171	Zapotlanejo (SMN)	20.43	890.80	1,849.68
14329	La Experiencia	20.89	999.80	1,736.62
14351	Tala	20.81	969.53	1,421.47
14379	Mezcala	20.07	894.96	1,771.20
14386	Tonalá	20.41	863.38	2,249.83
14388	Zapotlanejo (DGE)	20.19	867.44	1,988.15
14396	Piedra Barrenada	21.53	846.86	1,951.53
14397	Presa Calderón	19.72	858.91	1,862.83

Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Para llevar a cabo la clasificación de años tipo, se empleó como punto de partida el valor de precipitación media anual. Aquellos datos que excedían el 15% de dicha media se categorizaron como años húmedos, mientras que aquellos por debajo del 15% se etiquetaron como años secos. Para los años intermedios se consideraron los datos que caían entre ambos rangos. Los resultados de esta clasificación se basaron en el análisis de las 24 estaciones durante el período de 1990 a 2019, abarcando los 30 años de datos recopilados. Como resultado de este análisis, se obtuvo una precipitación media anual de 868 mm, ligeramente diferente al promedio obtenido mediante la

suma de las medias mensuales de las estaciones, que ascendía a 892 mm. Estos resultados se presentan en la Figura 98 y Tabla.

	AÑO HUMEDO	AÑO MEDIO	AÑO SECO
DESCRIPCIÓN	La precipitación sobrepasa en un 15% la precipitación media anual	Entre ambos márgenes (115% y 85%) de la precipitación media anual	La precipitación es inferior al 85% de la precipitación media anual
AÑO	1992	2006-2007	2011
PRECIPITACIÓN mm	1,146	849-878	689

Figura 98. Años tipo según el análisis de la estación pluviométrica del AMG a partir de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Tabla 21. Valores de las estaciones de años tipo húmedo, secos y medios.

Año	Media	Valores húmedos		Valores secos		Valores medios	
		# estaciones	%	# estaciones	%	# estaciones	%
1990	986.95	11	46%	1	4%	12	50%
1991	815.74	3	13%	7	29%	14	58%
1992	1,145.75	20	83%	0	0%	4	17%
1993	760.47	2	8%	8	33%	14	58%
1994	789.18	1	4%	5	21%	18	75%
1995	747.24	0	0%	8	33%	16	67%
1996	790.01	2	8%	7	29%	15	63%
1997	881.98	6	25%	1	4%	17	71%
1998	906.46	8	33%	3	13%	13	54%
1999	725.78	1	4%	8	33%	15	63%
2000	715.85	0	0%	12	50%	12	50%
2001	733.73	1	4%	10	42%	13	54%
2002	915.79	7	29%	3	13%	14	58%
2003	918.46	6	25%	3	13%	15	63%
2004	1,093.19	16	67%	0	0%	8	33%
2005	765.04	1	4%	8	33%	15	63%
2006	876.20	3	13%	2	8%	19	79%
2007	877.68	3	13%	3	13%	18	75%
2008	1,032.31	15	63%	0	0%	9	38%
2009	776.77	1	4%	8	33%	15	63%
2010	1,070.94	17	71%	0	0%	7	29%
2011	689.01	0	0%	15	63%	9	38%
2012	800.96	3	13%	9	38%	12	50%
2013	897.28	11	46%	3	13%	10	42%

Año	Media	Valores húmedos		Valores secos		Valores medios	
		# estaciones	%	# estaciones	%	# estaciones	%
2014	889.40	3	13%	3	13%	18	75%
2015	1,030.02	14	58%	0	0%	10	42%
2016	991.36	13	54%	1	4%	10	42%
2017	819.23	2	8%	4	17%	18	75%
2018	1,071.40	13	54%	0	0%	11	46%
2019	779.21	4	17%	9	38%	11	46%

Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Con lo anterior, se presenta la Figura 99, para observar el comportamiento histórico de la precipitación.

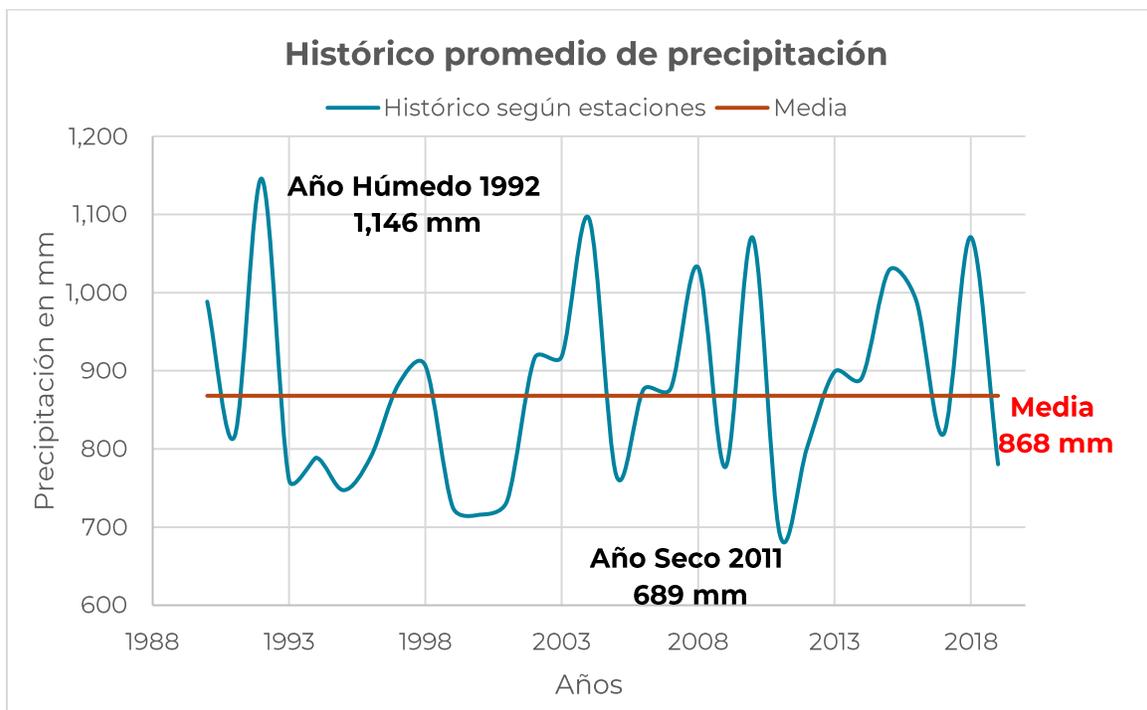


Figura 99. Comportamiento histórico de la precipitación en el AMG según las 24 estaciones de monitoreo en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

A partir de la determinación de los años tipo, se realizaron los mapas de isoyetas correspondientes. Como se puede observar en las Figura 100, Figura 101 y Figura 102, el mapa de cada año tipo tienen un comportamiento similar, ya que la mayor precipitación se concentra en la zona centro de Guadalajara, ligeramente cargado a Zapopan. El año húmedo tiene como valor máximo 1,250 mm/año y como valor mínimo 1,000 mm/año, como se observa en los extremos suroeste y noroeste del AMG a partir de los 1,600 msnm a 700 msnm respectivamente. El año medio tiene un valor máximo de 970 mm/año y un valor mínimo 750 mm/año y se concentra en el centro de Guadalajara, con una altitud de 1,550 msnm. En las zonas del sur y este la precipitación va desde los 830 a 930 mm/año. En el norte de Zapopan se puede observar que la precipitación cuenta con los valores más bajos de 750 a 880 mm/año. El año seco tiene como valor máximo 850 mm/año y como valor mínimo 580 mm/año y se concentra en el centro de Guadalajara y la zona oeste, donde hay rangos de

altitudes de 1,550 a 2,200 msnm. En la zona noroeste y este la precipitación se reduce de 670 a 600 mm/año.

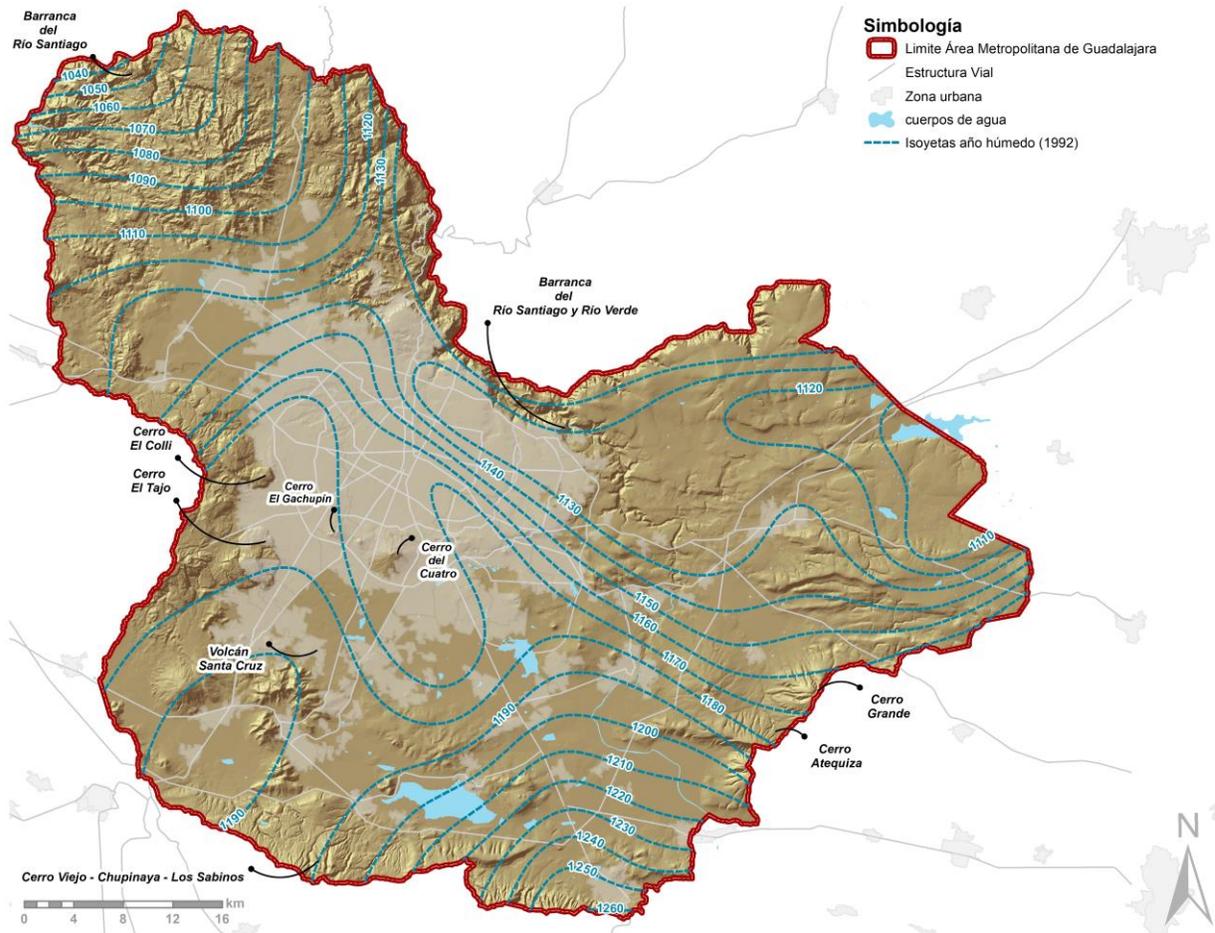


Figura 100. Mapa de isoyetas generadas a partir de promedios anuales de estaciones consideradas para el año húmedo (1992) en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

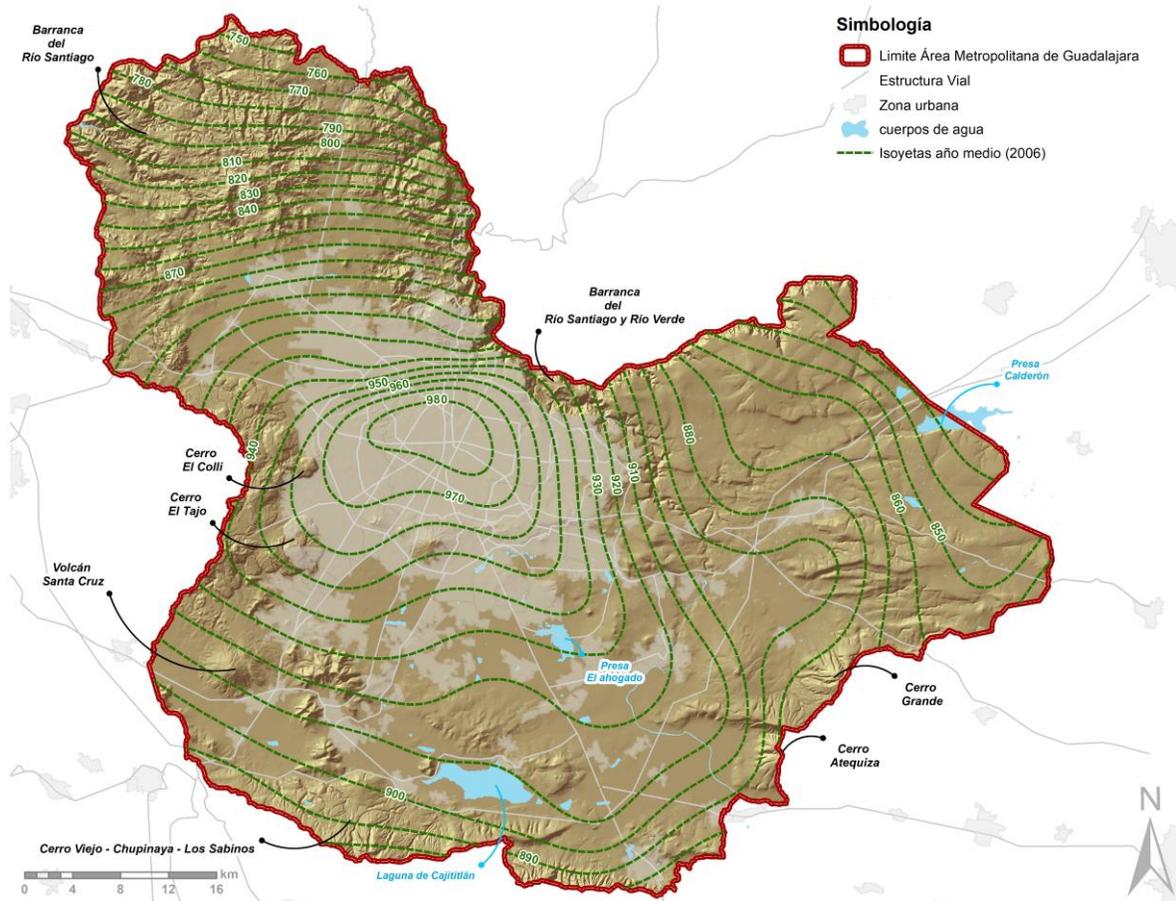


Figura 101. Mapa de isoyetas generadas a partir de promedios anuales de estaciones consideradas para el año medio (2006) en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

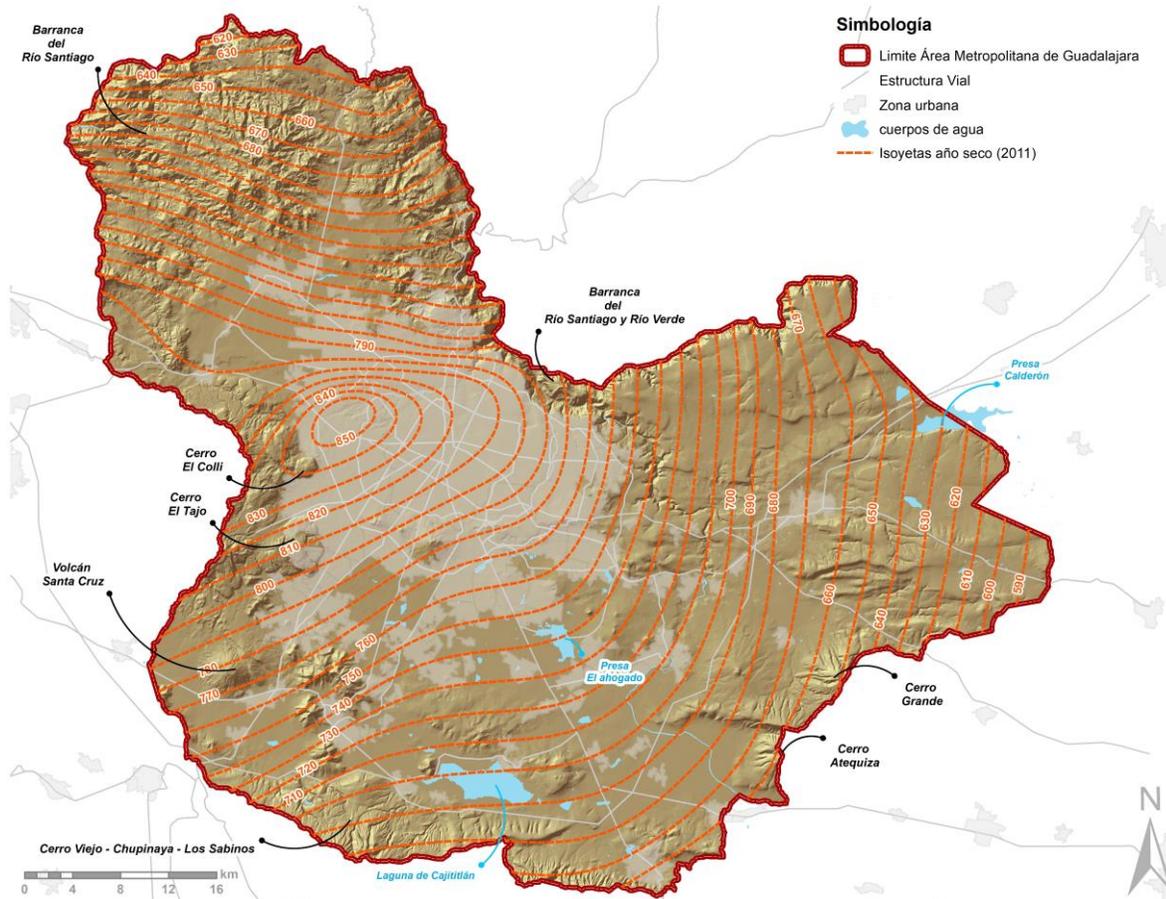


Figura 102. Mapa de isoyetas generadas a partir de promedios anuales de estaciones consideradas para el año seco (2011) en el periodo de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

### Comparación entre la precipitación y temperatura media anual

La Figura 103 muestra el histórico mensual o climograma<sup>19</sup> del AMG, el cual permite identificar los períodos húmedos y secos durante el año, relacionando la temperatura y la precipitación. En el gráfico, se representan los valores medios mensuales de las 24 estaciones para precipitación (color azul) y 24 para temperatura (color rojo), en dos ejes con rangos diferentes. El área entre ambas curvas representa la intensidad y duración del periodo húmedo y de estiaje. De acuerdo con los valores medios de las estaciones consideradas, se puede observar que la temperatura media mensual es relativamente estable. Respecto a la precipitación se puede ver un gran incremento en los meses de junio a octubre, con un pico en julio y agosto. Por la distribución de la temperatura y la precipitación, se puede asegurar que el periodo de estiaje es de mediados de octubre a mayo finales de mayo y su duración aproximada es de siete meses (ya que la precipitación es menor a la temperatura media), mientras que el periodo húmedo es desde finales de mayo a principios de octubre y su duración aproximada es de cinco meses (ya que la precipitación es mayor a la temperatura media).

<sup>19</sup> Un climograma muestra la relación entre la temperatura y la precipitación de un lugar, graficando los valores mensuales donde la precipitación está al doble de la escala de la temperatura.

### Climograma del AMG

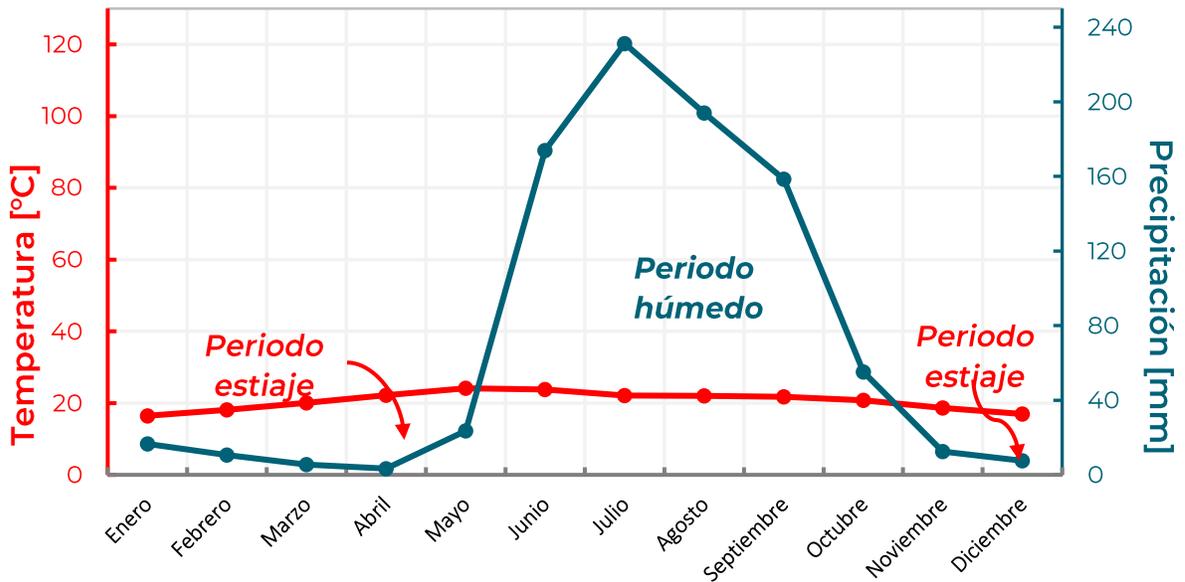


Figura 103. Climograma del AMG, elaborado a partir de datos mensuales de temperatura y precipitación, en las 24 estaciones consideradas a partir de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

En la Figura 104 se integran los valores de la evaporación mensual (color gris), con datos de 20 estaciones para visualizar su comportamiento junto con las otras variables, temperatura (color rojo) precipitación (color azul). De esta forma se puede observar que el valor de la evaporación disminuye en época de lluvias, sin embargo, el resto del año es mayor a la precipitación.

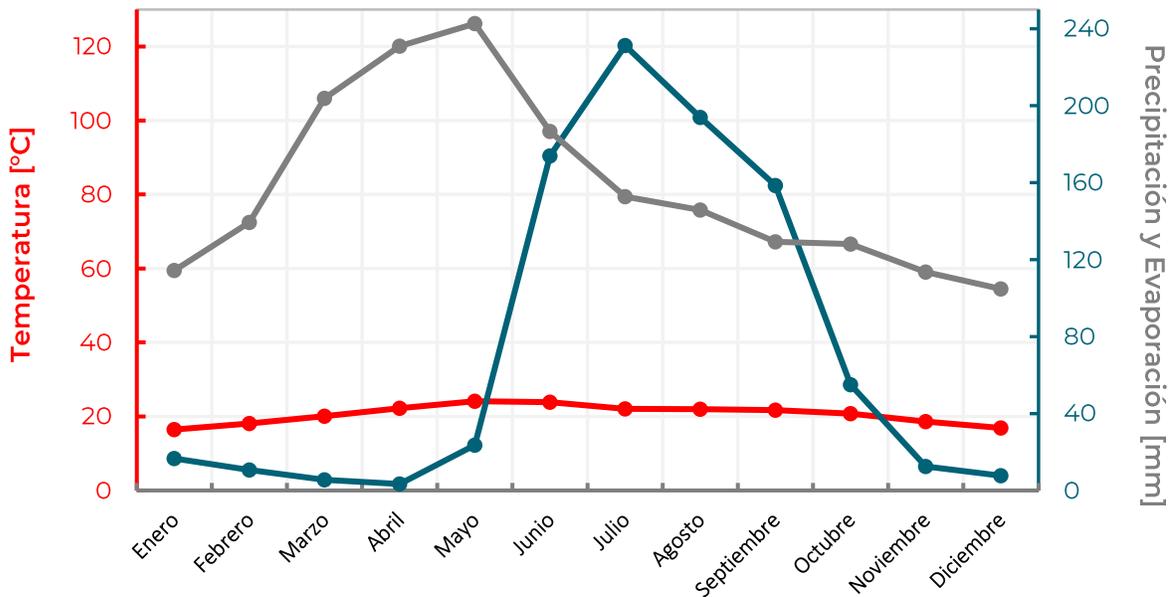


Figura 104. Climograma complementario del AMG, elaborado a partir de datos mensuales de temperatura, precipitación y evaporación, en las estaciones consideradas a partir de 1990-2019. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.



### 11.2.1.2. Topografía

Jalisco se encuentra en una ubicación geográfica única, en la convergencia de tres importantes cordilleras del país: Sierra Madre Occidental, Sistema Neovolcánico o Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. Esta particularidad da lugar a una gran diversidad de aspectos litológicos, geológicos y morfológicos en el territorio, resultando en una variada gama de paisajes naturales. En el centro del Estado, se aprecia una región de compartimentos, con montañas volcánicas o bloques montañosos, así como valles o llanos de menor extensión, como los de Atemajac, Tesistán y Ameca-Cocula (Barrera Rodríguez & Zaragoza Vargas, 2003).

El AMG, al ubicarse en el Eje Neovolcánico Transversal, cuenta con diversas formaciones orográficas como montañas, cerros, antiguas calderas y barrancas (véase Figura 105). La provincia fisiográfica de interés es el Eje Neovolcánico y una pequeña parte del sur de la Sierra Madre Occidental. El AMG converge en tres subprovincias: Guadalajara, Chapala, Altos de Jalisco, y finalmente concurre ligeramente con la subprovincia Sierra y Valles de Zacatecas de la provincia Sierra Madre Occidental.

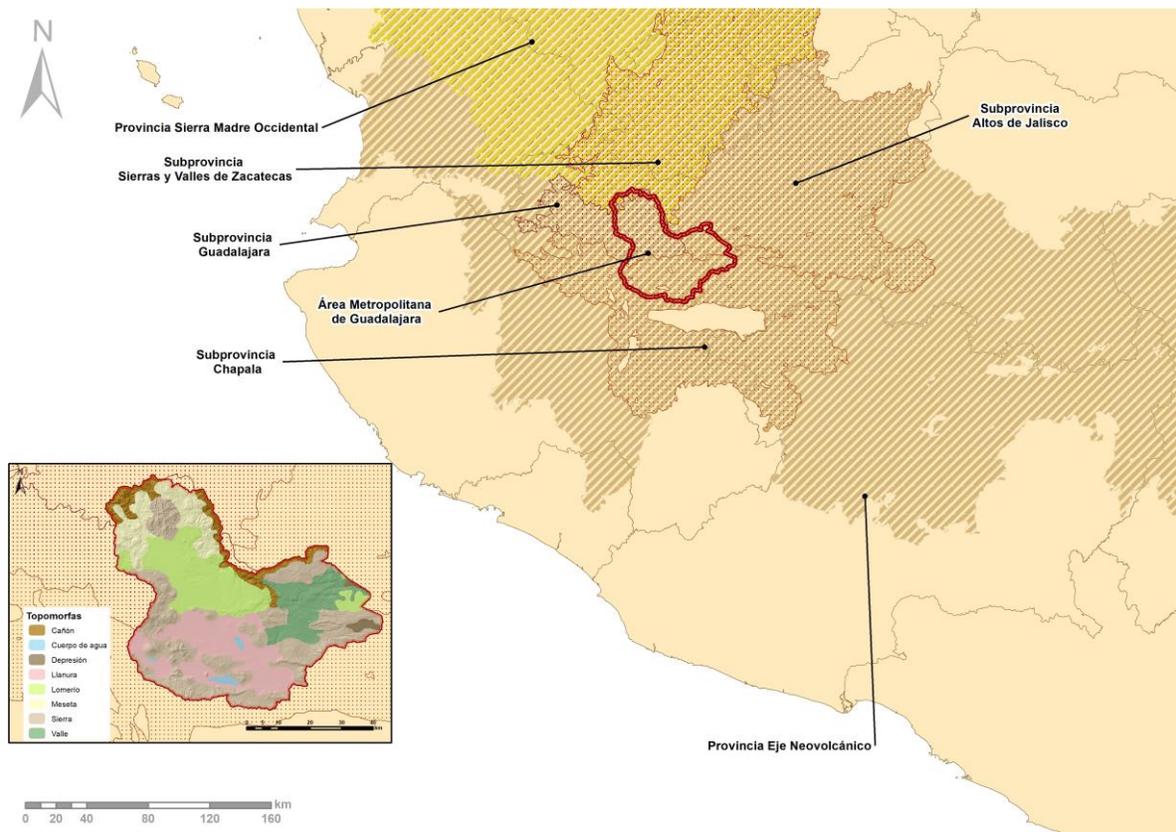


Figura 105. Mapa de las provincias y subprovincias fisiográficas del AMG

El punto de mayor altitud del AMG se encuentra a 2,950 msnm<sup>20</sup>, en Cerro Viejo, y el de menor altitud, al nivel del Río Santiago a 740 msnm (véase Figura 106).

<sup>20</sup> Msnm: Metros sobre el nivel del mar.

El histograma de frecuencias de altitudes mostró que la clase que predomina está entre 1,500 y 1,600 msnm, abarcando el 55% del área total y se encuentra principalmente en la zona del centro. El 6.2% del territorio de la cuenca está por debajo de 1,000 msnm y se sitúa en el curso del río Santiago. Solo el 0.28% está por encima de 2,500 msnm y se ubica en La Primavera y Cerro Viejo.

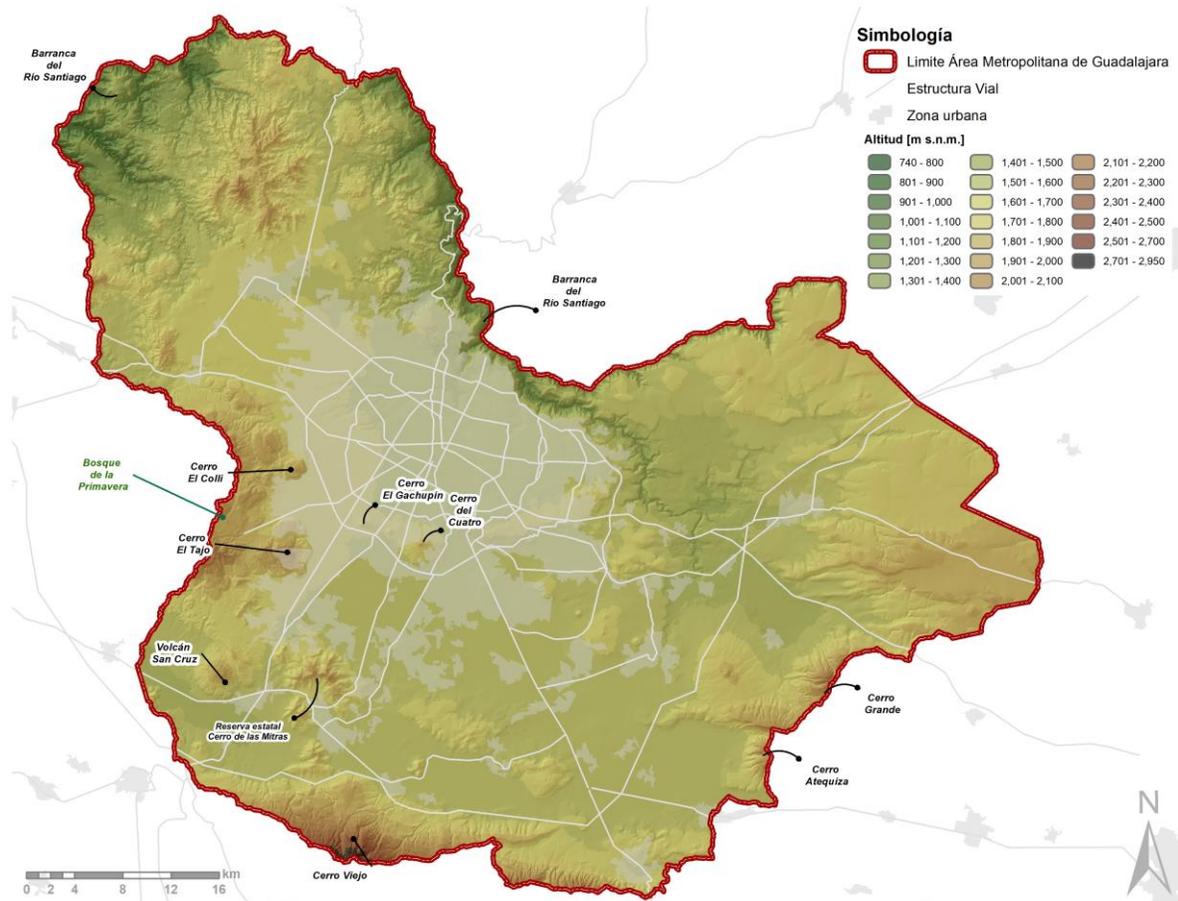


Figura 106. Mapa hipsométrico en el AMG. Fuente: Elaboración propia a partir de curvas de nivel cada 10 m de INEGI.

Como se mencionó anteriormente, la zona presenta cambios abruptos en su elevación, con una diferencia de más de 2,210 metros entre las cotas máxima y mínima. Este pronunciado desnivel puede estar relacionado con un clima variable.

En el AMG se tienen pendientes de más de más del 15°. Sin embargo, la pendiente predominante es casi plana, es decir, menor a 3°, como se observa en la Figura 107. Las pendientes más abruptas se localizan en la zona montañosa del área de estudio, al igual que en la zona de barrancas, donde sigue su cauce el río Santiago.

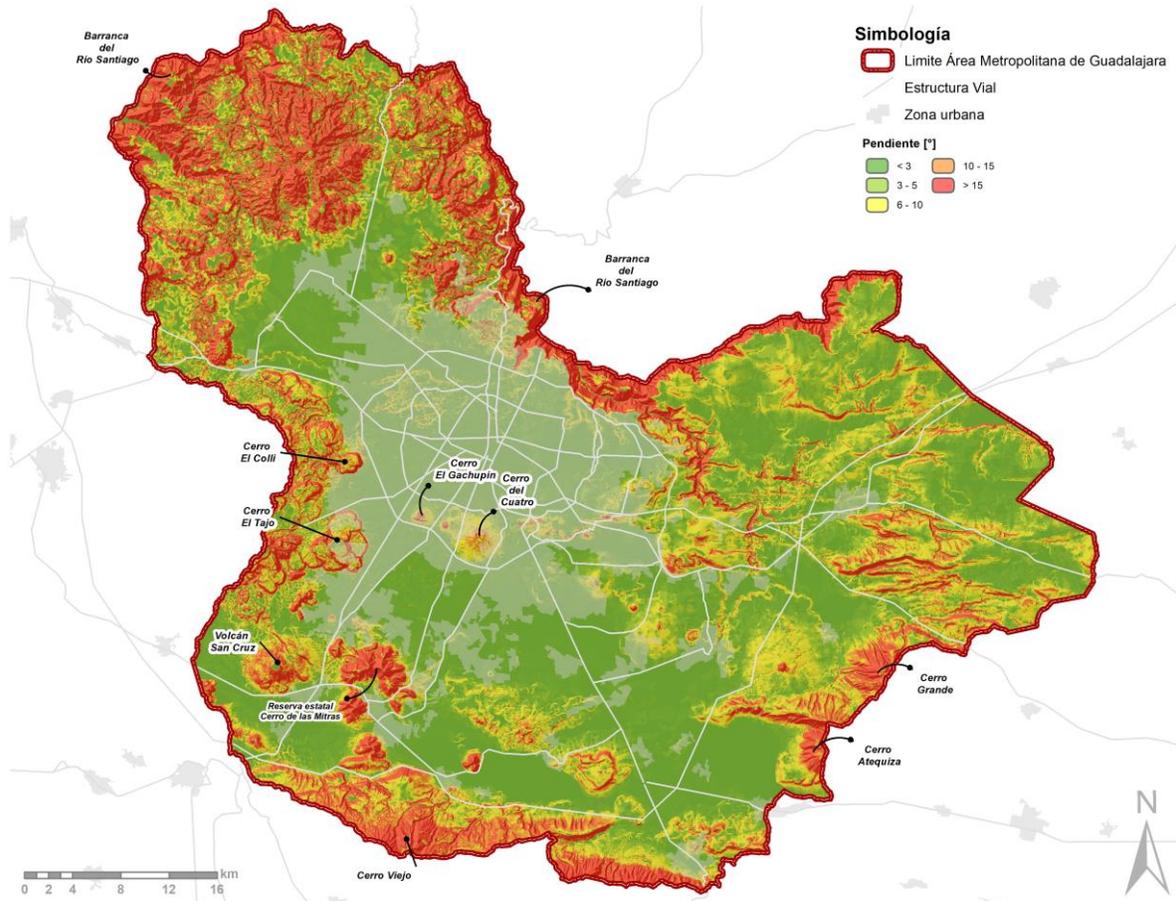


Figura 107. Mapa de pendientes del AMG. Fuente: Elaboración propia a partir de curvas de nivel cada 10 m de INEGI.

### 11.2.1.3. Geología

A escala regional, el área de estudio se localiza en el sector occidental de la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), provincia que se caracteriza por una serie de planicies y mesetas escalonadas delimitadas por fallas, estructuras caldéricas, domos y aparatos volcánicos. Entre los eventos volcánicos destaca el emplazamiento y desarrollo del Complejo Volcánico La Primavera (CVLP), que propició la formación de la caldera de La Primavera. Esta consta de una estructura semicircular de cerca de 11 km de diámetro, donde se emplazaron una serie de domos y flujos de lava, acompañados con eventos explosivos y extrusión de materiales piroclásticos, que dieron origen a la Toba Tala (Mahood, 1981).

El AMG cuenta con varias estructuras geológicas, como la montaña granítica mixta, que contiene mezclas de rocas sedimentarias marinas y volcánicas (e.g., Sierra de Ameca); montaña volcánica ácida moderna, formada por lavas y tobas ácidas (e.g., mayoría de la Sierra de la Primavera); montaña de bloques basálticos, mayormente compuesta por basaltos provenientes de erupciones modernas (e.g., Sierra de Los Guajolotes); planicie pedemontana piroclástica, compuesta por depósitos de toba tala (e.g., región al sur de la Primavera); y montaña riolítica, correspondiente a

rocas ácidas de origen volcánico (e.g., Sierra de Tesistán) (Barrera Rodríguez & Zaragoza Vargas, 2003).

## Tipos de rocas

El AMG tiene una litología heterogénea, como se observa en la Figura 108. Las principales estructuras litológicas encontradas en los 3,265 km<sup>2</sup> del AMG son Toba Tala y Basaltos, que representan el 35.11% y 30.43% de la superficie, respectivamente. Después le siguen rocas Extrusivas ácidas (13.09%), formaciones Aluviales (10.09%), suelos Residuales (3.58%), Riolitas (2.13%), Andesitas (2.06%), rocas Vítreas (1.60%), Brechas volcánicas (0.82%), rocas Extrusivas básicas (0.63%), Areniscas (0.54%) y una pequeña parte de conglomerados (0.01%).

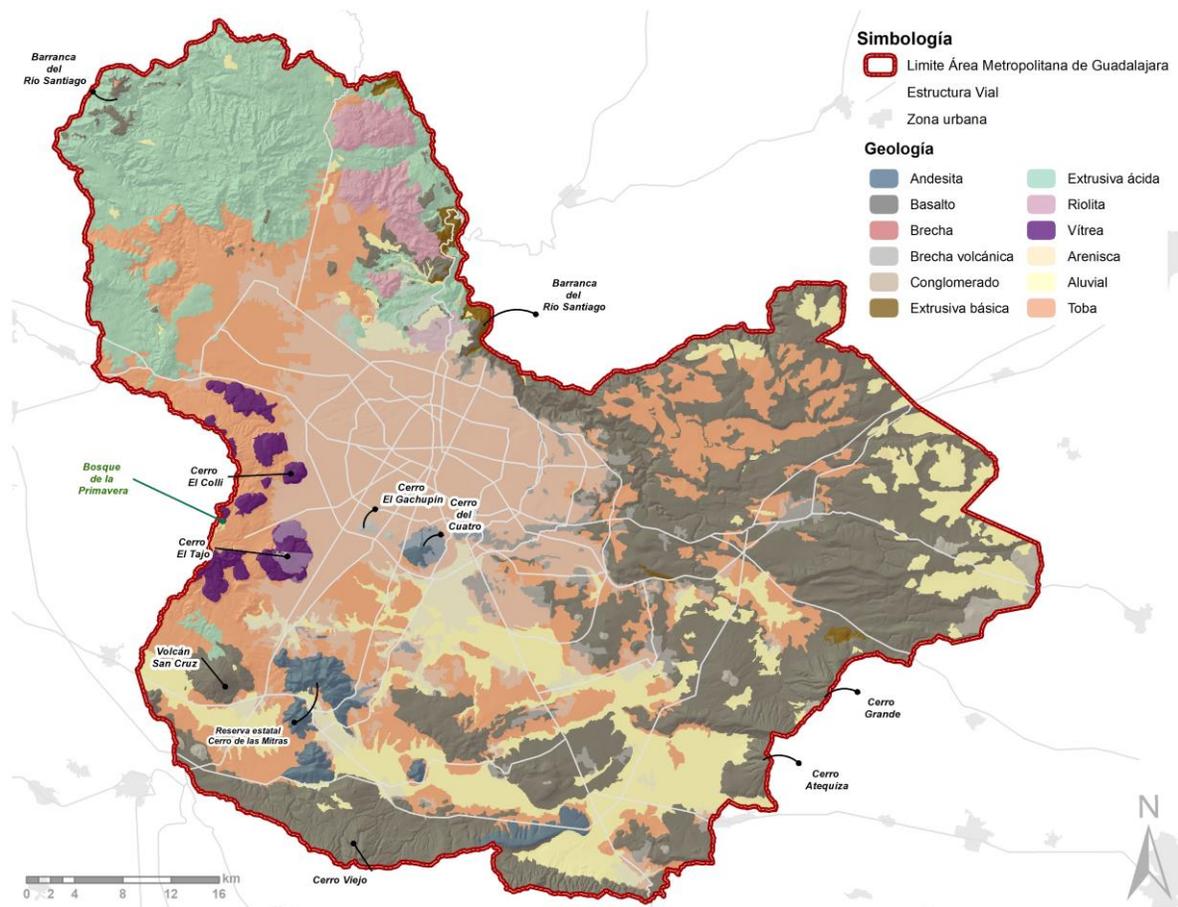


Figura 108. Geología de la cuenca del AMG. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C, a partir de información de IIEG (2016).

## Fracturamiento y estructura

Dentro del polígono del AMG se tiene registro, según la información de IIEG (2016), de la presencia de 446 fallas, fracturas y diques geológicos. La mayoría de estas se pueden encontrar en la región norte de Zapopan, conformada mayormente de rocas extrusivas ácidas con pendientes mayores a 10°; así como al sur de Tlajomulco de Zúñiga e Ixtlahuacán de los Membrillos, en la Sierra de Cerro Viejo – Chupinaya – Los Sabinos, y en gran parte de Zapotlanejo y Juanacatlán, ambas regiones

conformadas en su mayoría por rocas basálticas. Cabe recalcar que en estas últimas zonas de basaltos es donde se encuentran la mayor cantidad de aparatos volcánicos (véase Figura 109).

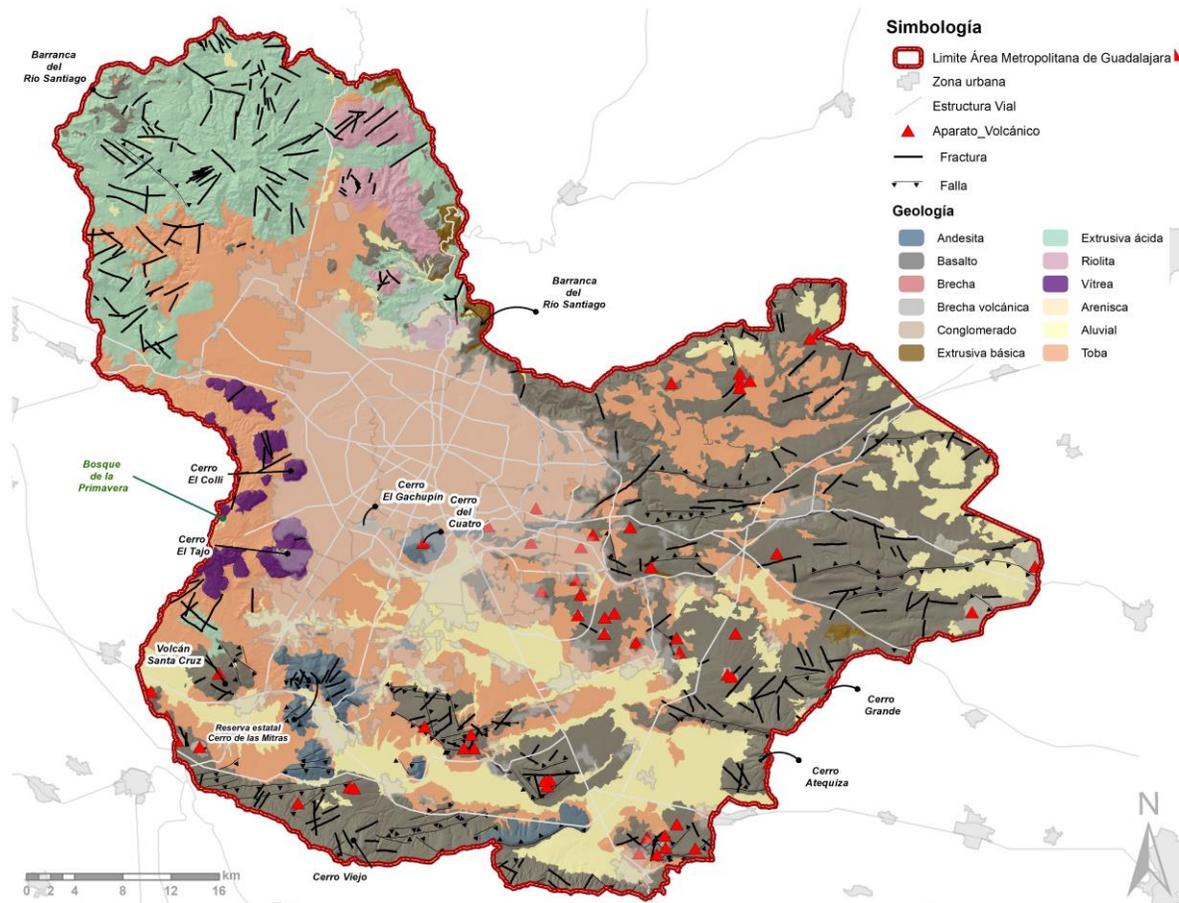


Figura 109. Fallas, fracturas y vulcanismos. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C, a partir de IIEG (2016).

## Estratigrafía/Perfiles

Por estratigrafía es la ciencia que se encarga del estudio de las secuencias verticales y horizontales de las rocas en una región específica, así como de su correlación y determinación cronológica (SGM, 2017). Este enfoque permite describir las unidades estratigráficas del área de estudio, identificando las edades y provincias fisiográficas a las que pertenece cada estrato de roca (Rizo-Decelis, 2017).

El AMG, se encuentran diversas capas de rocas, principalmente de origen volcánico, que datan del Cuaternario y Neógeno. Estas incluyen compuestos silíceos, cenizas, lavas, tobas, basaltos, rocas piroclásticas, andesitas, brechas volcánicas y granitos. Sin embargo, estudios detallados han revelado una división estratigráfica clara entre dos grupos de rocas debajo de la ciudad. El primero, formado principalmente de Toba Tala (mezcla de cenizas volcánicas y domos riolíticos) y otros sedimentos aluviales y lacustres, se encuentra en contacto con la superficie y alcanza los 400 m de espesor. Por su parte, el perfil inferior está conformado, en su mayoría, por andesitas, Riolitas y basaltos, todos ellos con fracturas y consolidación; y cuenta con un espesor que supera los 700 m en algunas partes. Además, se han encontrado otras características en cada uno de estos estratos,

como la conductividad hidráulica y el tipo de agua que tienen, ya que el perfil superior tiene una permeabilidad más alta que el inferior, así como agua subterránea más fría, debido a que el estrato inferior tiene flujos regionales termales. Finalmente, se ha estudiado que entre ambos estratos hay zonas de conexión, generadas por diversas fallas y fracturas (Hernández-Antonio, et al., 2015; Morán-Ramírez, et al., 2016; Rizo-Decelis, 2017; GEOEX, 2003). Las siguientes figuras muestran la representación de la estratigrafía mencionada (véase Figura 110 y Figura 111).

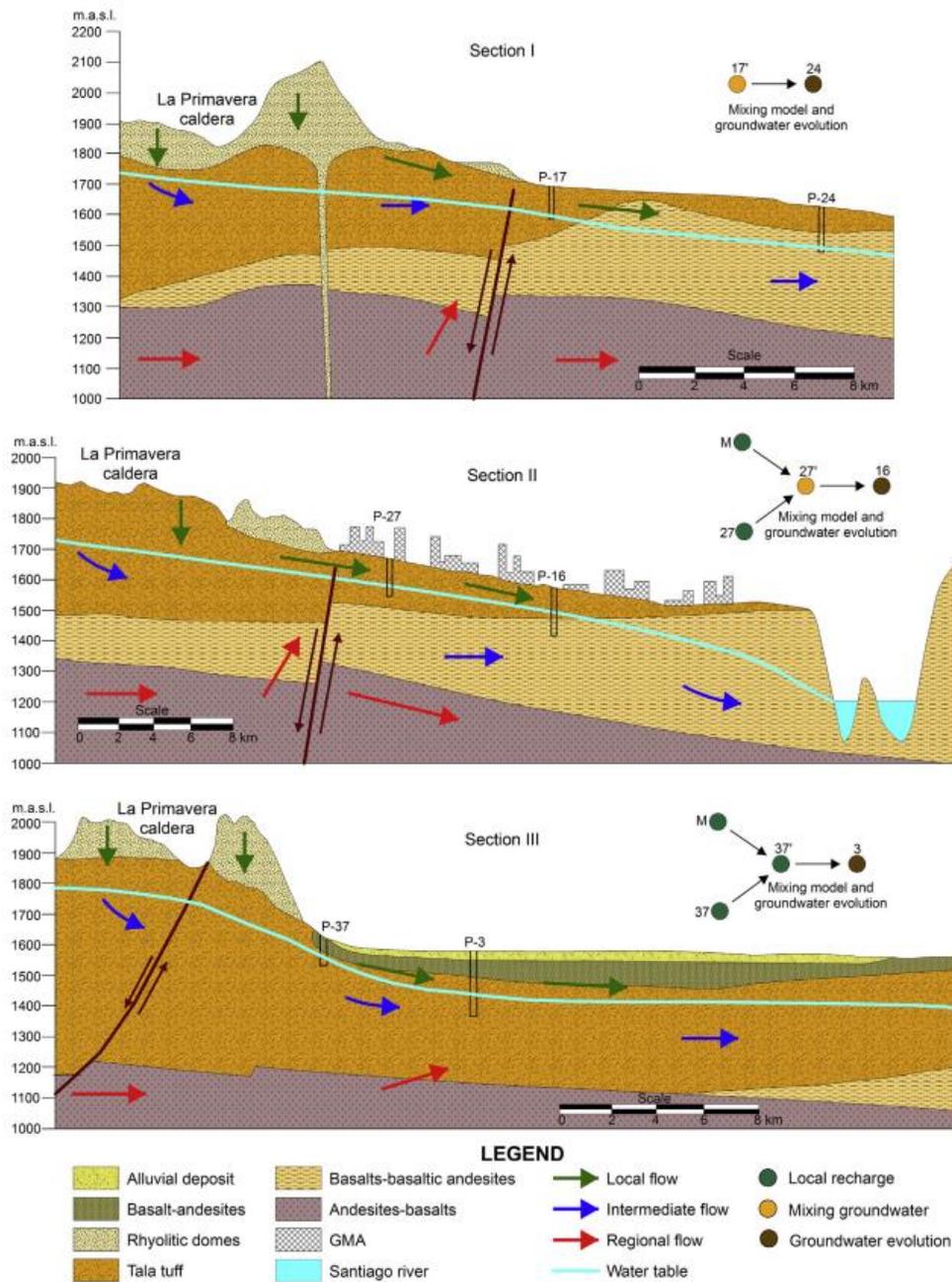


Figura 110. Estratigrafía del AMG. Fuente: (Morán-Ramírez, et al., 2016).

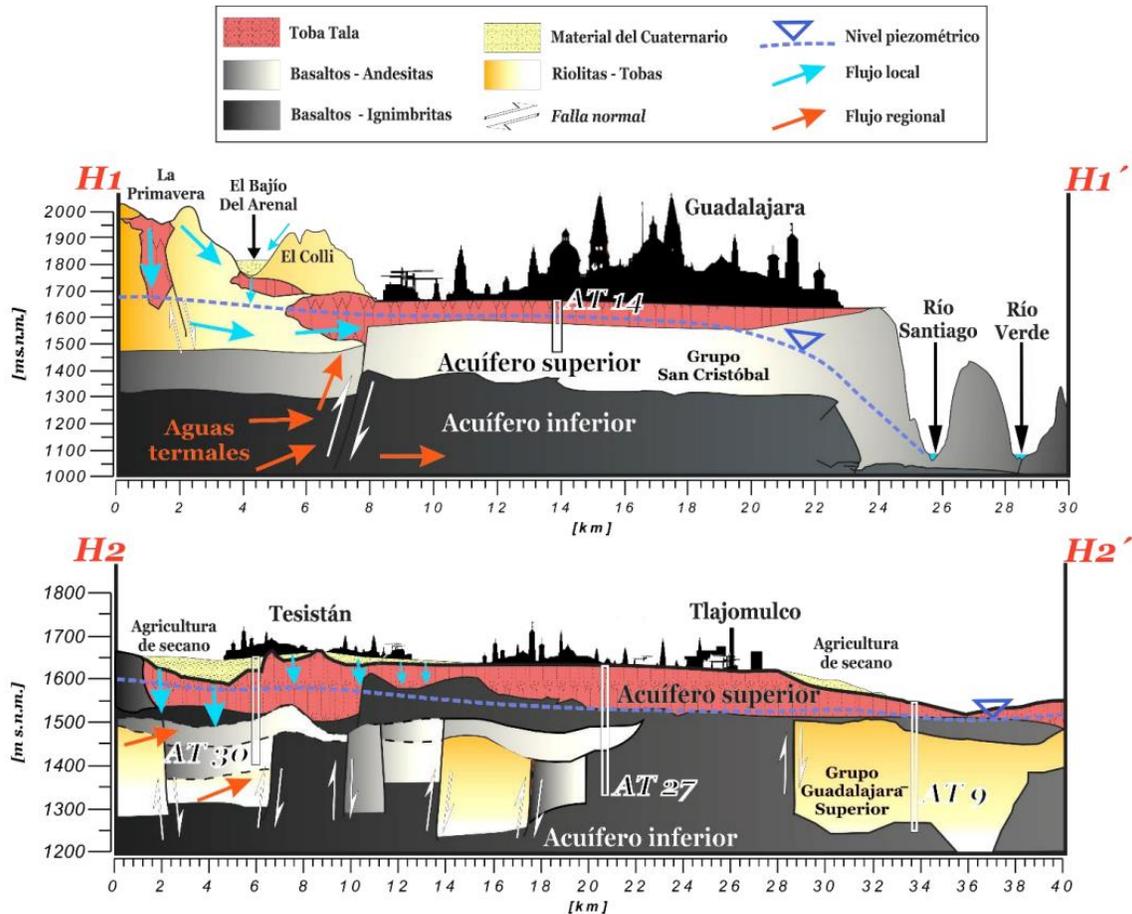


Figura 111. Estratigrafía del AMG. Fuente: (Rizo-Decelis, 2017)

## Permeabilidad de los materiales geológicos y tipo de acuíferos encontrados en la cuenca

La permeabilidad, también conocida como conductividad hidráulica, es una característica intrínseca del tipo de arena, la cual se mide en unidades de velocidad (distancia sobre tiempo) (Sánchez San Román, 2008). Esta se define como el volumen de agua que fluye por una sección unitaria de arena (*i.e.*, acuífero) perpendicular al flujo, en una unidad de tiempo, bajo un gradiente hidráulico unitario INEGI (2001). Además, la permeabilidad es el factor fundamental en el comportamiento del escurrimiento.

Las permeabilidades de las rocas se obtuvieron al comparar la litología con las cartas de agua subterránea de INEGI (1980). La información publicada por el INEGI describe, de forma cualitativa, qué tan permeable es la superficie; sin embargo, no se menciona el tipo de roca, razón por la cual fue necesario consultar el estudio hidrogeológico de Jalisco (INEGI, 1998). Después de analizar dicha información, se obtuvo como resultado la cartografía mostrada en la Figura 112. En ella, se puede observar que la mayor parte del territorio del AMG tiene posibilidades de infiltración (*i.e.*, permeabilidad) altas, al abarcar el 41.16% de la misma; seguido de las zonas con baja (40.75%) y media (17.37%) permeabilidad. Además, hay que mantener en consideración los cuerpos de agua,

que no se tomaron en cuenta para este análisis y representan apenas el 0.71% de la superficie del AMG.

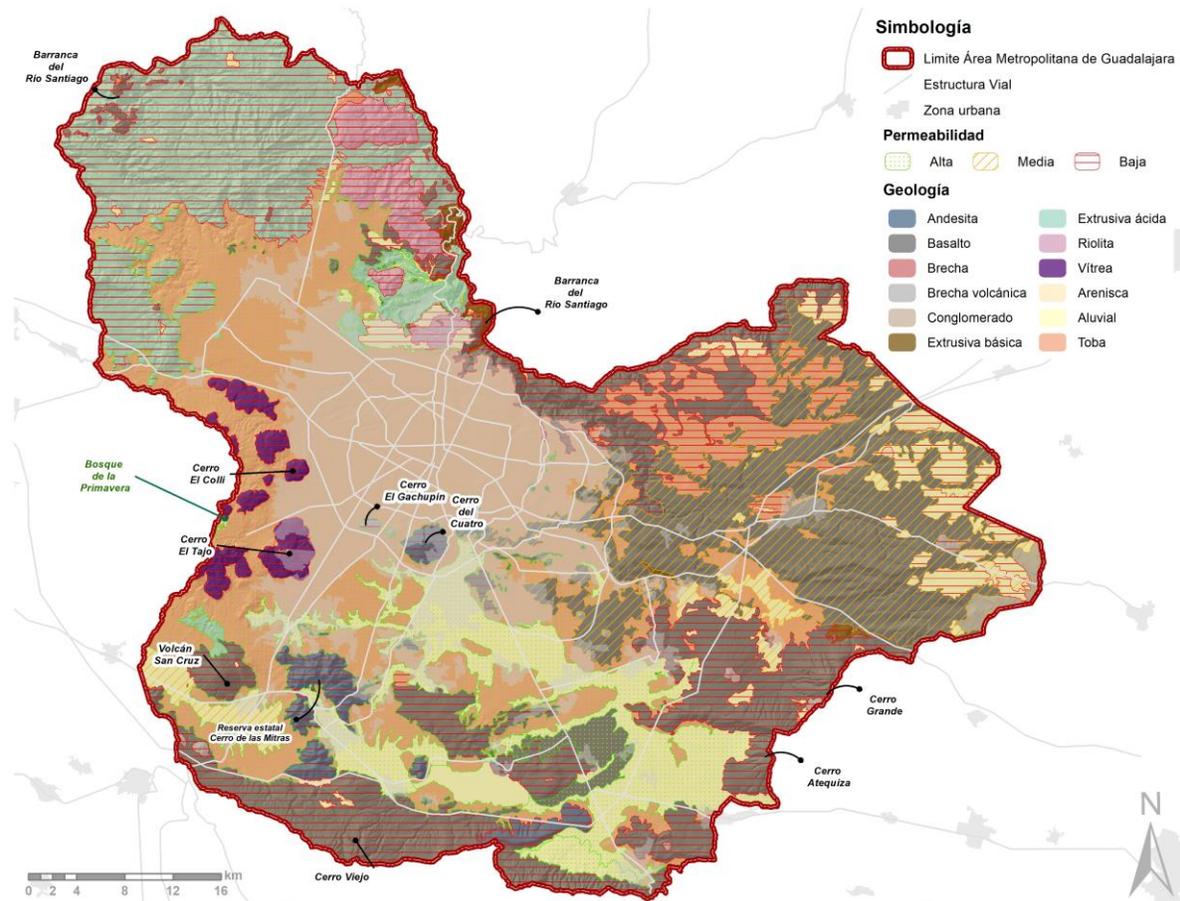


Figura 112. Hidrogeología del AMG. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Como parte del análisis cuantitativo, se buscó asignar un valor promedio de conductividad hidráulica, según la clasificación cualitativa de los suelos. Para ello, se consultaron los ensayos de bombeo los reportes correspondientes a los estudios realizados por (JVC, 2003) y GEOEX-SIAPA (2003), contando este último con valores de transmisividad. Tanto estas fuentes bibliográficas como lo estipulado por (Vanegas-Espinosa, et al., 2022) (INEGI, 1998), ayudaron a la asignación de valores de permeabilidad en las distintas regiones del área de estudio (véase Tabla y Figura 113).

Tabla 22. Permeabilidad o conductividad hidráulica en el área de estudio.

Permeabilidad	Descripción	Conductividad hidráulica (m/d)	Fuente
Permeabilidad alta	<b>Rocas ígneas</b> clasificadas como <b>granodiorita y granito</b> ; a las <b>rocas extrusivas</b> representadas por <b>riolita, andesita y toba</b> cuya distribución es amplia sobre la Sierra Madre Occidental y Eje Neovolcánico, así como pequeños depósitos de caliza con intercalaciones de lutita-arenisca-caliza localizadas al centro-suroeste del estado y, <b>rocas metamórficas</b> representadas por <b>esquito</b> ubicadas al sureste de la entidad. Los <b>suelos aluviales</b> que rellenan los principales valles	0.5	(GEOEX-SIAPA, 2003) (JVC, 2003)

Permeabilidad	Descripción	Conductividad hidráulica (m/d)	Fuente
	intermontanos y planicie costera son de <b>permeabilidad variable</b> , debido a que las partículas que los constituyen son principalmente del tamaño de la <b>arena, grava y arcilla</b> .		
Permeabilidad media	Depósitos <b>detríticos del Terciario</b> , constituidos por <b>conglomerado y arenisca</b> , y las <b>rocas volcánicas</b> constituidas por <b>basalto, brecha volcánica y toba de fracturamiento moderado a alto</b> .  Los <b>suelos aluviales</b> que rellenan los principales valles intermontanos y planicie costera son de <b>permeabilidad variable</b> , debido a que las partículas que los constituyen son principalmente del tamaño de la <b>arena, grava y arcilla</b> .	0.25	(Domenico & Schwartz, 1998); (Fetter, 2001); (Freeze & Cherry, 1979); (Sander, 1998); (Smith L. &., 1993)
Permeabilidad baja	<b>Unidades del Cuaternario</b> cuyas características petrofísicas permiten asignar esta permeabilidad. Quedan incluidos <b>basaltos del Terciario Superior</b> localizado al sureste de la entidad y pequeños afloramientos de basalto del Cuaternario, que se localizan al noreste del estado. Aquí se incluyen los depósitos de materiales detríticos representados por conglomerado.	0.0005	(Domenico & Schwartz, 1998); (Fetter, 2001); (Freeze & Cherry, 1979); (Sander, 1998); (Smith L. &., 1993)

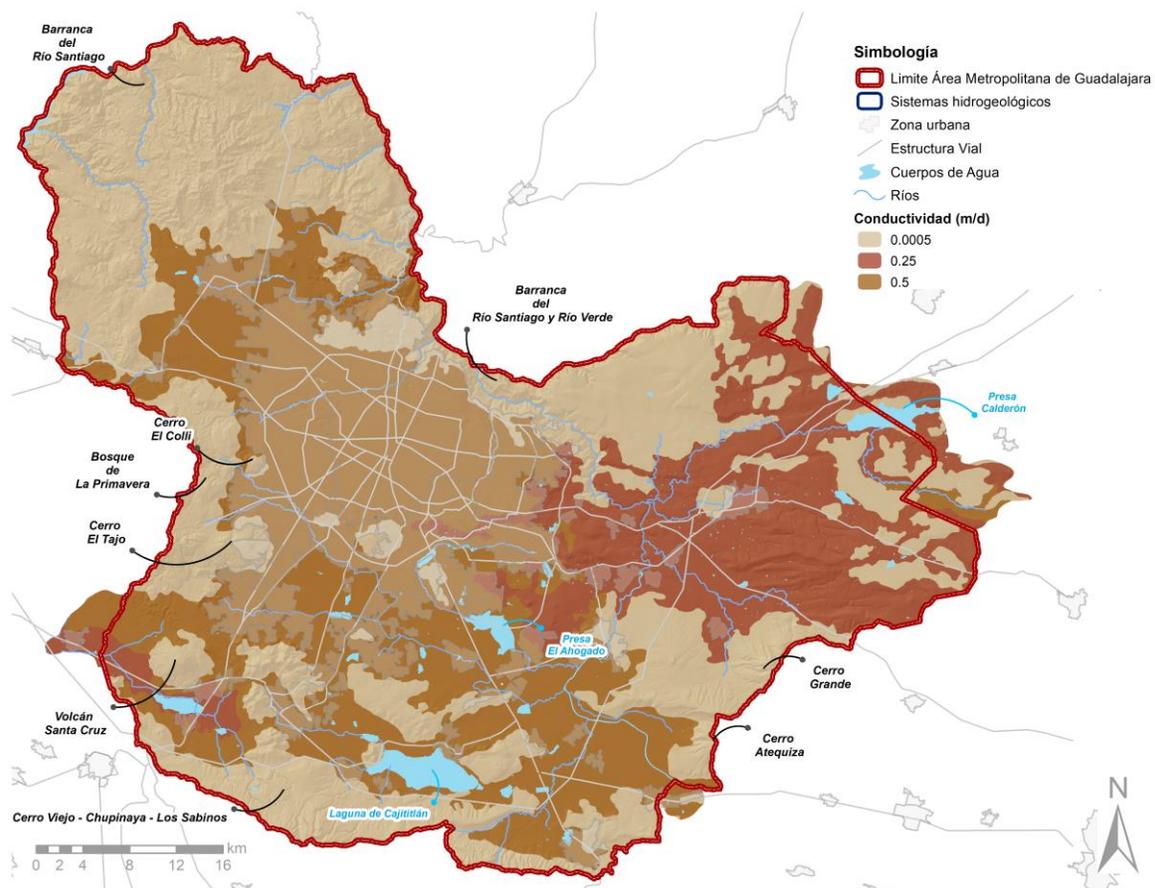


Figura 113. Mapa con valores de permeabilidad.

A continuación, se describen con mayor detalle las zonas hidrogeológicas de importancia del AMG (Atemajac-Tesistán, Toluquilla, Cajititlán y Altos de Jalisco), de acuerdo con lo publicado en el estudio

hidrogeológico de (INEGI, 1998); al igual que se anexa también la zona de Poncitlán, pues describe parcialmente la región de Ixtlahuacán de los Membrillos. Cabe recalcar que, probablemente, los niveles hayan cambiado con el paso de los años, aunque se estipula que la geología, permeabilidad y estratigrafía se hayan mantenido constantes.

Tabla 23. Zona Geohidrológica Atemajac-Tesistán. Fuente: (INEGI, 1998)

Zona Geohidrológica Atemajac-Tesistán	Tema	Descripción
Se localiza en la porción central del estado; comprende el valle de Atemajac- Tesistán.	<b>Geología y Permeabilidad</b>	Se forma de roca volcanoclástica y suelo aluvial del Cuaternario. Fisiográficamente se encuentra en la provincia Eje Neovolcánico. La geología regional está representada principalmente por <b>rocas ígneas extrusivas ácidas (toba, dacita e ignimbrita) del Terciario Superior (Oligoceno-Mioceno); rocas ígneas extrusivas básicas (basalto, toba y brecha) del Terciario Superior (Plioceno) al Cuaternario; rocas ígneas extrusivas ácidas (riolita, toba, ignimbrita y vidrio volcánico) también del Terciario Plioceno y del Cuaternario;</b> además de <b>roca volcanoclástica (secuencia lacustre) y suelo aluvial del Cuaternario.</b> En este valle aflora un paquete de arena pinocítica de origen Volcanoclástico, con espesores que alcanzan los 30 m, sobreyacen a material aluvial areno-gravoso con horizontes arcillosos, con espesor promedio de 120 m. El material aluvial presenta intercalaciones de roca volcánica ácida y de derrames basálticos, estos últimos subyacen la secuencia de materiales de la zona. Todos los materiales en conjunto constituyen acuíferos de tipo libre y localmente semiconfinados. En términos generales los materiales no consolidados que afloran en este valle están interconectados con los materiales consolidados intercalados o subyacentes, lo cual se refleja en buenos caudales en los aprovechamientos.
	<b>Transmisividad</b>	La transmisibilidad en las arenas pumicíticas es de $1 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> /seg. y del suelo aluvial que las subyace es de $5 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /seg. (CNA, 1993, SIAPA, 1995).
	<b>Niveles</b>	Los pozos y norias censados en esta zona tienen niveles estáticos entre 1.5 y 110 m
	<b>Acuífero</b>	La Comisión Nacional del Agua (CNA) considera un acuífero somero de espesor variable entre 4 y 250 m y un acuífero profundo regional de 200 a 300 m.

Tabla 24. Zona Geohidrológica Toluquilla. Fuente: (INEGI, 1998)

Zona Geohidrológica Toluquilla	Tema	Descripción
Se sitúa en la porción central del estado, dentro de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico.	<b>Geología y Permeabilidad</b>	Similar a la Zona Geohidrológica Atemajac-Tesistán. Existe una barrera geológica que los separa. El acuífero somero en <b>arena mezclada con pumicita, clastos gruesos y arenisca deleznable;</b> le subyacen otros horizontes acuíferos en <b>basalto, basalto alterado y fracturado, toba básica y pequeños espesores de arcilla.</b> Este valle de origen tectónico recibe recarga de las sierras que lo enmarcan, principalmente de la sierra La Primavera.
	<b>Niveles</b>	Los niveles estáticos del agua van de 2 a 50 m.

Zona Geohidrológica Toluquilla	Tema	Descripción
	<b>Acuífero</b>	La CNA considera un sistema acuífero que corresponde a un relleno granular formado por arena y pumicita, así como rocas volcánicas fracturadas; distingue un acuífero somero de espesor variable, del orden de 6 a 90 m; mientras que el espesor del acuífero profundo conocido a la fecha es de 30 a 100 m.

Tabla 25. Zona Geohidrológica Cajititlán. Fuente: (INEGI, 1998)

Zonas Geohidrológicas de Cajititlán	Tema	Descripción
Se localizan al sureste de la ciudad de Guadalajara y quedan dentro de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico.	<b>Geología y Permeabilidad</b>	Son valles intermontanos que se conforman de <b>limolita-arenisca del Terciario Superior, suelo aluvial, lacustre y material Volcanoclástico</b> , todos ellos de edad <b>cuaternaria</b> ; les subyacen <b>rocas volcánicas del Terciario Plioceno-Cuaternario</b> . La zona geohidrológica de Cajititlán debe su origen a fallamiento tectónico que originó fosas, las cuales fueron rellenadas por <b>sedimentos lacustres y piroclastos</b> . El sistema acuífero se forma de depósitos lacustres que constituyen el principal acuífero, de tipo libre y semiconfinado localmente. Le subyace un segundo acuífero en rocas volcánicas fracturadas. Existe recarga directa en el valle y lateral a través de los depósitos de pie de monte.
	<b>Niveles</b>	Los pozos y norias mediante los que se explota la unidad tienen niveles estáticos del agua de 3.3 a 30 m.
	<b>Acuífero</b>	La CNA calcula que el espesor del acuífero somero es variable, entre 30 y 200 m; mientras que el espesor probable del acuífero profundo es de 100 a 200 m (no explotado actualmente).

Tabla 26. Zona Geohidrológica Altos de Jalisco. Fuente: (INEGI, 1998)

Zona Geohidrológica Altos de Jalisco	Tema	Descripción
Se sitúa en el noreste del estado, en la transición entre las provincias fisiográficas Eje Neovolcánico y Mesa Central.	<b>Geología y Permeabilidad</b>	La geología de la región está compuesta principalmente por <b>rocas ígneas extrusivas ácidas del Terciario Superior, arenisca asociada con conglomerado</b> de esta misma época; <b>rocas ígneas extrusivas básicas del Terciario Plioceno-Cuaternario y suelo aluvial y residual del Cuaternario</b> . Los cortes litológicos de los pozos seleccionados muestran que el principal acuífero se encuentra en <b>basalto alterado y fracturado, brecha volcánica básica, toba básica, alternado con paquetes de arena y aglomerado</b> ; presenta también horizontes confinantes de rocas metamórficas de contacto y de andesita.
	<b>Niveles</b>	Zona de Tepatitlán: los niveles estáticos del agua entre 10 y 112 m, los niveles dinámicos entre 75 y 185 m. Zona de Acatitlán: los niveles estáticos del agua se encuentran entre los 122 y 140 m de profundidad, los niveles dinámicos entre 236 y 270 m. En general los niveles estáticos varía entre 10 y 190 m
	<b>Acuífero</b>	N/D

Tabla 27. Zona Geohidrológica Poncitlán. Fuente: (INEGI, 1998)

Zonas Geohidrológicas de Poncitlán	Tema	Descripción
Se localizan al sureste de la ciudad de Guadalajara y quedan dentro de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico.	<b>Geología y Permeabilidad</b>	De origen similar al de Cajititlán, las principales formaciones acuíferas se encuentran en <b>depósitos lacustres y derrames de basalto alterado</b> de mediana permeabilidad. Ambos acuíferos constituyen un sistema. La recarga principal es a través de los depósitos de pie de monte y la descarga natural por medio del río Grande de Santiago, por ambas márgenes.
	<b>Niveles</b>	Los pozos y norias mediante los que se explota la unidad tienen niveles estáticos del agua de 3.3 a 30 m.
	<b>Acuífero</b>	El espesor del acuífero somero es variable, la CNA calculó de 10 a 40 m; el espesor probable del acuífero profundo de 50 a 200 m.

#### 11.2.1.4. Edafología

La sección de edafología se subdividió en los apartados de: tipo de suelo, textura de suelo y perfiles estratigráficos para facilitar su lectura

##### Tipo de suelo

El tipo de suelo que más predomina en el AMG es el Feozem, abarcando el 31.3% del área total, seguido por el Regosol con 29.0%, el Vertisol con 16.3%, el Luvisol con 9.0%, el Planosol con 5.0%, el Cambisol con 1.1%, el Fluvisol con 0.6% y el Gleysol con 0.2%. Lo anterior se muestra en la Tabla, donde se presentan los porcentajes por tipo de suelo identificado en la cuenca, así como su área en km<sup>2</sup> y la representación visual en la Figura 114.

Tabla 28. Superficie por tipo de suelo. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

Distribución de tipos de suelo en el AMG		
Suelo	Área (km <sup>2</sup> )	Fracción
<b>Feozem</b>	1,021.3	31.28%
<b>Regosol</b>	946.8	28.99%
<b>Vertisol</b>	533.1	16.32%
<b>Luvisol</b>	294.8	9.03%
<b>Litosol</b>	244.4	7.49%
<b>Planosol</b>	163.4	5.00%
<b>Cambisol</b>	35.8	1.10%
<b>Fluvisol</b>	20.7	0.63%
<b>Gleysol</b>	5.1	0.16%
<b>Total</b>	<b>3,265.5</b>	<b>100.00%</b>

##### Textura de suelo

La textura del suelo en el AMG permite reconocer parte de la estructura de un perfil de suelo, dependiendo de si se encuentra material limoso, arcilloso o grava. Esta propiedad se clasificará como

se muestra en la Tabla, en donde las categorías varían en función del tamaño de sus partículas, de acuerdo con (Porta, et al., 2019):

- Muy gruesa / gruesa (0.2-60 cm): Los elementos gruesos son aquellas partículas con un tamaño superior a 2 mm, y se dividen en cuatro categorías: gravilla (0.2 a 0.6 cm), grava (0.6 a 6 cm), cantos (6 a 25 cm) y bloques (6 a 25 cm).
- Media (0.5-0.25 mm): Este tipo de suelos generalmente se encuentra constituido por un 45% de arena, 40% de limo y 15% de arcilla, por lo que sus condiciones físicas y químicas son las mejores.
- Muy fina / fina (0-2 mm): Por su parte, la tierra fina es aquella fracción que atraviesa un tamiz de 2 mm de malla

*Tabla 29. Área y porcentaje de textura del suelo en el AMG. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos.*

Distribución de tipos de textura en el AMG		
Textura	Área (km <sup>2</sup> )	Fracción
<b>Media</b>	1,712.7	52.45%
<b>Fina</b>	828.4	25.37%
<b>Gruesa</b>	724.4	22.18%
<b>Total</b>	<b>3,265.5</b>	<b>100.00%</b>

Como se aprecia en la Figura 114, la textura media es la más predominante en el área de estudio, abarcando aproximadamente el 52.45% de la superficie total, los tipos de suelo predominantes son el Regosol y el Feozem. En segundo lugar, se observa que la textura fina que abarca el 25.37% del área total de la cuenca, presenta mayormente el suelo de tipo Vertisol. Finalmente, la textura gruesa del suelo es la menos predominante con un 22.18%, la cual se encuentra mayormente sobre suelo Regosol.

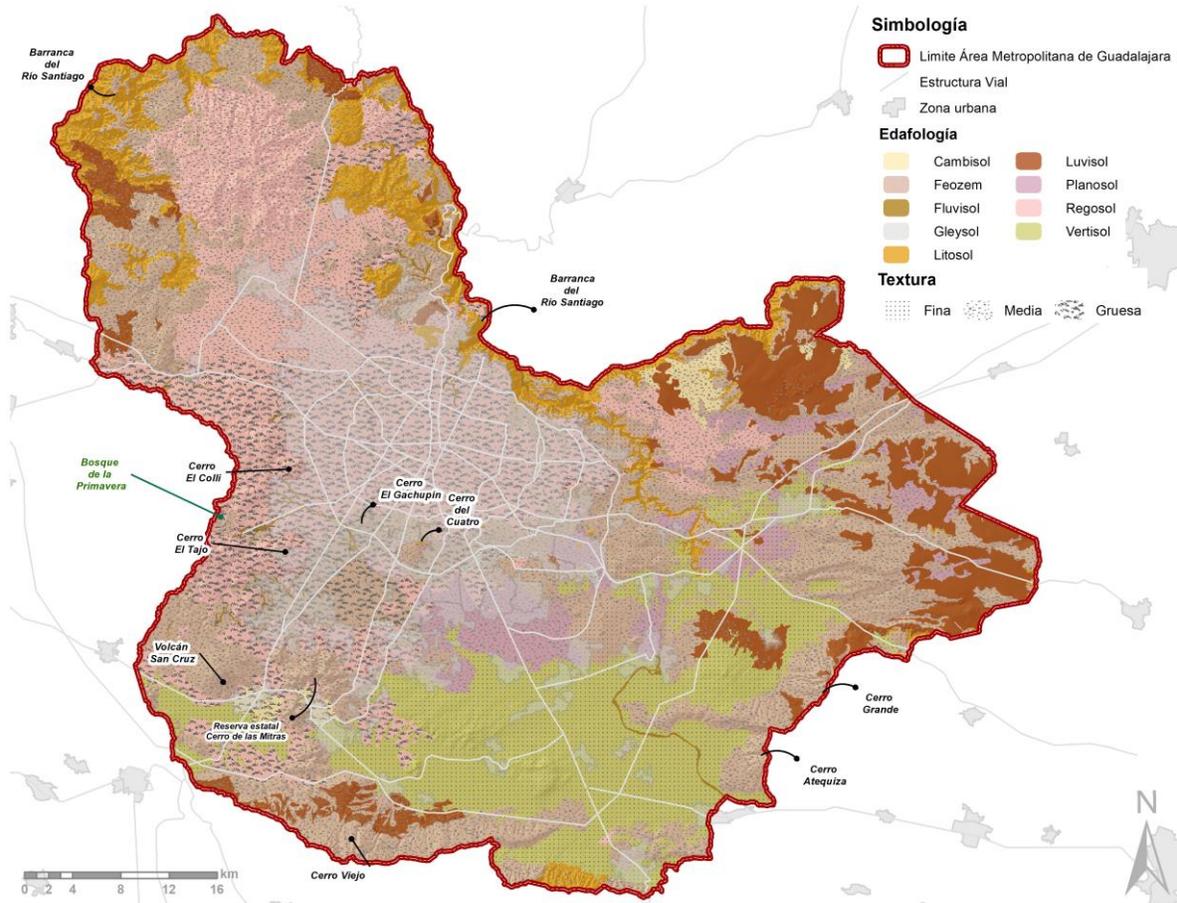


Figura 114. Edafología (tipo y textura del suelo) en el AMG. Fuente: Elaboración propia. Enlace Ambiental y Proyectos. S.C.

### 11.2.1.5. Uso de suelo y vegetación

El análisis del uso de suelo y vegetación se realizó en base a la capa presentada por IMEPLAN, elaborada a partir de la información presentada por SEMADET-FIPRODEFO (2020). Durante la interpretación de los datos se observó que dentro de los límites del AMG existen usos de suelo y vegetación catalogados como Agrícola (42.4%), Forestal (27.7%), Urbano (15.1%), Vegetación intraurbana (8.8%), Pastizal cultivado e inducido (4.3%), Cuerpos de agua (1.2%) y Suelos sin vegetación aparente (0.5%). Se destaca la existencia de superficies agrícolas, ya que cerca de 1,385 km<sup>2</sup> de la superficie se encuentra destinada a dicho uso (Figura 115).

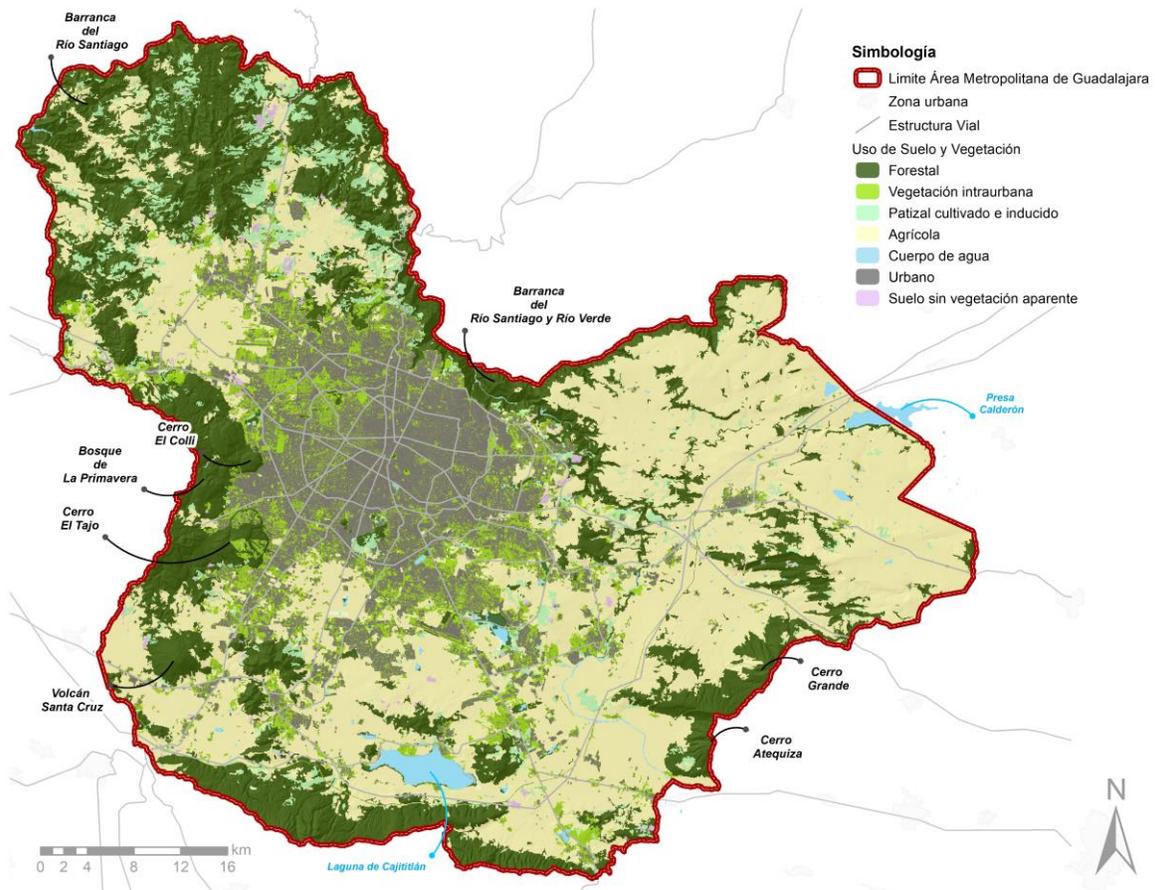


Figura 115. Uso de suelo y vegetación en el área de estudio (IMEPLAN, 2023).

### 11.2.1.6. Hidrología superficial

Dentro de los ríos perennes más importantes están el río Santiago y el Río Verde. De igual manera, los cuerpos de agua lénticos más relevantes son la laguna de Cajititlán, la Presa Calderón y la Presa El Ahogado, dentro del AMG; así como el lago de Chapala a aproximadamente 13 km del límite municipal de Ixtlahuacán de los Membrillos. (véase Figura 116)

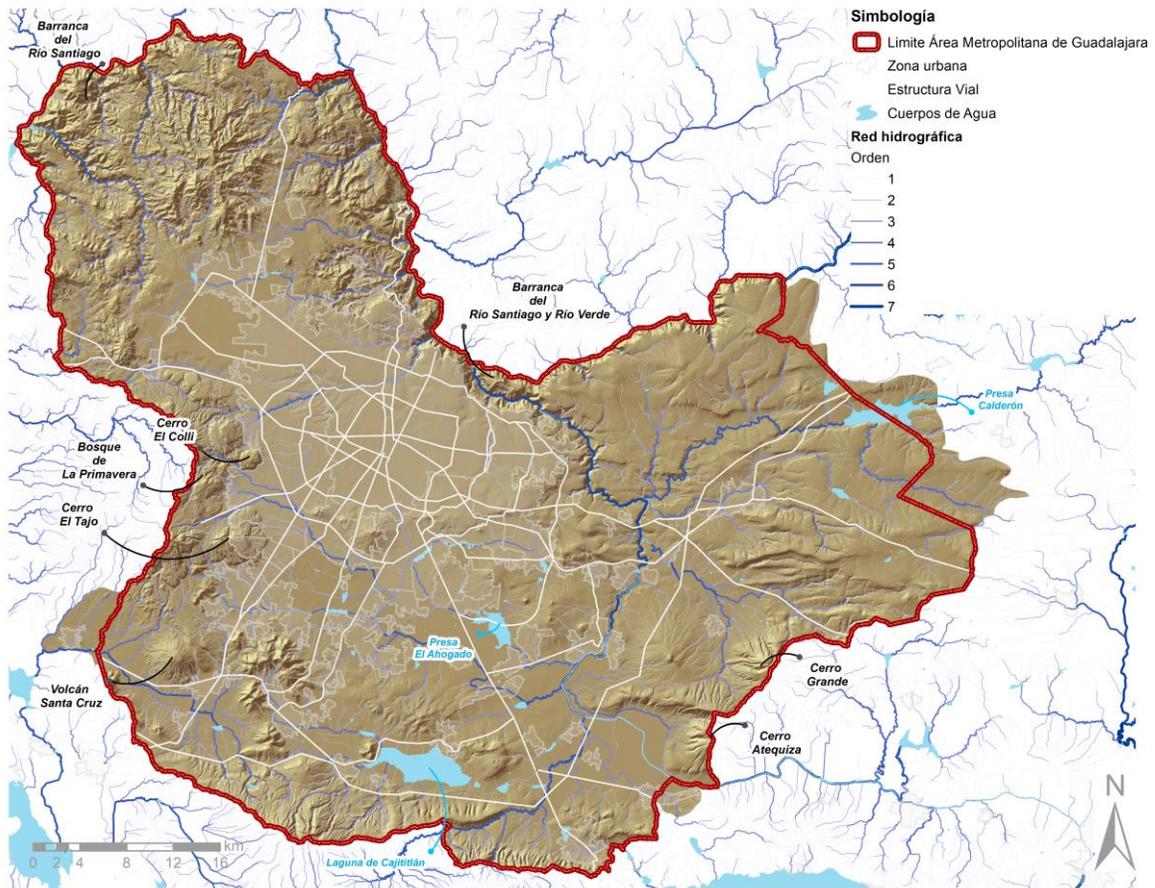


Figura 116. Distribución de cuerpos de agua y escurrimientos localizados en el AMG. Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA.

### 11.2.1.7. Hidrogeología

En este anexo se describe la situación de los acuíferos (delimitación administrativa de CONAGUA) y se realiza una breve descripción de las características geohidrológicas de la zona.

De acuerdo con la CONAGUA, las divisiones administrativas que denomina se definen como el área territorial conformada por características orográficas e hidrológicas determinadas, con el fin de agrupar la información hidrológica y de calidad del agua (véase Figura 117). Sin embargo, los límites regionales no necesariamente coinciden con los estatales ni con los municipales. Bajo esta premisa, se observa a continuación la delimitación administrativa generada por la CONAGUA, en el AMG (CONAGUA, 2019).



Figura 117. División administrativa de los acuíferos en el AMG. Fuente: elaboración propia con información de las delimitaciones administrativas de CONAGUA.

Se presenta en la Tabla se presenta con la situación de los “acuíferos” (delimitación administrativa de CONAGUA) más importantes en el AMG. Las actividades principales a las que se destina el agua extraída son actividades agrícolas, servicios urbanos, domésticos e industriales entre otros. Se resalta que 4 están en situación de sobreexplotados y ninguno cuenta con disponibilidad. Esta situación es preocupante, ya que indica que para el área de interés (el AMG) existe un déficit general, lo cual significa que es una zona altamente sobreexplotada y no deberían otorgarse concesiones para su aprovechamiento. En algunos casos, como el acuífero de Toluquilla, se deben reducir las concesiones otorgadas, pues no debe permitirse una sobreexplotación de ningún tipo, y menos en los casos que la extracción es más del doble de la recarga (CONAGUA, 2020).

Tabla 30. Disponibilidad de agua subterránea por acuífero

Acuífero	Clave del Acuífero	Área (km <sup>2</sup> )	Superficie correspondiente el AMG (%)	Recarga total (hm <sup>3</sup> /año)	Descarga natural comprometida (hm <sup>3</sup> /año)	Volumen de extracción de aguas subterráneas (hm <sup>3</sup> /año)	Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero (hm <sup>3</sup> /año)	Situación
Altos Jalisco	1413	1.505,84	23,1%	62,30	0,60	74,15	Negativa -12,45	Sobreexplotado
Atemajac	1401	733,32	22,1%	147,30	25,70	133,64	Negativa -12,04	Sobreexplotado

Acuífero	Clave del Acuífero	Área (km <sup>2</sup> )	Superficie correspondiente el AMG (%)	Recarga total (hm <sup>3</sup> /año)	Descarga natural comprometida (hm <sup>3</sup> /año)	Volumen de extracción de aguas subterráneas (hm <sup>3</sup> /año)	Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero (hm <sup>3</sup> /año)	Situación
Toluquilla	1402	632,14	18,0%	49,10	2,40	122,35	Negativa -75,65	Sobreexplotado
Cajititlán	1403	565,88	15,0%	47,60	0,50	63,32	Negativa -16,22	Sobreexplotado
Arenal	1436	847,51	13,2%	22,50	1,90	29,35	Negativa -8,75	Sin disponibilidad
San Isidro	1450	380,58	6,3%	64,20	19,60	46,58	Negativa -1,98	Sin disponibilidad

Fuente: Elaboración propia con datos de (CONAGUA, 2020)

### 11.2.1.8. Piezometría

El propósito de las modelaciones piezométricas es comprender el funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos propuestos. Se llevó a cabo un análisis de los modelos piezométricos para evaluar sus diferencias. En términos generales, se puede observar que los Sistemas Atemajac (véase Figura 118) y Toluquilla (véase Figura 119) presentan una dirección de flujo del agua subterránea desde el Bosque de La Primavera en el oeste hacia el Río Santiago en el este. Asimismo, el Sistema Los Altos muestra un flujo subterráneo que se origina en el Cerro La Mesa y fluye hacia el Río Verde. Por otro lado, los Sistemas San Isidro, Cajititlán e Ixtlahuacán de los Membrillos presentan comportamientos específicos que se analizarán detalladamente en esta sección

El sistema hidrogeológico Atemajac (véase Figura 118), se caracteriza por tener una elevación máxima del nivel piezométrico a 1,660 msnm y una mínima de 1,460 msnm. Su patrón de flujo es de oeste a este, con puntos de descarga a lo largo del curso del Río Santiago. Este sentido de flujo es evidente en las regiones próximas al Río Blanco y el Río San Juan de Dios, donde las isopiezas muestran curvas pronunciadas que reflejan la relación entre los cauces fluviales y el comportamiento del agua subterránea. No obstante, en la zona occidental, cerca de La Venta del Astillero, se observa un arroyo llamado El Saltito, que se relaciona con el agua subterránea de manera contraria al comportamiento general del sistema hidrogeológico, ya que su dirección es de este a oeste. Este fenómeno probablemente se origina debido a la cercanía con el límite de la cuenca hidrográfica.



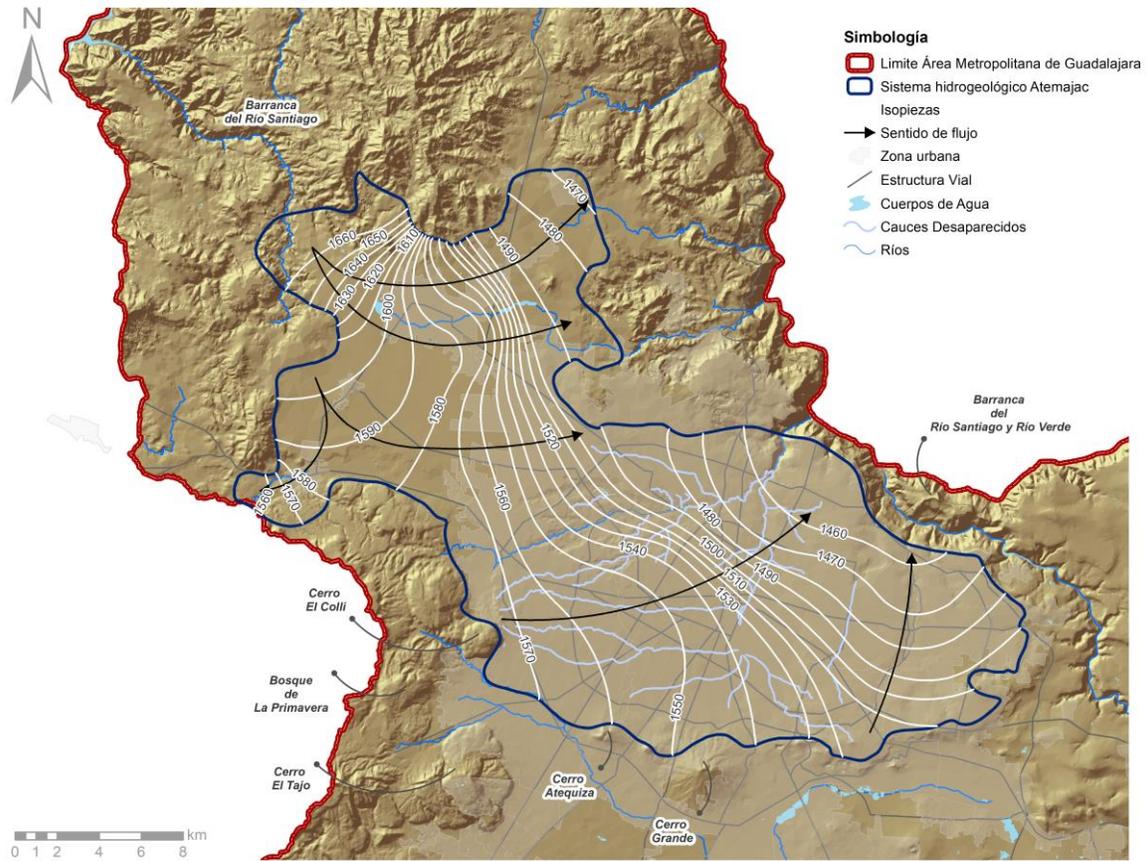


Figura 118. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema Atemajac.

De manera similar a Atemajac, el sistema de Toluquilla (véase Figura 119) tiene un sentido del flujo notable en dirección oeste a este, comenzando en La Primavera y terminando en las cercanías del Río Santiago, con altitudes máximas y mínimas del nivel piezométrico de 1590 y 1430 msnm, respectivamente. Este comportamiento se ve respaldado por las líneas de flujo que cruzan las isopiezas, ya que coinciden con el sentido de los arroyos Seco (Grande), San Juanito y El Ahogado, que desembocan en el Río Santiago.

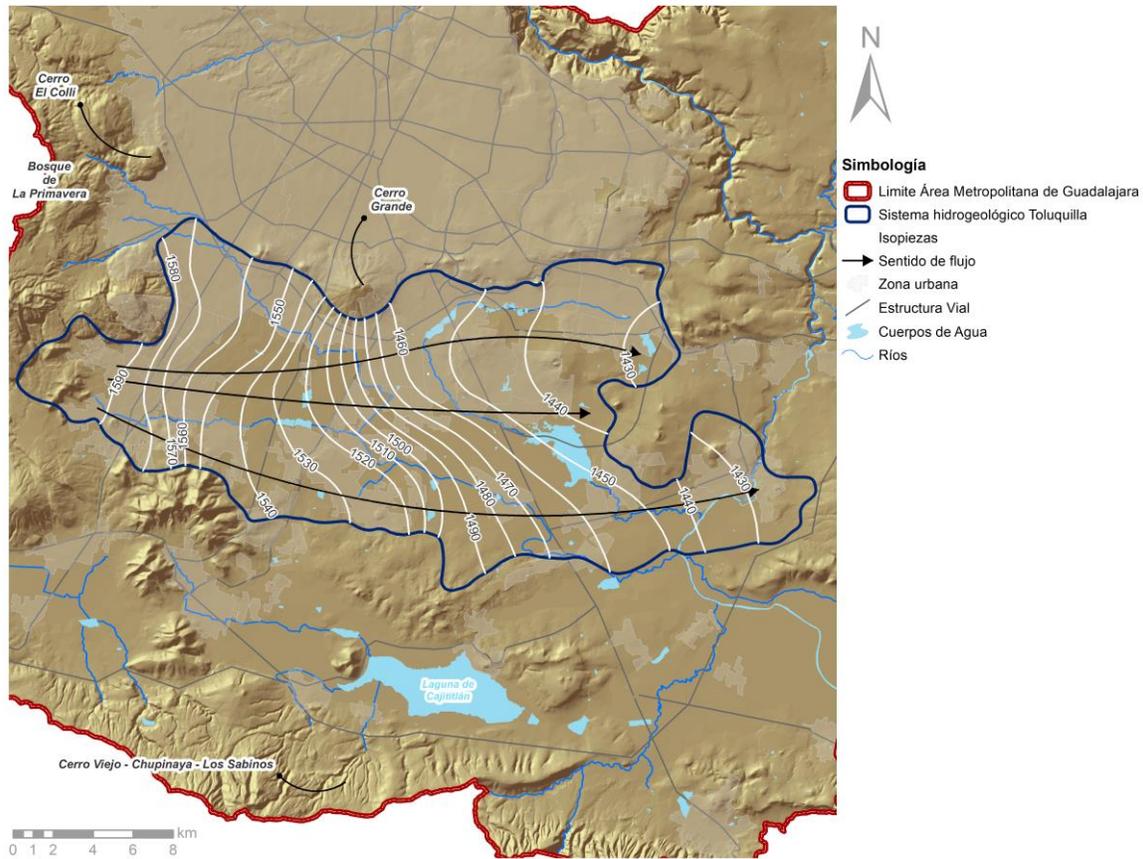


Figura 119. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema Toluquilla.

En el caso del sistema Los Altos, se puede observar una tendencia del agua subterránea a fluir de sureste a noroeste, desde la región sureste del municipio Zapotlanejo, cerca de la población Saucillo de Maldonado, hacia la barranca del Río Verde; con isopiezas de 1820 msnm y 1240 msnm, siendo esta la mayor diferencia del nivel piezométrico modelado en todos los sistemas hidrogeológicos. A pesar de que el comportamiento general se marca mucho hacia el Río Verde, en la parte suroeste se observa una influencia menor en las isopiezas, ocasionada por el Río Santiago, lo cual valida las modelaciones realizadas. Además, el impacto del Río Santiago también se exhibe en la desviación del sentido del flujo de la región, ya que se observa un descenso en la altitud del nivel piezométrico, que va desde las partes altas de los cerros al norte de la carretera libre Guadalajara – Zapotlanejo, hacia el Río Santiago, aguas abajo. Asimismo, la generación de las líneas ortogonales de flujo corrobora la interrelación entre los cauces principales y el agua subterránea, ya que estas coinciden con el sentido del Río Zapotlanejo, proveniente de la Presa Calderón y el Río Tecamatlán, así como con el mismo Río Santiago.



Figura 120. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema Los Altos.

Al analizar el sistema hidrogeológico Cajititlán, el de menor superficie de todos, se notó que la diferencia entre las altitudes mayores y menores del nivel piezométrico fue estrecha, gracias a que se modelaron valores que van de los 1530 a los 1480 msnm. Estos modelos muestran un sentido general del flujo subterráneo de sur a norte, el cual se cree es generado principalmente por las pendientes de las sierras Cerro Viejo – Chupinaya – Los Sabinos y Oxato – El Calvario – San Sebastián – Las Peñitas, las cuales se encuentran al sur y oeste del sistema hidrogeológico, respectivamente.

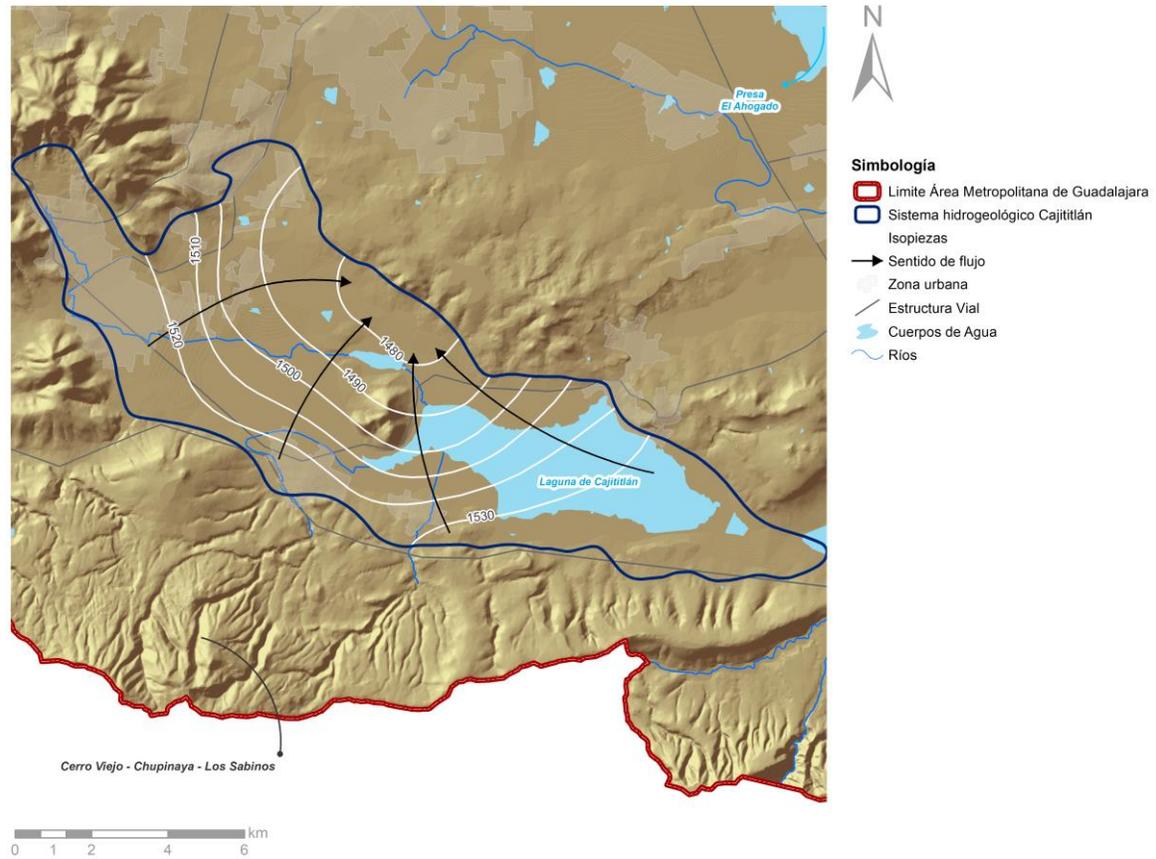


Figura 121. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema Cajititlán.

En cuanto al sistema de Ixtlahuacán de los Membrillos, las modelaciones generaron altitudes máximas y mínimas del nivel piezométrico de 1590 y 1430 msnm, de manera respectiva. Asimismo, la dirección general del agua subterránea se muestra de sur a norte, fluyendo desde las faldas de la Sierra de San Juan Cosalá (Chupinaya) hasta el arroyo que une la Presa La Calera con el Río Santiago. Igualmente, dichas modelaciones fueron validadas al crear las líneas de flujo, ya que estas se notaron en el mismo sentido que los cauces del Arroyo Los Sabinos y el mismo Río Santiago.

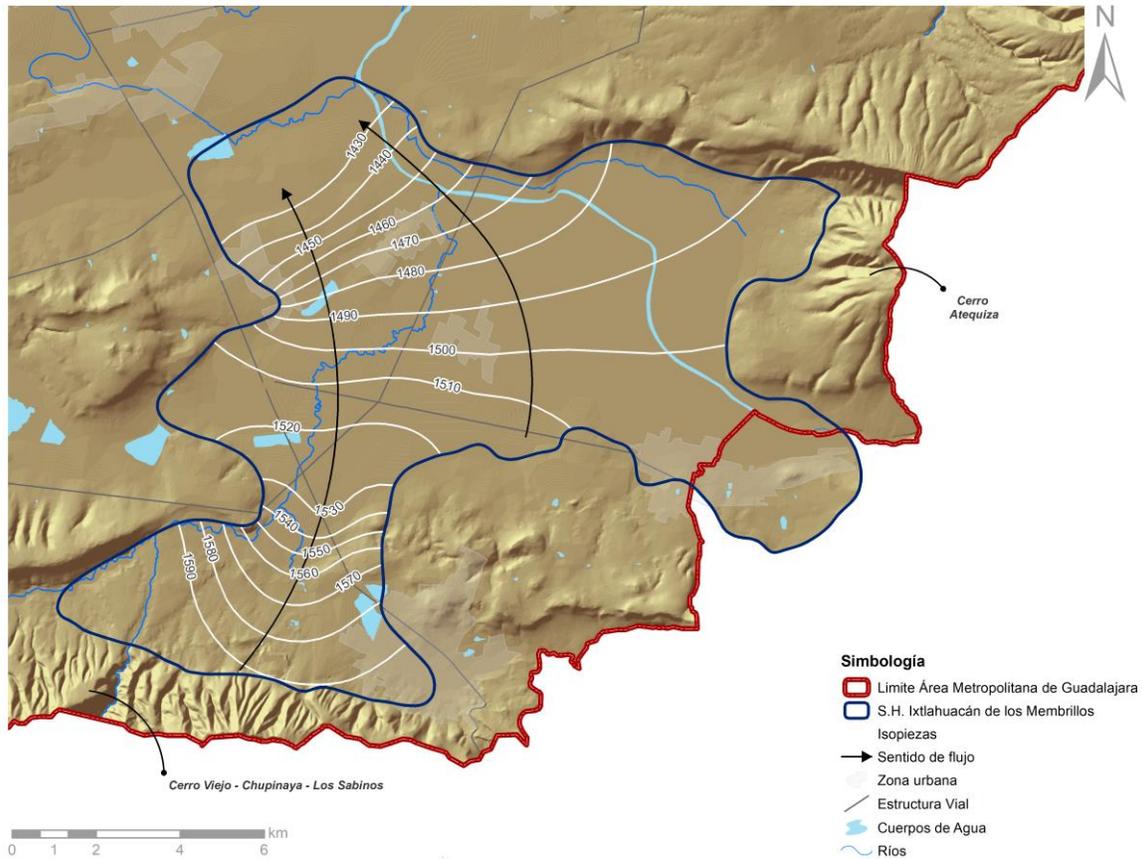


Figura 122. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema Ixtlahuacán de los Membrillos.

En última instancia se encuentra el sistema San Isidro. Este se describe al final, debido a su comportamiento peculiar y la dirección general del flujo, que se muestra distinta a las demás modelaciones. El sentido en el que se mueve el agua subterránea en este sistema hidrogeológico se observa en dirección norte – sur, y no muestra relación alguna con cuerpos de agua como ríos, arroyos, lagos o presas. Después de discutir este fenómeno entre el equipo de expertos en hidrogeología, se encontró que, posiblemente, la delimitación de este sistema debería de ajustarse más allá de los límites del AMG, ya que el parteaguas que delimita a la cuenca hidrográfica Lerma – Santiago pasa justo por las fronteras norte del sistema hidrogeológico, excluyéndolo de dicha cuenca, a la cual sí pertenecen los demás sistemas hidrogeológicos. No obstante, este fenómeno deberá estudiarse a mayor profundidad por otro estudio hidrogeológico, correspondiente a la cuenca en cuestión.



Figura 123. Isopiezas y sentido del flujo modelados para el sistema San Isidro.

## ANEXO 2. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

Con base en los resultados de los muestreos realizados por Enlace Ambiental y Proyectos S.C., se desarrollaron diagramas de Stiff, con el objetivo de representar gráficamente los iones dominantes. Dichos esquemas son ampliamente utilizados en el ámbito hidrogeoquímico, gracias a la practicidad que presentan para mostrar los patrones de concentraciones de iones, el intercambio iónico, la disolución de minerales, y demás reacciones químicas que puedan encontrarse en las muestras de agua. Los diagramas generados se muestran a continuación, agrupados por sistema hidrogeológico, de acuerdo con la definición presentada como parte del proyecto. Con el fin de facilitar la comprensión de los diagramas, presentados enseguida, se anexa una tabla de códigos con los nombres de todos los pozos muestreados (véase Tabla).

Tabla 31. Nombres y códigos de los pozos analizados durante el trabajo de campo. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

Código	Nombre del Pozo	Municipio
PAIM	Pozo Aguilillas	Ixtlahuacán de los Membrillos
PBVIM	Pozo Buenavista (glorieta)	Ixtlahuacán de los Membrillos
PSRIM	Pozo Santa Rosa 3	Ixtlahuacán de los Membrillos
PCIES	Pozo CIMEG	El Salto
PNES	Pozo No. 9 El Salto	El Salto
PUVJ	Pozo Villas Europa del Oeste y Américas	Juanacatlán
PSRZ	Pozo San Roque	Zapotlanejo
PMAZ	Pozo Madrigales	Zapotlanejo
PACVZ	Pozo / Manantial Agua Caliente (virgen)	Zapotlanejo
PACZ	Pozo / Manantial Agua Caliente (techado)	Zapotlanejo
PZMT	Pozo San Miguel Cuyutlán	Tlajomulco de Zúñiga
PCAT	Pozo 2 Cuexcomatlán	Tlajomulco de Zúñiga
PCAST	Pozo Cimas del Sol	Tlajomulco de Zúñiga
PSCT	Pozo Santa Cruz	Tlajomulco de Zúñiga
PCT	Pozo Campestre Santa Cruz	Tlajomulco de Zúñiga
PHST	Pozo Hacienda del Sur	Tlajomulco de Zúñiga
PJBTQ	Pozo 15, Juan de la Barrera	San Pedro Tlaquepaque
PLOTQ	Pozo 20, Los Olivos	San Pedro Tlaquepaque
PHCTQ	Pozo 18, Hacienda la Candelaria	San Pedro Tlaquepaque
PEPZ	Pozo El Primavera	Zapopan
PSNZ	Pozo La Soledad de Nextipac	Zapopan
PLTZ	Pozo La Teja	Zapopan

En los diagramas de Stiff obtenidos para el sistema hidrogeológico Atemajac (véase Figura 124) se observa que el catión más representativo es  $\text{Na}^+$  (sodio); mientras que el anión más relevante es  $\text{HCO}_3^-$  (bicarbonato), aunque las concentraciones no son tan elevadas como aquellas registradas en otros puntos de muestreo en el AMG. Se menciona también que, en el caso del pozo 'PEPZ'

(localizado en Venta del Astillero), se presenta una mayor concentración de sulfatos, lo cual podría ser indicativo de cierta influencia antropogénica en la región.

### Diagramas de Stiff para el S.H. Atemajac

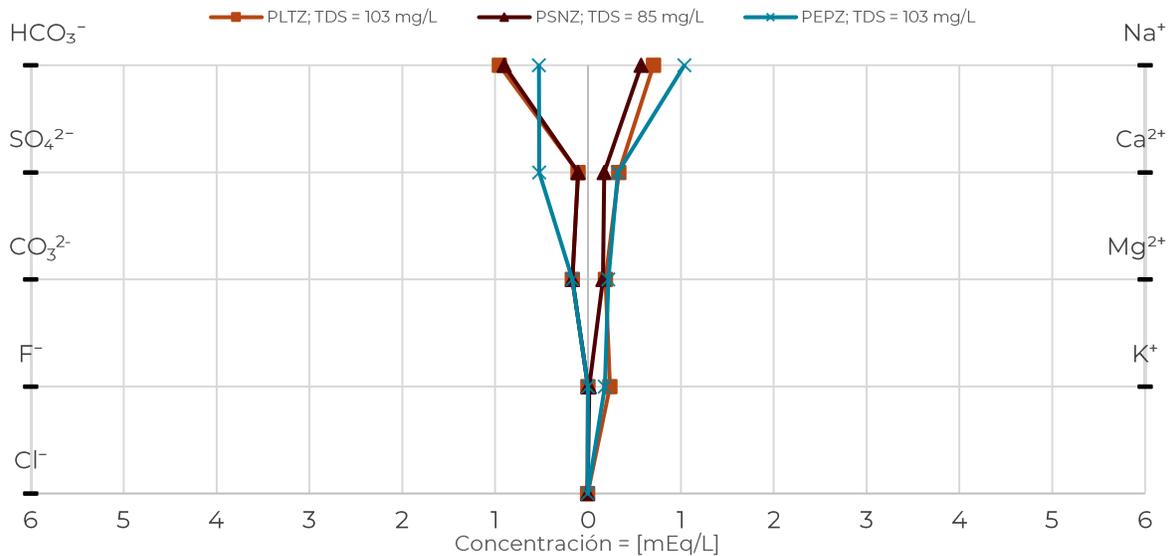


Figura 124. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. Atemajac. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

Al analizar los diagramas de Stiff para el sistema hidrogeológico Toluquilla (véase Figura 125), se observa que los iones dominantes son Na<sup>+</sup> (sodio) y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (bicarbonato), en especial en el Pozo 15 Juan de la Barrera (PJBTQ), ubicado en el municipio de Tlaquepaque. Asimismo, existe una diversidad de los resultados obtenidos en los distintos pozos. En particular, se registran concentraciones elevadas de Mg<sup>2+</sup> (magnesio) y Ca<sup>2+</sup> (calcio), así como de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (sulfatos) en algunos de los sitios analizados.

## Diagramas de Stiff para el S.H. Toluquilla

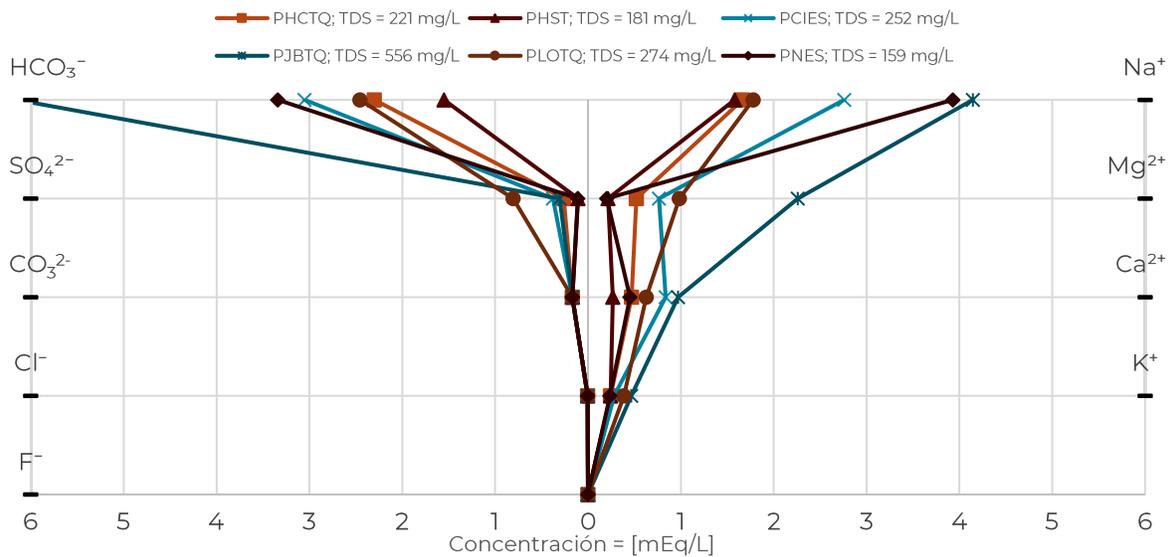


Figura 125. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. Toluquilla. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

En el sistema hidrogeológico Los Altos, si bien los iones dominantes son  $\text{Na}^+$  (sodio) y  $\text{HCO}_3^-$  (bicarbonato), especialmente en el pozo Villas Europa del Oeste y Américas (PUVJ), localizado en el municipio de Juanacatlán, algunos de los pozos muestreados presentan diferencias con respecto a otros sistemas hidrogeológicos (véase Figura 126). Esto, ya que la mayoría de los resultados obtenidos para este sistema presentan también concentraciones elevadas de  $\text{Mg}^{+2}$  (magnesio) y  $\text{Ca}^{+2}$  (calcio).

## Diagramas de Stiff para el S.H. Los Altos

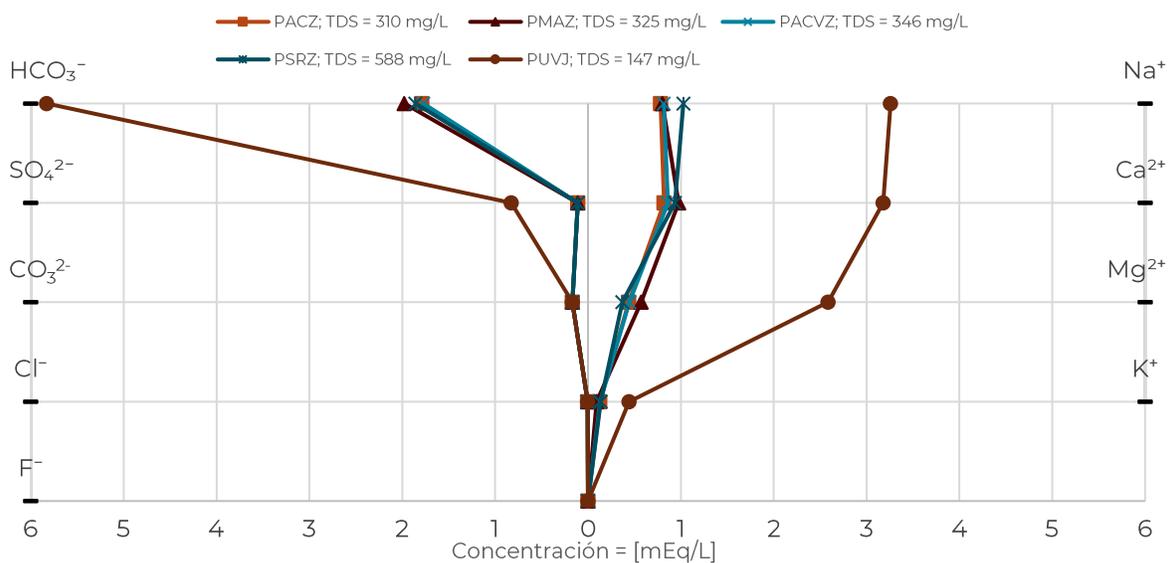


Figura 126. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. Los Altos. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

Para el sistema hidrogeológico Cajititlán se destaca la presencia de los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , así como del anión bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), particularmente en el Pozo Cimas del Sol (PCST), localizado en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga. Sin embargo, también se encontraron concentraciones, aunque menores, de ion magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y de carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).

### Diagramas de Stiff para el S.H. Cajititlán

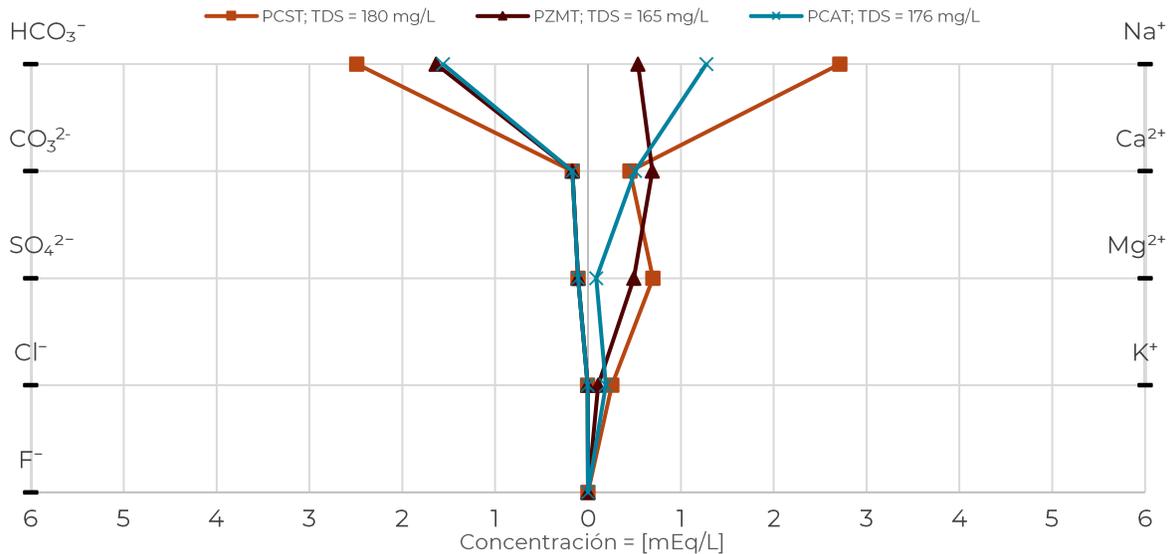


Figura 127. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. Cajititlán. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

Entre los pozos muestreados en el sistema hidrogeológico Ixtlahuacán de los Membrillos predominan los iones sodio y bicarbonato. Sin embargo, es igual significativa la presencia de iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . En el caso del pozo Aguilillas (PAIM) resalta también la presencia de carbonatos y cloruros, lo cual coincide con lo observado en el trabajo de campo, ya que durante la toma de muestra se detectó un olor a cloro.



## Diagramas de Stiff para el S.H. Ixtlahuacán de los Membrillos

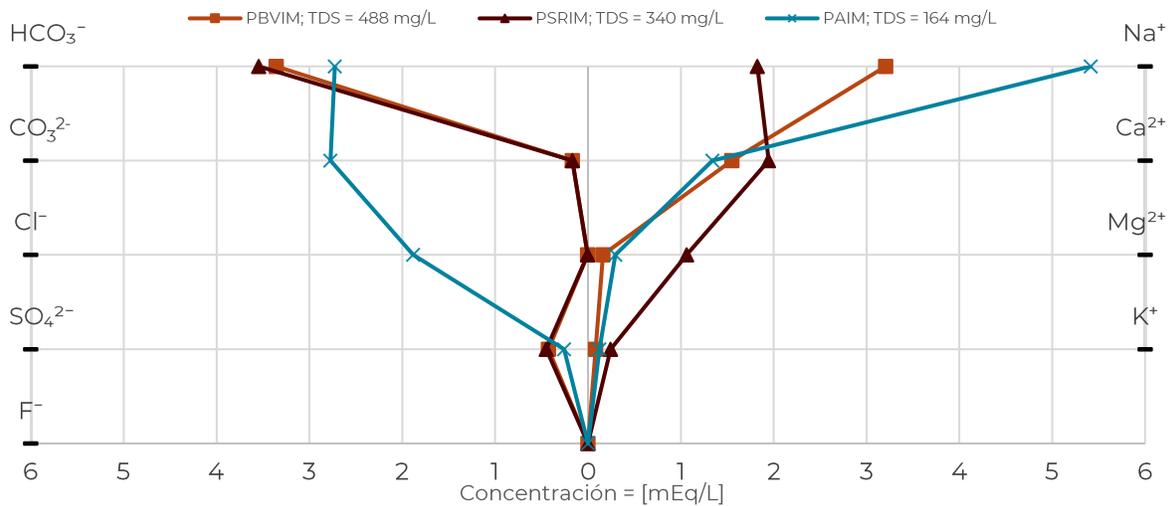


Figura 128. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. Ixtlahuacán de los Membrillos. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

Para el sistema hidrogeológico San Isidro se observa que destacan los iones sodio y bicarbonato, aunque también se presentan, en menor medida, concentraciones de ion calcio y carbonatos. Además, se subraya que la mayor concentración de estos iones se observa en el pozo Santa Cruz, ubicado aguas arriba en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga. Este tipo de combinaciones predomina en la mayor parte del AMG.

## Diagramas de Stiff para el S.H. San Isidro

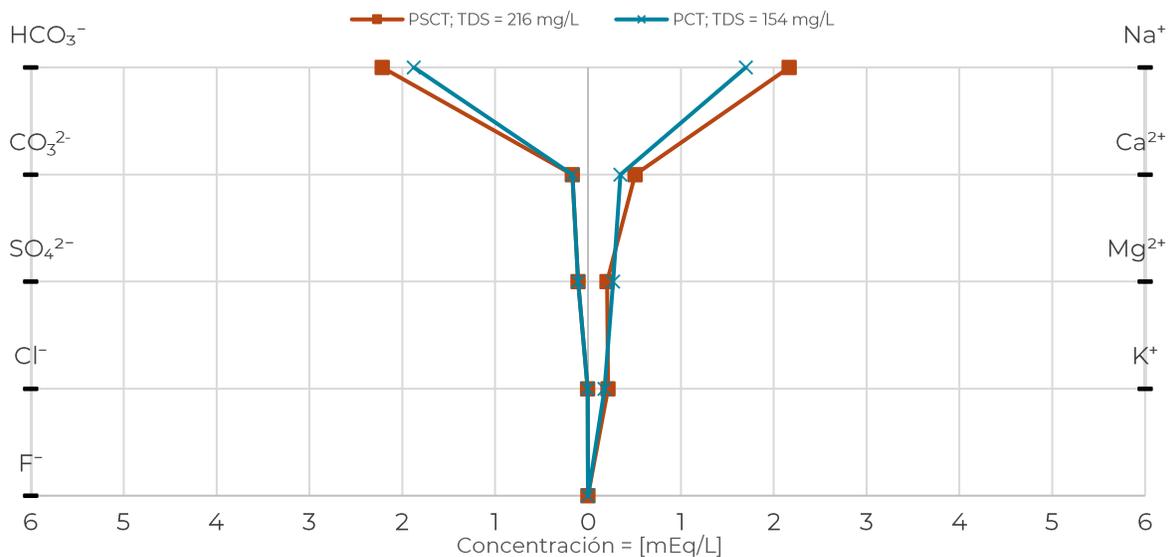


Figura 129. Diagramas de Stiff para los pozos muestreados en el S.H. San Isidro. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

## ANEXO 3. TRABAJO DE CAMPO

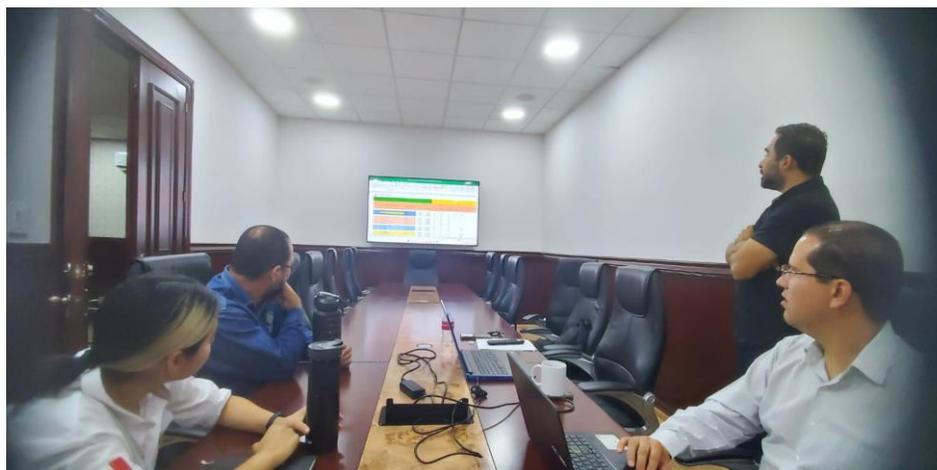
### Visitas introductorias con los municipios

El equipo de Enlace Ambiental y Proyectos S.C. realizó visitas a los municipios, con acompañamiento de IMEPLAN (véase Figura 130) con el propósito de dar a conocer el proyecto a las autoridades locales, que operan de manera independiente al SIAPA. Durante estas visitas, se compartieron los objetivos, alcances y las partes involucradas en el proyecto, a la vez que se solicitó la colaboración de dichas autoridades. Vale la pena resaltar que en cada visita se presentó el proyecto y se solicitó la información necesaria para su desarrollo. A continuación, se presenta la solicitud de información detallada.

#### *Solicitud de información:*

- 1) Cantidad y ubicación de pozos, proporcionados en coordenadas geográficas (\*.shp), KML o KMZ (\*.kmz), UTM) o direcciones completas.
- 2) Cantidad y ubicación de pozos, proporcionados en coordenadas geográficas, UTM o direcciones completas.
- 3) Resultados de análisis de calidad de agua de los pozos, en formatos impresos o digitales como Excel (\*.xls, \*.xlsx o \*.csv).
- 4) Niveles estáticos y dinámicos de pozos activos en formato shapefile (.shp), KML o KMZ (.kmz).
- 5) Datos de hidrogeoquímica en libros de Excel o formatos vectoriales.
- 6) Información técnica sobre tipos de roca y suelo para construcción de pozos, si disponible.
- 7) Ubicación de manantiales, veneros y ojos de agua registrados.
- 8) Información sobre socavones, grietas, desplazamientos y subsidencias.

Se aclaró que, en caso de disponer de la información, Enlace Ambiental y Proyectos S.C., a cargo del estudio, llevaría un disco duro para la transferencia de datos para su análisis. Para el trabajo de campo, se solicitó colaboración para facilitar acceso a pozos y toma de muestras.



*Figura 130. Visita de campo a municipios. Fuente: propia, Enlace Ambiental y Proyectos S.C.*

## Muestreo en campo

Los muestreos se realizaron en diferentes días, dependiendo de la disponibilidad de los municipios, para realizar el recorrido bajo su acompañamiento, como se muestra en la Tabla 32.

Tabla 32. Cronograma de muestreo de pozos. Fuente: propia, Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

Cronograma de muestreo			
Etapa	Día y hora	Municipio	Pozos muestreados
Etapa 1	9 de junio del 2023 de las 10 AM a 2 PM	Ixtlahuacán de los Membrillos	3
	13 de junio del 2023 de las 8 AM a 2 PM	El Salto y Juanacatlán	3
	14 de junio del 2023 de las 10 AM a 3 PM	Zapotlanejo	4
	20 de junio del 2023 de las 8 AM a 6 PM	Tlajomulco de Zúñiga	6
Etapa 2	30 de junio del 2023 de las 8 AM a 1 PM	San Pedro Tlaquepaque	3
	4 de julio del 2023 de las 8 AM a 12 PM	Zapopan	3
Etapa 3	8 de agosto del 2023 de las 10 AM a 5 PM	Tonalá, Guadalajara y Zapopan	7
TOTAL	Muestreos del 9 de junio al 8 de agosto	9 municipios (AMG)	29 pozos

Durante cada una de las visitas se realizaron cuatro acciones principales:

1. Medición del nivel piezométrico con las sondas.
2. Purga del pozo.
3. Realización de pruebas *in situ*.
4. Obtención de 3 muestras de agua del pozo.

Se recopiló la información pertinente en cada punto de muestreo y se registró tanto en una bitácora física como en formato digital, las siguientes variables, fecha, hora, nombre del pozo, ubicación, código, observaciones, nivel dinámico, temperatura, pH, conductividad eléctrica, entre otros.

Cada una de las acciones mencionadas previamente siguió los siguientes pasos: (1) Para obtener el nivel piezométrico, se verificó si había conductos dentro de la instalación del pozo que permitieran el ingreso de sondas. En ciertos casos, esto no fue viable. Se utilizó una sonda de nivel *Wellquip USA, modelo SEP250*, y una sonda sónica *Solinist*. Para la correcta utilización de la sonda de nivel, se activó antes de introducirla en el conducto y se la dejó descender hasta detectar el nivel del agua. Por otro lado, la sonda sónica se calibró antes de la medición con valores de rango mínimo y máximo, además de la temperatura, para mejorar la precisión de los resultados. (2) Se llevó a cabo la purga de los pozos en la acción 2, para garantizar que la muestra de agua representara las condiciones del sistema hidrogeológico. La purga fue aproximadamente de 2 a 3 veces el volumen total del pozo antes de la toma de muestras. (3) Para las pruebas *in situ* en la acción 3, se emplearon dos equipos de la marca *Hanna* para medir parámetros de *pH, conductividad eléctrica y temperatura*. Se limpiaron dos vasos de vidrio con agua destilada. En uno de ellos se agregó agua destilada para calibrar los multímetros a un pH de 7 y conductividad eléctrica de 0. El otro vaso se enjuagó 2 o 3 veces con agua de pozo y luego se extrajo una muestra para medir los valores. Este proceso se repitió varias veces hasta lograr la estabilidad, un indicador de que se estaba extrayendo agua directamente del sistema hidrogeológico. Además, en cada visita se examinaron los alrededores para identificar las posibles fuentes de contaminación. Al interactuar con los encargados del pozo, se recopilaron datos relevantes sobre su construcción, operación y administración, entre otros, los cuales se documentaron con fotografías a lo largo de todo el proceso.

## Etapa 1

La primera visita de campo fue al municipio de Ixtlahuacán de los Membrillos el 9 de junio del 2023. Se visitaron cuatro pozos, de los cuales se muestrearon sólo tres, ya que el segundo no contaba con la infraestructura adecuada. Los tres pozos que se analizaron fueron: "Aguilillas" (véase Figura 131), "Buenavista (glorieta)" (véase Figura 132) y "Santa Rosa 3" (Figura 133), examinados a las 10:30, 11:40 y 12:40, respectivamente.



Figura 131. Imágenes del muestreo del pozo Aguilillas, en Ixtlahuacán de los Membrillos.



Figura 132. Imágenes del muestreo del pozo Buenavista (glorieta), en Ixtlahuacán de los Membrillos.



Figura 133. Imágenes del muestreo del pozo Santa Rosa 3, en Ixtlahuacán de los Membrillos.

La segunda visita fue a los municipios de El Salto y Juanacatlán, el día 12 de junio del 2023. En el caso de Juanacatlán, el pozo originalmente seleccionado se encontraba fuera de operación, lo que llevó a visitar el pozo denominado "Villas Europa del Oeste y Américas" (véase Figura 134) a las 12:00 p.m. En cuanto al municipio de El Salto, se programaron dos visitas a pozos, pero estaban inactivo, lo que condujo a la inspección de otro par de pozos. Los pozos que se visitaron fueron el "Pozo CIMEG" (véase Figura 136), examinado a las 8:30 a.m., y el "Pozo No. 9 El Salto" (véase Figura 135), evaluado a las 10:30 a.m.



*Figura 134. Imágenes del muestreo del pozo Villas Europa del oeste, Juanacatlán.*



*Figura 135. Imágenes del muestreo del pozo No.9, en El Salto.*



*Figura 136. Imágenes del muestreo del pozo CIMEJ, El Salto.*

La tercera visita se realizó en el municipio de Zapotlanejo, el 14 de junio del 2023. Durante esta visita, se inspeccionaron cuatro puntos para el muestreo, incluyendo tres pozos y el río Calderón. Sin embargo, el caudal del río no era lo suficientemente alto para permitir un muestreo representativo debido a retenciones que causaban un estancamiento parcial del agua (véase Figura 137). Además, uno de los pozos seleccionados no estaba en funcionamiento, lo que llevó a su sustitución por otro cercano. Al final de la visita, se realizaron un total de cuatro muestreos, ya que el último punto contaba con dos manantiales. Los pozos fueron: “Pozo San Roque” (Figura 138), “Pozo Madrigales” (Figura 139), así como los “Manantial Agua caliente (virgen)” (Figura 140) y “Manantial Agua caliente (techado)” (Figura 141). Todos estos fueron examinados a las 10:15, 11:45, y 12:50, respectivamente.



Figura 137. Imágenes del río Calderón, en Zapotlanejo



Figura 138. Imágenes del muestreo del pozo San Roque, en Zapotlanejo



Figura 139. Imágenes del muestreo del pozo Madrigales, en Zapotlanejo



Figura 140. Imágenes del muestreo del pozo Manantial Agua caliente (virgen), en Zapotlanejo





*Figura 141. Imágenes del muestreo del pozo Manantial Agua caliente (techado), en Zapotlanejo*

La cuarta y última visita de la etapa 1 se llevó a cabo en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga el 20 de junio de 2023. Durante esta visita, se seleccionaron y muestrearon un total de seis pozos. Los pozos muestreados fueron: “Pozo San Miguel Cuyutlán” (Figura 142), “Pozo 2 Cuexcomatitlán” (Figura 143), “Pozo Cimas del Sol” (Figura 144), “Pozo Santa Cruz” (Figura 145), “Pozo Campestre Santa Cruz” (Figura 146) y “Pozo Hacienda del Sur” (Figura 147), examinados a las 8:20, 10:10, 11:20, 12:56, 13:41, y 14:35, respectivamente.



*Figura 142. Imágenes del muestreo del pozo San Miguel Cuyutlán, en Tlajomulco de Zúñiga*



*Figura 143. Imágenes del muestreo del pozo 2 Cuexcomatitlán, en Tlajomulco de Zúñiga*



*Figura 144. Imágenes del muestreo del pozo Cimas del Sol, en Tlajomulco de Zúñiga*



*Figura 145. Imágenes del muestreo del pozo Santa Cruz, en Tlajomulco de Zúñiga*



*Figura 146. Imágenes del muestreo del pozo Campeste Santa Cruz, en Tlajomulco de Zúñiga*





*Figura 147. Imágenes del muestreo del pozo Hacienda del Sur, en Tlajomulco de Zúñiga*

## **Etapa 2**

La quinta visita, que marcó el inicio de la etapa 2, tuvo lugar en el municipio de San Pedro Tlaquepaque el 30 de junio de 2023. Durante esta visita, se seleccionaron tres pozos para el muestreo, aunque dos de ellos no pudieron ser visitados debido a restricciones en su infraestructura, según lo indicado por el municipio. Como alternativa, se eligieron otros dos pozos en la misma área. Los pozos fueron: “Pozo 15, Juan de la Barrera” (Figura 148), “Pozo 20, Los Olivos” (Figura 149) y “Pozo 18, Hacienda la Candelaria” (Figura 150), examinados a las 8:48, 10:33 y 12:00, respectivamente.



*Figura 148. Imágenes del muestreo del pozo 15 Juan de la Barrera, en San Pedro Tlaquepaque*



*Figura 149. Imágenes del muestreo del pozo 20 Los Olivos, en San Pedro Tlaquepaque*



*Figura 150. Imágenes del muestreo del pozo 18 Hacienda la Candelaria, en San Pedro Tlaquepaque*

En cuanto a la sexta visita, que marcó la conclusión de la etapa 2, tuvo lugar en el municipio de Zapopan el 4 de julio de 2023. Durante esta visita se seleccionaron tres pozos para su inspección, aunque uno de ellos no pudo ser visitado debido a un problema con la bomba. Ante esta situación, el municipio optó por seleccionar otro pozo. Los pozos fueron: “Pozo El Primavera” (Figura 151), “Pozo La Soledad de Nextipac” (Figura 152) y “Pozo La Teja” (Figura 153), examinados a las 8:25, 9:48 y 11:10, respectivamente.



*Figura 151. Imágenes del muestreo del pozo El Primavera, en Zapopan*



*Figura 152. Imágenes del muestreo del pozo La Soledad de Nextipac, en Zapopan*





Figura 153. Imágenes del muestreo del pozo La Teja, en Zapopan

### Etapa 3

Finalmente, la séptima y última visita tuvo lugar en los municipios de Tonalá, Guadalajara y Zapopan, el 8 de agosto de 2023, con el apoyo y acompañamiento de SIAPA y SEGIA. Durante estas visitas se realizaron inspecciones en siete pozos. Sin embargo, en dos de ellos no fue posible medir el nivel piezométrico, y en otro no se pudieron obtener muestras debido a su inactividad. Los pozos que se visitaron fueron: “La Hortaliza” (Figura 154), “Educadores Jaliscienses” (Figura 155), “Agua Azul 2” (Figura 156), “CODE” (Figura 157), “Górgoros” (Figura 158), “Tesistán” (Figura 159) y “Lechera” (Figura 160) examinados a las 10:10, 11:10, 13:00, 14:20, 15:00, 15:50 y 16:30, respectivamente.



Figura 154. Imágenes del muestreo del pozo La Hortaliza - SIAPA, en Tonalá



Figura 155. Imágenes del muestreo del pozo Educadores Jaliscienses - SIAPA, en Tonalá



*Figura 156. Imágenes del muestreo del pozo Agua Azul 2 - SIAPA, en Guadalajara*



*Figura 157. Imágenes del muestreo del pozo Code - SIAPA, en Guadalajara*



*Figura 158. Imágenes del muestreo del pozo Górgoros - SIAPA, en Guadalajara*





Figura 159. Imágenes del muestreo del pozo Tesistán - SIAPA, en Guadalajara



Figura 160. Imágenes del muestreo del pozo Lechera - SIAPA, en Zapopan

## ANEXO 4. FICHAS TÉCNICAS DE POZOS

Como se mencionó anteriormente, además del muestreo mismo, se realizaron entrevistas a los operadores para conocer temas como: infraestructura y características físicas del pozo (bomba, cisterna, tuberías, profundidad), operación (gasto L/s, nivel estático y dinámico), mantenimiento (última fecha, y frecuencia de mantenimiento a infraestructura), y observaciones en campo (relacionadas a la infraestructura, los alrededores, posibles fuentes de contaminación, etc.), con el objetivo de generar un diagnóstico completo y sus respectivas recomendaciones. A continuación, se muestran las fichas de campo para cada pozo muestreado.

Tabla 33. Ficha de campo del Pozo Aguilillas, Ixtlahuacán de los Membrillos

FICHA DE CAMPO					
Información general					
Nombre del pozo	Pozo Aguilillas				
Sistema hidrogeológico	Ixtlahuacán de los Membrillos	Municipio	Ixtlahuacán de los Membrillos		
Coordenadas UTM	Norte	686824	Oeste	2251308	
Fecha de muestreo	9/06/2023	Hora Inicio	10:30	Hora fin	11:20
Fotografía del pozo					
					
Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola	X	Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural	X	
	Ganadería		Zona Urbana	X	
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Doméstico	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	N/D				M
Nivel dinámico	N/D				M

Nivel estático	N/D		M
Capacidad de bombeo	15		L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible	De repuesto
	X		
Gasto mensual del pozo	N/D		L/s cada mes
Sistema de cloración	Sí	No	
	X		
Tipo de cloración	Hipoclorito de sodio		
<b>Observaciones en campo</b>			
Infraestructura	La infraestructura no era la adecuada para que la sonda ingresara al pozo, la manguera tenía obstrucciones que no permitían el paso para tomar el nivel del agua.		
Alrededores	El pozo se encontraba en una zona habitacional.		
Contaminación	No se observó.		
Otro:	N/D		
<b>Mantenimiento</b>			
Comentarios del último mantenimiento	No le ha hecho mantenimiento al pozo.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
Tiempo de bombeo/purga	El pozo se encontraba trabajando.		min
Nivel dinámico	N/D. La sonda se trabó a los 37 m		M
Nivel estático	N/D		M
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
Apariencia del agua	Clara	Turbia	Color:
	X		Amarillo
Olor del agua	Inolora	Fétida	Otra:
			Cloro
Temperatura del agua	26.2		°C
pH	7.4		N/A
Conductividad eléctrica	0.54		mS/cm
Arsénico	8		ppb
<b>Fotografías del muestreo</b>			
			
Medición del nivel dinámico		Toma de muestra <i>in situ</i> . Color del agua ligeramente amarilla	



Toma de muestra *in situ*



Pruebas de laboratorio, regulando temperatura

**Datos para el laboratorio**

<b>Códigos</b>	PAIM-1	PAIM-2	PAIM-2
<b>Hora de muestreo</b>	10:30	10:35	10:40
<b>Fecha de muestreo</b>	9/06/23	9/06/23	9/06/23

**Diagnóstico**

<b>Evaluación</b>	Mal estado: con obstrucciones para medición del nivel del pozo, agua de color amarilla con olor a cloro. Concentración de arsénico cerca del límite.
-------------------	--

**Recomendaciones**

Realizar un análisis de calidad del agua, para identificar el causante del color del agua.

Tabla 34. Ficha de campo del pozo Buenavista (glorieta), Ixtlahuacán de los Membrillos

<b>FICHA DE CAMPO</b>					
<b>Información general</b>					
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo Buenavista (glorieta)				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Ixtlahuacán de los Membrillos	<b>Municipio</b>	Ixtlahuacán de los Membrillos		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	685874	<b>Oeste</b>	2254990	
<b>Fecha de muestreo</b>	9/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	11:40	<b>Hora fin</b>	12:30
<b>Fotografía del pozo</b>					

Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola	X	Industrial		
	Cuerpo de Agua	A 2 km del pozo está el arroyo Los Sabinos		Matorral Y Pastizal	
	Forestal (bosque)		Zona Rural	X	
	Ganadería		Zona Urbana	X	
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Doméstico	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	N/D			M	
Nivel dinámico	N/D			M	
Nivel estático	N/D			M	
Capacidad de bombeo	N/D			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes	
Sistema de cloración	Si		No		
	X				
Tipo de cloración	Hipoclorito de sodio				
Observaciones en campo					
Infraestructura	Había dos construcciones (perforaciones) de pozos. La segunda se hizo porque la primera dejó de funcionar. Además, dentro del mismo predio, se tiene una cisterna y el equipo de cloración.				
Alrededores	Zona urbana.				
Contaminación	Posiblemente por excedente de agroquímicos.				
Otro:	N/A				
Mantenimiento					
Comentarios del último mantenimiento	Mantenimiento correctivo.				
Evaluación					
Datos tomados en campo					
Tiempo de bombeo/purga	30			min	
Nivel dinámico	22			M	
Nivel estático	N/D			M	
Parámetros determinados en campo					
Apariencia del agua	Clara	Turbia		Color:	
	X				

<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	26.3		°C
<b>pH</b>	6.3		N/A
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.54		mS/cm
<b>Arsénico</b>	12		ppb

#### Fotografías del muestreo



Medición del nivel dinámico



Color de la muestra



Calibración del equipo con agua destilada



Lavado del envase para toma de muestra para laboratorio

#### Datos para el laboratorio

<b>Códigos</b>	PBVIM-1	PBVIM-2	PBVIM-3
<b>Hora de muestreo</b>	11:40	11:45	11:50
<b>Fecha de muestreo</b>	9/06/2023	9/06/2023	9/06/2023

#### Diagnóstico

<b>Evaluación</b>	Mal estado: pozo en buenas condiciones. Concentración de arsénico rebasa el límite.
-------------------	---

#### Recomendaciones

El pozo requiere manguera de seguridad para medición del nivel.

Tabla 35. Ficha de campo del pozo Santa Rosa 3, Ixtlahuacán de los Membrillos

<b>FICHA DE CAMPO</b>	
<b>Información general</b>	
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo Santa Rosa 3

<b>Sistema hidrogeológico</b>	Ixtlahuacán de los Membrillos		<b>Municipio</b>	Ixtlahuacán de los membrillos	
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	684199	<b>Oeste</b>	2258263	
<b>Fecha de muestreo</b>	9/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	12:40	<b>Hora fin</b>	1:40
<b>Fotografía del pozo</b>					
					
<b>Uso de suelo de los alrededores del pozo</b>					
<b>Uso de suelo</b>	<b>Agrícola</b>		<b>Industrial</b>		
	<b>Cuerpo de Agua</b>		<b>Matorral Y Pastizal</b>		
	<b>Forestal (bosque)</b>		<b>Zona Rural</b>	X	
	<b>Ganadería</b>		<b>Zona Urbana</b>	X	
<b>Evaluación</b>					
<b>Datos proporcionados por el encargado</b>					
<b>Características físicas del pozo</b>					
<b>Tipo de abastecimiento</b>	<b>Público</b>	<b>Dom.</b>	<b>Industrial</b>	<b>Irrigación</b>	<b>Ganadería</b>
	X				
<b>Infraestructura del pozo</b>					
<b>Profundidad del pozo</b>	N/D			<b>M</b>	
<b>Nivel dinámico</b>	N/D			<b>M</b>	
<b>Nivel estático</b>	N/D			<b>M</b>	
<b>Capacidad de bombeo</b>	9			<b>L/s</b>	
<b>Tipo de bomba</b>	<b>Sumergible</b>	<b>No sumergible</b>		<b>De repuesto</b>	
	X				
<b>Gasto mensual del pozo</b>	N/D			<b>L/s cada mes</b>	
<b>Sistema de cloración</b>	<b>Si</b>		<b>No</b>		
	X				
<b>Tipo de cloración</b>	Hipoclorito de sodio.				
<b>Observaciones en campo</b>					

<b>Infraestructura</b>	La manguera para medir nivel tenía obstrucciones que no dejaron pasar la sonda, el pozo estaba abierto, lo cual presenta una ventana a posible contaminación del sistema hidrogeológico.		
<b>Alrededores</b>	El pozo estaba en zona habitacional.		
<b>Contaminación</b>	No se observó.		
<b>Otro:</b>	N/D		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	Mantenimiento correctivo.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	El pozo se encontraba en mantenimiento.		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	25.8		<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D		<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	25.8		<b>°C</b>
<b>pH</b>	6.4		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.27		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	3		<b>ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			
 <p><b>Medición del nivel dinámico</b></p>		 <p><b>Limpieza del equipo de calibración con agua destilada</b></p>	
 <p><b>Toma de muestra <i>in situ</i></b></p>		 <p><b>Toma de muestra para laboratorio, método sin burbujas</b></p>	

Datos para el laboratorio			
<b>Códigos</b>	PSRIM-1	PSRIM-2	PSRIM-3
<b>Hora de muestreo</b>	12:40	12:45	12:50
<b>Fecha de muestreo</b>	9/06/2023	9/06/2023	9/06/2023
Diagnóstico			
<b>Evaluación</b>	Mal estado: pozo abierto, con posibilidad de ingreso de contaminantes.		
Recomendaciones			
Facilitar la toma de muestra con una conexión de tuberías más amigable. Cerrar el pozo para evitar el ingreso de contaminantes al sistema hidrogeológico.			

Tabla 36. Ficha de campo del pozo CIMEG, El Salto

FICHA DE CAMPO					
Información general					
<b>Nombre del pozo</b>	CIMEG				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Toluquilla	<b>Municipio</b>	El Salto		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	682740	<b>Oeste</b>	2271502	
<b>Fecha de muestreo</b>	13/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	8:30	<b>Hora fin</b>	10:00
Fotografía del pozo					
Uso de suelo de los alrededores del pozo					
<b>Uso de suelo</b>	<b>Agrícola</b>		<b>Industrial</b>	X	
	<b>Cuerpo de Agua</b>		<b>Matorral Y Pastizal</b>		
	<b>Forestal (bosque)</b>		<b>Zona Rural</b>		
	<b>Ganadería</b>		<b>Zona Urbana</b>	X	
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					

Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	350				M
Nivel dinámico	N/D				M
Nivel estático	N/D				M
Capacidad de bombeo	N/D				L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D				L/s cada mes
Sistema de cloración	Sí		No		
	X				
Tipo de cloración	Hipoclorito de sodio				
Observaciones en campo					
Infraestructura	Tanque de llenado en la autopista, para abastecimiento de las "Colonia Colomos, hacienda vieja, colonias al lado de la industrial. No funcionan varios mecanismos del pozo.				
Alrededores	Zona industrial, se presenta inseguridad por robo de agua.				
Contaminación	Posiblemente de la zona industrial.				
Otro:	Se está construyendo otro pozo para el mismo CIMEG.				
Mantenimiento					
Comentarios del último mantenimiento	Mantenimiento correctivo.				
Evaluación					
Datos tomados en campo					
Tiempo de bombeo/purga	Pozo en funcionamiento al llegar.				min
Nivel dinámico	N/D. La sonda se trabó a los 128 m				M
Nivel estático	N/D				M
Parámetros determinados en campo					
Apariencia del agua	Clara	Turbia		Color:	
	X				
Olor del agua	Inolora	Fétida		Otra:	
	X				
Temperatura del agua	29.6				°C
pH	8.3				N/A
Conductividad eléctrica	0.24				mS/cm
Arsénico	5				ppb
Fotografías del muestreo					

			
<b>Medición del nivel dinámico</b>	<b>Captura de información relevante</b>		
			
<b>Toma de muestra para laboratorio</b>	<b>Toma de muestras <i>in situ</i></b>		
Datos para el laboratorio			
<b>Códigos</b>	PCIES-1	PCIES-2	PCIES-3
<b>Hora de muestreo</b>	8:30	8:35	8:40
<b>Fecha de muestreo</b>	13/06/2023	13/06/2023	13/06/2023
Diagnóstico			
<b>Evaluación</b>	Regular estado: con obstrucciones para medición del nivel del pozo.		
Recomendaciones			
Habilitar mecanismos del pozo. Habilitar infraestructura para aumentar la seguridad del pozo.			

Tabla 37. Ficha de campo del pozo No.9, El Salto

FICHA DE CAMPO					
Información general					
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo No. 9 El Salto				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Toluquilla	<b>Municipio</b>	El Salto		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	689982	<b>Oeste</b>	2270461	
<b>Fecha de muestreo</b>	13/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	9:33	<b>Hora fin</b>	10:50
Fotografía del pozo					



Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana	X	
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	N/D			M	
Nivel dinámico	N/D			M	
Nivel estático	N/D			M	
Capacidad de bombeo	Aproximadamente 20			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes	
Sistema de cloración	Si		No		
	X				
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio				
Observaciones en campo					
Infraestructura	La manguera para medir nivel se encontraba obstruida y la sonda no pasó.				
Alrededores	El pozo se encontraba en una zona habitacional.				
Contaminación	No se observó.				
Otro:	N/D				
Mantenimiento					

<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	Mantenimiento correctivo.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	Pozo en funcionamiento al llegar.		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	N/D. La sonda se trabó a los 194 m		<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D		<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	36.5		<b>°C</b>
<b>pH</b>	7.4		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.41		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	Menor a 2		<b>ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			
			
<b>Purga y toma de muestra</b>		<b>Toma de muestra <i>in situ</i></b>	
			
<b>Toma de muestra, método de muestra sin burbujas</b>		<b>Medición del nivel dinámico</b>	
<b>Datos para el laboratorio</b>			
<b>Códigos</b>	PNES-1	PNES-2	PNES-3
<b>Hora de muestreo</b>	10:47	10:53	10:55
<b>Fecha de muestreo</b>	13/06/2023	13/06/2023	13/06/2023
<b>Diagnóstico</b>			
<b>Evaluación</b>	Regular estado: con obstrucciones para medición del nivel del pozo.		
<b>Recomendaciones</b>			
Mejorar la infraestructura para mediciones de niveles.			

Tabla 38. Ficha de campo pozo Villas Europa del Oeste y Américas, Juanacatlán

FICHA DE CAMPO					
Información general					
Nombre del pozo	Villas Europa del Oeste y Américas				
Sistema hidrogeológico	Los Altos	Municipio	Juanacatlán		
Coordenadas UTM	Norte	694405	Oeste	2275251	
Fecha de muestreo	13/06/2023	Hora Inicio	12:00	Hora fin	1:00
Fotografía del pozo					
					
Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural	X	
	Ganadería		Zona Urbana		
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	N/D				M
Nivel dinámico	N/D				M
Nivel estático	N/D				M
Capacidad de bombeo	N/D				L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D				L/s cada mes

	Si	No	
Sistema de cloración	X		
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio		
<b>Observaciones en campo</b>			
Infraestructura	El pozo contaba con la infraestructura de para la medición de nivel.		
Alrededores	Se encontraba en una zona habitacional.		
Contaminación	No se detectó.		
Otro:	N/D		
<b>Mantenimiento</b>			
Comentarios del último mantenimiento	Mantenimiento correctivo.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
Tiempo de bombeo/purga	N/D	min	
Nivel dinámico	N/D	M	
Nivel estático	N/D	M	
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
Apariencia del agua	Clara	Turbia	Color:
	X - Gaseosa		
Olor del agua	Inolora	Fétida	Otra:
	X		
Temperatura del agua	26.8	°C	
pH	7.4	N/A	
Conductividad eléctrica	0.41	mS/cm	
Arsénico	7	ppb	
<b>Fotografías del muestreo</b>			
			
<b>Medición del nivel</b>		<b>Toma de muestra <i>in situ</i></b>	

			
<b>Purga y toma de muestra</b>		<b>Calibración del aparato</b>	
<b>Datos para el laboratorio</b>			
<b>Códigos</b>	PUVJ-1	PUVJ-2	PUVJ-3
<b>Hora de muestreo</b>	1:44pm	1:07pm	1:16pm
<b>Fecha de muestreo</b>	13/06/2023	13/06/2023	13/06/2023
<b>Diagnóstico</b>			
<b>Evaluación</b>	Regular estado: agua altamente gaseosa. Concentración de arsénico cerca del límite.		
<b>Recomendaciones</b>			
Indagar el porqué del estado gaseoso del agua.			

Tabla 39. Ficha de campo del pozo San Roque, Zapotlanejo

<b>FICHA DE CAMPO</b>				
<b>Información general</b>				
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo San Roque			
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Los Altos	<b>Municipio</b>	Zapotlanejo	
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	697970	<b>Oeste</b>	2285997
<b>Fecha de muestreo</b>	14/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	10:15	<b>Hora fin</b> 11:20
<b>Fotografía del pozo</b>				
				
<b>Uso de suelo de los alrededores del pozo</b>				

Uso de suelo	Agrícola	X	Industrial		
	Cuerpo de Agua	Arroyo intermitente	Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana		
<b>Evaluación</b>					
<b>Datos proporcionados por el encargado</b>					
<b>Características físicas del pozo</b>					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X	X			
<b>Infraestructura del pozo</b>					
Profundidad del pozo	380			M	
Nivel dinámico	243 hace 12 años. Se pensaba que se encontraba a 280 m			M	
Nivel estático	N/D			M	
Capacidad de bombeo	N/D			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes	
Sistema de cloración	Sí		No		
	X				
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio				
<b>Observaciones en campo</b>					
Infraestructura	Cisterna y líneas correctamente marcadas, según la sustancia o reactivo.				
Alrededores	Zona rural y agricultura.				
Contaminación	El posible uso excesivo de agroquímicos en el campo.				
Otro:	Opera casi constantemente, con tubería (línea de aproximadamente 4 km), para la zona urbana de Zapotlanejo. Pipas vienen a surtir de agua para poblados cercanos.				
<b>Mantenimiento</b>					
Comentarios del último mantenimiento	Mantenimiento correctivo.				
<b>Evaluación</b>					
<b>Datos tomados en campo</b>					
Tiempo de bombeo/purga	No requirió purga expresamente, ya que antes de llegar, ya habían llenado 3 pipas, lo que activó el sistema de extracción.			min	
Nivel dinámico	245			M	
Nivel estático	N/D			M	
<b>Parámetros determinados en campo</b>					
Apariencia del agua	Clara	Turbia		Color:	
	X				
Olor del agua	Inolora	Fétida		Otra:	

	X		
Temperatura del agua	35.5		°C
pH	8.3		N/A
Conductividad eléctrica	0.13		mS/cm
Arsénico	Menor a 2		ppb

#### Fotografías del muestreo



Medición de nivel dinámico



Toma de muestra *in situ*



Toma de muestra, en cisterna, antes de adición de cloro



Toma de muestra para laboratorio

#### Datos para el laboratorio

Códigos	PSRZ-1	PSRZ-2	PSRZ-3
Hora de muestreo	10:30	10:33	10:34
Fecha de muestreo	14/06/2023	14/06/2023	14/06/2023

#### Diagnóstico

<b>Evaluación</b>	Pozo en buenas condiciones. Pozo en operación, con mucho flujo de vehículos para su abastecimiento.
-------------------	---

#### Recomendaciones

Generar ficha de abastecimiento, para los vehículos que toman agua del pozo (la ficha puede contener, por ejemplo: día, hora, cantidad de agua tomada y destino del agua).  
Cambiar a una manguera más ancha. La actual funciona, sin embargo, al estar tan abajo el nivel, cuesta trabajo sacarla.

Tabla 40. Ficha de campo del pozo Madrigales, Zapotlanejo

FICHA DE CAMPO	
Información general	
Nombre del pozo	Pozo Madrigales

Sistema hidrogeológico	El Salto		Municipio	Zapotlanejo	
Coordenadas UTM	Norte		710176	Oeste	2287095
Fecha de muestreo	14/06/2023	Hora Inicio	11:45	Hora fin	12:30
Fotografía del pozo					
					
Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua	X El río Calderón se encuentra a 500 m	Matorral Y Pastizal	X	
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería	X	Zona Urbana		
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	N/D				M
Nivel dinámico	Aproximadamente 100				M
Nivel estático	N/D				M
Capacidad de bombeo	3 tiempos de bombeo: de 7am a 10 am, de 11:30am a 2pm y de 5:30pm a 8:30pm para un total de 8:30 h. Para mayo pasó de 147,580m <sup>3</sup> a 153,348m <sup>3</sup>				L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	190 (estimado)				L/s cada mes
Sistema de cloración	Sí		No		
	X				

<b>Tipo de cloración</b>	Hipoclorito de Sodio		
<b>Observaciones en campo</b>			
<b>Infraestructura</b>	Tubería subterránea que lleva a una cisterna en el poblado cercano. Sistema para bombeo temporalizado.		
<b>Alrededores</b>	Para ingresar al pozo en coche, se debe transitar por propiedad privada.		
<b>Contaminación</b>	Posiblemente de la presa Calderón.		
<b>Otro:</b>	Cuando se visitó, se tenía programada la fumigación del almacén. Se genera una bitácora, a mano, de extracción. Cercado, con almacén para cloro y sistema de operaciones.		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	Mantenimiento correctivo.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	30		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	98		<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D		<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	27.5		<b>°C</b>
<b>pH</b>	7.8		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.12		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	No se detectó Arsénico		<b>ppb</b>





**Toma de muestra para laboratorio**



**Prueba *in situ* de arsénico**

**Datos para el laboratorio**

Códigos	PMAZ-1	PMAZ-2	PMAZ-3
Hora de muestreo	12:17	12:20	12:18
Fecha de muestreo	14/06/2023	14/06/2023	14/06/2023

**Diagnóstico**

**Evaluación** Pozo en buenas condiciones.

**Recomendaciones**

Tener un mejor control de la bitácora de extracción. Intentar integrar un medidor automático al sistema de extracción, ligado al encendido y apagado automático del pozo.

*Tabla 41. Ficha de campo del pozo manantial agua caliente (virgen), Zapotlanejo*

FICHA DE CAMPO				
Información general				
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo - Manantial agua caliente (virgen)			
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Los Altos	<b>Municipio</b>	Zapotlanejo	
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	706547	<b>Oeste</b>	2280941
<b>Fecha de muestreo</b>	14/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	12:30pm	<b>Hora fin</b> 3:00pm
Fotografía del pozo				

Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola	X	Industrial		
	Cuerpo de Agua	X	Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)	X	Zona Rural	X	
	Ganadería		Zona Urbana		
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	N/D			M	
Nivel dinámico	5 metros, no se le permite subir más por la extracción constante			M	
Nivel estático	N/D			M	
Capacidad de bombeo	N/A			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	N/A	N/A		N/A	
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes	
Sistema de cloración	Sí		No		
			X		
Tipo de cloración	N/A				
Observaciones en campo					
Infraestructura	Perforación de la roca genera que esta emane del suelo.				
Alrededores	Existe un balneario a 300 metros, mismo que cierra o abre el acceso (abre a las 9AM).				
Contaminación	Zona urbana cercana.				
Otro:	Se trata de una perforación que genera una naciente. Extracción constante.				
Mantenimiento					
Comentarios del último mantenimiento	Mantenimiento correctivo.				
Evaluación					
Datos tomados en campo					
Tiempo de bombeo/purga	N/A			min	
Nivel dinámico	3.5			M	
Nivel estático	N/D			M	
Parámetros determinados en campo					
Apariencia del agua	Clara	Turbia		Color:	
	X				

Olor del agua	Inolora	Fétida	Otra:
	X		
Temperatura del agua	30.8		°C
pH	9.4		N/A
Conductividad eléctrica	0.11		mS/cm
Arsénico	Menor a 2		ppb

#### Fotografías del muestreo



Toma de muestra *in situ*



Medición del nivel



Toma de muestra (improvisado)



Toma de muestra *in situ*

#### Datos para el laboratorio

Códigos	PACVZ-1	PACVZ-2	PACVZ-3
Hora de muestreo	2:32	2:37	2:40
Fecha de muestreo	14/06/2023	14/06/2023	14/06/2023

#### Diagnóstico

Evaluación	Perforación tipo naciente.
------------	----------------------------

#### Recomendaciones

Tener un método de medición de caudal.  
Indagar para conocer qué genera la diferencia de nivel en pozos tan cercanos.

Tabla 42. Ficha de campo del pozo manantial agua caliente (techado), Zapotlanejo

FICHA DE CAMPO			
Información general			
Nombre del pozo	Pozo - Manantial agua caliente (techado)		
Sistema hidrogeológico	Los Altos	Municipio	Zapotlanejo

Coordenadas UTM	Norte	706535	Oeste	2280941	
Fecha de muestreo	14/06/2023	Hora Inicio	12:30pm	Hora fin	3:00pm

### Fotografía del pozo



### Uso de suelo de los alrededores del pozo

Uso de suelo	Agrícola	X	Industrial	
	Cuerpo de Agua	X	Matorral Y Pastizal	
	Forestal (bosque)	X	Zona Rural	X
	Ganadería		Zona Urbana	

### Evaluación

#### Datos proporcionados por el encargado

#### Características físicas del pozo

Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				

#### Infraestructura del pozo

Profundidad del pozo	N/D			M
Nivel dinámico	1 metro, no se le permite subir más por la extracción constante			M
Nivel estático	N/D			M
Capacidad de bombeo	N/A			L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto
	N/A	N/A		N/A
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes
Sistema de cloración	Sí		No	
			X	
Tipo de cloración	N/A			

#### Observaciones en campo

Infraestructura	Pozo con casita para su protección. Vidrio roto en las ventanas.
Alrededores	Existe un balneario a 300 metros, mismo que cierra o abre el acceso (abre a las 9AM).

<b>Contaminación</b>	Zona urbana cercana.		
<b>Otro:</b>	Se trata de una perforación que genera una naciente. Extracción constante.		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	Mantenimiento correctivo.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	N/A		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	1 (constante por la tubería hacia Zapotlanejo)		<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D		<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	30.5		<b>°C</b>
<b>pH</b>	9.4		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.11		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	Menor a 2		<b>ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			
			
<b>Toma de muestras para laboratorio</b>		<b>Toma de muestra <i>in situ</i></b>	
			
<b>Toma de muestra, palpando el bote para quitar burbujas</b>		<b>Infraestructura del pozo</b>	
<b>Datos para el laboratorio</b>			
<b>Códigos</b>	PACZ-1	PACZ-2	PACZ-3

<b>Hora de muestreo</b>	2:36	2:41	2:45
<b>Fecha de muestreo</b>	14/06/2023	14/06/2023	14/06/2023
<b>Diagnóstico</b>			
<b>Evaluación</b>	Perforación tipo naciente en buenas condiciones.		
<b>Recomendaciones</b>			
Generar un arreglo a la puerta, para evitar la filtración de agua de lluvia dentro de la infraestructura. Tener un método de medición de caudal. Indagar para conocer qué genera la diferencia de nivel en pozos tan cercanos.			

Tabla 43. Ficha de campo del pozo San Miguel Cuyutlán, Tlajomulco de Zúñiga

<b>FICHA DE CAMPO</b>					
<b>Información general</b>					
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo San Miguel Cuyutlán				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Cajititlán	<b>Municipio</b>	Tlajomulco de Zúñiga		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	667544	<b>Oeste</b>	2258928	
<b>Fecha de muestreo</b>	20/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	8:20	<b>Hora fin</b>	10:00
<b>Fotografía del pozo</b>					
					
<b>Uso de suelo de los alrededores del pozo</b>					
<b>Uso de suelo</b>	<b>Agrícola</b>		<b>Industrial</b>		
	<b>Cuerpo de Agua</b>		<b>Matorral Y Pastizal</b>		
	<b>Forestal (bosque)</b>		<b>Zona Rural</b>		
	<b>Ganadería</b>		<b>Zona Urbana</b>	X	
<b>Evaluación</b>					
<b>Datos proporcionados por el encargado</b>					
<b>Características físicas del pozo</b>					
<b>Tipo de abastecimiento</b>	<b>Público</b>	<b>Dom.</b>	<b>Industrial</b>	<b>Irrigación</b>	<b>Ganadería</b>
	X				
<b>Infraestructura del pozo</b>					

Profundidad del pozo	300		M
Nivel dinámico	N/D		M
Nivel estático	N/D		M
Capacidad de bombeo	12		L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible	De repuesto
	X		
Gasto mensual del pozo			L/s cada mes
Sistema de cloración	Sí	No	
		X - fue robado el dispensador automático	
Tipo de cloración	N/A		
<b>Observaciones en campo</b>			
Infraestructura	Nido de ratas debajo de la caseta de control. Almacén de cloro sin puerta. Requiere medidor de presión nuevo.		
Alrededores			
Contaminación			
Otro:	En buen estado. Se abastece al fraccionamiento en la mañana. Las colonias en la tarde. Tandeos por horas en todo el pueblo por horario.		
<b>Mantenimiento</b>			
Comentarios del último mantenimiento	Mantenimiento correctivo.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
Tiempo de bombeo/purga	50, el pozo ya se encontraba operando		min
Nivel dinámico	N/D. La sonda se atoraba		M
Nivel estático	N/D		M
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
Apariencia del agua	Clara	Turbia	Color:
	X		
Olor del agua	Inolora	Fétida	Otra:
	X		
Temperatura del agua	29.2		°C
pH	9.3		N/A
Conductividad eléctrica	0.11		mS/cm
Arsénico	Menor a 2		ppb
<b>Fotografías del muestreo</b>			

			
<b>Medición del nivel dinámico (con sonda de nivel)</b>	<b>Medición del nivel dinámico (con sonda sónica)</b>		
			
<b>Toma de muestra <i>in situ</i></b>	<b>Almacén de cloro, tubería para inyección automática (sin funcionar, pues se robaron el dispensador)</b>		
Datos para el laboratorio			
Códigos	PZMT-1	PZMT-2	PZMT-3
Hora de muestreo	9:49	9:51	9:53
Fecha de muestreo	20/06/2023	20/06/2023	20/06/2023
Diagnóstico			
Evaluación	Regular estado: requiere dispensador automático de cloro, así como mayor seguridad en las instalaciones. Plaga de ratas en las instalaciones.		
Recomendaciones			
Comprar e integrar el sistema de dispensador automático del pozo, instalar puerta de seguridad para evitar futuros robos, tanto a la zona del pozo como al almacén de cloro.			

Tabla 44. Ficha de campo del pozo 2 Cuexcomatitlán, Tlajomulco de Zúñiga

FICHA DE CAMPO					
Información general					
Nombre del pozo	Pozo 2 Cuexcomatitlán				
Sistema hidrogeológico	Cajititlán	Municipio	Tlajomulco de Zúñiga		
Coordenadas UTM	Norte	670838	Oeste	2260295	
Fecha de muestreo	20/06/2023	Hora Inicio	10:10	Hora fin	10:50
Fotografía del pozo					



Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua	X Laguna de Cajititlán	Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana	X	
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	164			M	
Nivel dinámico	N/D			M	
Nivel estático	126 (del 18 de mayo del 2022)			M	
Capacidad de bombeo	12			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo				L/s cada mes	
Sistema de cloración	Sí		No		
			X – se tienen problemas con el dispensador, ya que funciona en intervalos desde hace 2 años		
Tipo de cloración	Hipoclorito de sodio				
Observaciones en campo					
Infraestructura	<p>Terreno cercado entre casas con operador/vigilante 24 horas.            Se bombea a una cisterna y después por gravedad.            Uso de agua doméstico para aproximadamente 2,000 personas.            La bomba opera 22 horas al día.            Se cambió la bomba, ya que hace 6 años operaba con 14 L/s y se redujo hasta 6 L/s, que es insuficiente para la comunidad.</p>				

<b>Alrededores</b>			
<b>Contaminación</b>	En caso de alguna falla o fractura, podría conectarse con la Laguna de Cajititlán.		
<b>Otro:</b>	El operador comenta que cada 2 meses viene un químico por parte del municipio a tomar muestras de calidad del agua. No comparte resultados con el operador. Bomba en buen estado, bomba instalada desde 18 de mayo del 2022. Abastece exclusivamente a Cuexcomatitlán.		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	El 18 de mayo del 2022 se instaló la nueva bomba. Mantenimiento correctivo.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	En funcionamiento al ingresar, más de 20 min		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	N/D		<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D		<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	37		<b>°C</b>
<b>pH</b>	9		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.11		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	3		<b>ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			
 <p><b>Purga del pozo</b></p>		 <p><b>Medición del nivel dinámico</b></p>	



Toma de muestras *in situ*



Toma de muestras para laboratorio

**Datos para el laboratorio**

<b>Códigos</b>	PCAT-1	PCAT-2	PCAT-3
<b>Hora de muestreo</b>	10:43	10:46	10:45
<b>Fecha de muestreo</b>	20/06/2023	20/06/2023	20/06/2023

**Diagnóstico**

**Evaluación** Regular estado: requiere dispensador automático de cloro.

**Recomendaciones**

Instalar dispensador automático de cloro.

Tabla 45. Ficha de campo del pozo Cimas del Sol, Tlajomulco de Zúñiga

<b>FICHA DE CAMPO</b>					
<b>Información general</b>					
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo Cimas del Sol				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Cajititlán	<b>Municipio</b>	Tlajomulco de Zúñiga		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	665393	<b>Oeste</b>	2264524	
<b>Fecha de muestreo</b>	20/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	11:20	<b>Hora fin</b>	12:25
<b>Fotografía del pozo</b>					
<b>Uso de suelo de los alrededores del pozo</b>					

Uso de suelo	Agrícola	X	Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana	X	
<b>Evaluación</b>					
<b>Datos proporcionados por el encargado</b>					
<b>Características físicas del pozo</b>					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
<b>Infraestructura del pozo</b>					
Profundidad del pozo	310			M	
Nivel dinámico	N/D			M	
Nivel estático	116 (mayo del 2023)			M	
Capacidad de bombeo	25 a 30			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes	
Sistema de cloración	Sí		No		
			X		
Tipo de cloración	Hipoclorito de sodio				
<b>Observaciones en campo</b>					
Infraestructura	Cisterna y distribución por gravedad. La cisterna se llena de 3 a 4 veces al día. Se estimó que la cisterna tiene capacidad de 14,000 a 15,000 L. Bomba nueva desde mayo del 2023 Bomba con encendido y apagado automático.				
Alrededores	Fraccionamiento, acceso no restringido al pozo (existía una malla que estaba dañada).				
Contaminación	Posible contaminación por el posible uso excesivo de agroquímicos de los predios agrícolas cercanos.				
Otro:	Al instalar la bomba se contabilizaron 36 tramos de 6.1 metros. El operador comenta que, al instalar la bomba, escribieron información en el almacén y zona de control. Sin embargo, él no fue informado.				
<b>Mantenimiento</b>					
Comentarios del último mantenimiento	Mantenimiento correctivo.				
<b>Evaluación</b>					
<b>Datos tomados en campo</b>					
Tiempo de bombeo/purga	No se encontraba en funcionamiento al ingresar Purga de 15 min.			min	
Nivel dinámico	68			M	
Nivel estático	N/D			M	
<b>Parámetros determinados en campo</b>					
Apariencia del agua	Clara	Turbia	Color:		

	X		
Olor del agua	Inolora	Fétida	Otra:
	X		
Temperatura del agua	32.5		°C
pH	9		N/A
Conductividad eléctrica	0.19		mS/cm
Arsénico	5		ppb

### Fotografías del muestreo



Medición del nivel dinámico



Purga del pozo



Toma de muestra *in situ*



Lavado del envase para toma de muestra para laboratorio

### Datos para el laboratorio

Códigos	PCST-1	PCST2	PCST-3
Hora de muestreo	12:16	12:17	12:20
Fecha de muestreo	20/06/2023	20/06/2023	20/06/2023

### Diagnóstico

#### Evaluación

Pozo en buenas condiciones. Requiere trabajos de limpieza de pasto crecido. Falta especificar el sistema de cloración, si es en la cisterna o en el pozo.

### Recomendaciones

Resguardar la zona rehabilitando la malla perimetral.  
Exigir a los encargados del mantenimiento, que otorguen una constancia de los niveles y valores actuales del pozo.

Tabla 46 Ficha de campo del pozo Santa Cruz, Tlajomulco de Zúñiga

FICHA DE CAMPO					
Información general					
Nombre del pozo	Pozo Santa Cruz de la Loma (Tepetates)				
Sistema hidrogeológico	San Isidro	Municipio	Tlajomulco de Zúñiga		
Coordenadas UTM	Norte	651280	Oeste	2265847	
Fecha de muestreo	20/06/2023	Hora Inicio	12:56	Hora fin	1:26
Fotografía del pozo					
					
Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola	X	Industrial	X	
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana	X	
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	100				M
Nivel dinámico	Aproximadamente 15m En 1997 se encontraba a 10m				M
Nivel estático	N/D				M
Capacidad de bombeo	12-14				L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible	De repuesto		

	X		
<b>Gasto mensual del pozo</b>			L/s cada mes
<b>Sistema de cloración</b>	<b>Sí</b>	<b>No</b>	
	X		
<b>Tipo de cloración</b>	Hipoclorito de sodio		
<b>Observaciones en campo</b>			
<b>Infraestructura</b>	Planta potabilizadora por ósmosis. Se tiene bitácora manual de la entrada y salida de los valores de dureza total, pH, TDS, temperatura y cloro residual.		
<b>Alrededores</b>			
<b>Contaminación</b>	Se encuentra cercano a la zona industrial, con instalaciones de PISA, entre otras.		
<b>Otro:</b>	Se presentó una lluvia ligera el 17 de junio del 2023. Pozo en buenas condiciones. Cuenta con planta potabilizadora por ósmosis, en funcionamiento.		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>			
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	En funcionamiento al ingresar, más 30 min		min
<b>Nivel dinámico</b>	17		M
<b>Nivel estático</b>	N/D		M
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	30		°C
<b>pH</b>	8.1		N/A
<b>Conductividad eléctrica</b>	9.21		mS/cm
<b>Arsénico</b>	10		ppb
<b>Fotografías del muestreo</b>			



**Medición del nivel dinámico**



**Purga y prueba *in situ***



**Medición de prueba *in situ***



**Pruebas para laboratorio, selladas**

**Datos para el laboratorio**

<b>Códigos</b>	PSCT-1	PSCT-2	PSCT-3
<b>Hora de muestreo</b>	1:13	1:14	1:16
<b>Fecha de muestreo</b>	20/06/2023	20/06/2023	20/06/2023

**Diagnóstico**

**Evaluación**

El pozo opera correctamente. La planta por ósmosis parece funcionar correctamente. Concentración de arsénico cerca del límite.

**Recomendaciones**

Revisar los niveles de arsénico.

*Tabla 47. Ficha de campo del pozo Campestre Santa Cruz, Tlajomulco de Zúñiga*

<b>FICHA DE CAMPO</b>					
<b>Información general</b>					
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo Campestre Santa Cruz				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	San Isidro	<b>Municipio</b>	Tlajomulco de Zúñiga		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	656774	<b>Oeste</b>	2266173	
<b>Fecha de muestreo</b>	20/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	1:41	<b>Hora fin</b>	2:14
<b>Fotografía del pozo</b>					



Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana	X	
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	La bomba se encuentra a 80 metros.			M	
Nivel dinámico	el 15 de junio del 2023 se midió 62 metros.			M	
Nivel estático				M	
Capacidad de bombeo	8			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes	
Sistema de cloración	Sí		No		
	X				
Tipo de cloración	Hipoclorito de sodio				
Observaciones en campo					
Infraestructura	Bomba operando 24h. Operaba con una bomba de 16hp, que se descompuso y se sustituyó por una de 15hp, hasta el arreglo de la primera. Abastece la zona por tandeos.				
Alrededores					

<b>Contaminación</b>	Posiblemente, por la zona expuesta del pozo, que genera ingreso por lluvias.		
<b>Otro:</b>	Se presentó una lluvia ligera el 17 de junio del 2023. En operación, con eficiencia reducida. Inició operaciones hace más de 30 años.		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	Cambio de bomba. Mantenimiento correctivo.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	En funcionamiento al ingresar		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	66.3		<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D		<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	29.5		<b>°C</b>
<b>pH</b>	8.1		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.14		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	Menor a 2		<b>ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			
 <p><b>Medición del nivel dinámico</b></p>		 <p><b>Purga del pozo</b></p>	
 <p><b>Tubería del pozo al descubierto</b></p>		 <p><b>Toma de muestra <i>in situ</i></b></p>	
<b>Datos para el laboratorio</b>			

<b>Códigos</b>	PCT-1	PCT-2	PCT-3
<b>Hora de muestreo</b>	2:05	2:06	2:07
<b>Fecha de muestreo</b>	20/06/2023	20/06/2023	20/06/2023
<b>Diagnóstico</b>			
<b>Evaluación</b>	Mal estado: pozo abierto, con posibilidad de ingreso de contaminantes. Bombeo insuficiente a la comunidad		
<b>Recomendaciones</b>			
Sellar el pozo para que no esté expuesto a la posible contaminación por arrastre de lluvias o ingreso de fauna.			

Tabla 48. Ficha de campo del pozo Hacienda del Sur, Tlajomulco de Zúñiga

<b>FICHA DE CAMPO</b>					
<b>Información general</b>					
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo Hacienda del Sur				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Toluquilla	<b>Municipio</b>	Tlajomulco de Zúñiga		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	659316	<b>Oeste</b>	2272295	
<b>Fecha de muestreo</b>	20/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	14:35	<b>Hora fin</b> 3:35	
<b>Fotografía del pozo</b>					
					
<b>Uso de suelo de los alrededores del pozo</b>					
<b>Uso de suelo</b>	<b>Agrícola</b>		<b>Industrial</b>		
	<b>Cuerpo de Agua</b>		<b>Matorral Y Pastizal</b>		
	<b>Forestal (bosque)</b>		<b>Zona Rural</b>		
	<b>Ganadería</b>		<b>Zona Urbana</b>	X	
<b>Evaluación</b>					
<b>Datos proporcionados por el encargado</b>					
<b>Características físicas del pozo</b>					
<b>Tipo de abastecimiento</b>	<b>Público</b>	<b>Dom.</b>	<b>Industrial</b>	<b>Irrigación</b>	<b>Ganadería</b>
	X				
<b>Infraestructura del pozo</b>					
<b>Profundidad del pozo</b>	N/D			<b>M</b>	

Nivel dinámico	110 hace 10 años		M
Nivel estático	N/D		M
Capacidad de bombeo	7-15		L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible	De repuesto
	X		
Gasto mensual del pozo			L/s cada mes
Sistema de cloración	Sí	No	
		X – No se tenía cloro al momento de la visita.	
Tipo de cloración	Hipoclorito de sodio		
<b>Observaciones en campo</b>			
Infraestructura	Pozo en correcto funcionamiento las 24 horas, directo a la red hidráulica de la zona, junto con otros 3 pozos.		
Alrededores			
Contaminación			
Otro:	Abejas de la zona tomaban agua de una pequeña fuga del pozo. Se presentó una lluvia ligera el 17 de junio del 2023. Pozo funcional, según los operadores, casi no falla. Abastece el pueblo de San Agustín.		
<b>Mantenimiento</b>			
Comentarios del último mantenimiento	Mantenimiento correctivo. Casi no lo requiere.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
Tiempo de bombeo/purga	En funcionamiento al ingresar, 10 min		min
Nivel dinámico	278		M
Nivel estático	N/D		M
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
Apariencia del agua	Clara	Turbia	Color:
	X		
Olor del agua	Inolora	Fétida	Otra:
	X		
Temperatura del agua	32		°C
pH	8		N/A
Conductividad eléctrica	0.14		mS/cm
Arsénico	Menor a 2		ppb
<b>Fotografías del muestreo</b>			

			
<b>Medición del nivel dinámico</b>	<b>Purga del pozo</b>		
			
<b>Equipo de medición para su calibración</b>	<b>Toma de muestra <i>in situ</i></b>		
<b>Datos para el laboratorio</b>			
<b>Códigos</b>	PHST-1	PHST-2	PHST-3
<b>Hora de muestreo</b>	3:08	3:09	3:10
<b>Fecha de muestreo</b>	20/06/2023	20/06/2023	20/06/2023
<b>Diagnóstico</b>			
<b>Evaluación</b>	Mal estado: no funcionan varios mecanismos del pozo. Requiere instrumentos de medición del caudal y presión, así como mejor control en el uso y almacenamiento de cloro.		
<b>Recomendaciones</b>			
Indagar más sobre la estructura del pozo, e instalar medidores de presión y caudal.			

Tabla 49. Ficha de campo del pozo 15 Juan de la Barrera, San Pedro Tlaquepaque

<b>FICHA DE CAMPO</b>				
<b>Información general</b>				
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo 15, Juan de la Barrera			
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Toluquilla	<b>Municipio</b>	San Pedro Tlaquepaque	
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	673345	<b>Oeste</b>	2275333
<b>Fecha de muestreo</b>	30/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	8:48	<b>Hora fin</b> 10:00
<b>Fotografía del pozo</b>				



Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana	X	
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	163			M	
Nivel dinámico	109			M	
Nivel estático	N/D			M	
Capacidad de bombeo	8			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes	
Sistema de cloración	Sí		No		
	X				
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio				
Observaciones en campo					
Infraestructura	Se bombea a un aljibe elevado. La bomba se prende y apaga automáticamente para mantener lleno el aljibe. Alimenta pipas.				
Alrededores	Zona urbana.				

<b>Contaminación</b>	No se detectó.		
<b>Otro:</b>	Lluvias leves. Contiene una fuga. (presente desde el cambio de la bomba abril 2023).		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	El municipio realiza una visita mensual a los pozos de su administración, revisando el estado, así como algunos aspectos químicos.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	En funcionamiento al ingresar, 20 min		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	66.61		<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D		<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	23.5		<b>°C</b>
<b>pH</b>	6.5		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.33		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	N/D		<b>ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			
			
<p><b>Registro en bitácora del pozo. Se anotan los valores obtenidos <i>in situ</i></b></p>		<p><b>Medición del nivel dinámico</b></p>	



Toma de muestra *in situ*



Toma de muestra para laboratorio

**Datos para el laboratorio**

Códigos	PJBTQ-1	PJBTQ-2	PJBTQ-3
Hora de muestreo	9:41	9:43	9:44
Fecha de muestreo	30/06/2023	30/06/2023	30/06/2023

**Diagnóstico**

<b>Evaluación</b>	Pozo en buen funcionamiento. Con fuga leve en la tubería.
-------------------	---

**Recomendaciones**

Comunicarse con la CFE para arreglar la pérdida de electricidad durante y después de tormentas. Arreglar la fuga generada por el cambio de bomba.

Tabla 50. Ficha de campo del pozo 20 Los Olivos, San Pedro Tlaquepaque

**FICHA DE CAMPO**

**Información general**

<b>Nombre del pozo</b>	Pozo 20, Los Olivos				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Toluquilla		<b>Municipio</b>	San Pedro Tlaquepaque	
	<b>Coordenadas UTM</b>		<b>Norte</b>	668337	
		<b>Oeste</b>	2276643		
<b>Fecha de muestreo</b>	30/06/2023	<b>Hora Inicio</b>	10:33	<b>Hora fin</b>	11:11

**Fotografía del pozo**



Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana		X
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	330				M
Nivel dinámico	163				M
Nivel estático	N/D				M
Capacidad de bombeo	11.5				L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D				L/s cada mes
Sistema de cloración	Sí		No		
	X				
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio				
Observaciones en campo					
Infraestructura	Cisterna. Se notó un mayor almacenamiento de Hipoclorito de Sodio que en los otros pozos visitados. Alimenta pipas.				
Alrededores	Fraccionamiento.				
Contaminación	No se detectó.				
Otro:	Lluvias leves. Buen estado. Abastece el fraccionamiento Los Olivos. (aproximadamente 10,000 habitantes)				
Mantenimiento					
Comentarios del último mantenimiento	El municipio realiza una visita mensual a los pozos de su administración, revisando el estado, así como algunos aspectos químicos.				
Evaluación					
Datos tomados en campo					
Tiempo de bombeo/purga	En funcionamiento al ingresar, 20 min				min
Nivel dinámico	161.7				M
Nivel estático	N/D				M
Parámetros determinados en campo					
Apariencia del agua	Clara	Turbia		Color:	

	X		
Olor del agua	Inolora	Fétida	Otra:
	X		
Temperatura del agua	28.4		°C
pH	7.4		N/A
Conductividad eléctrica	0.24		mS/cm
Arsénico	N/D		ppb
<b>Fotografías del muestreo</b>			
			
<b>Medición del nivel dinámico</b>	<b>Purga y toma de temperatura</b>		
			
<b>Toma de parámetros in situ</b>	<b>Toma de muestra para laboratorio</b>		
<b>Datos para el laboratorio</b>			
Códigos	PLOTQ-1	PLOTQ-2	PLOTQ-3
Hora de muestreo	11:07	11:08	11:09
Fecha de muestreo	30/06/2023	30/06/2023	30/06/2023
<b>Diagnóstico</b>			
Evaluación	Pozo en buenas condiciones.		
<b>Recomendaciones</b>			
N/A			

Tabla 51. Ficha de campo del pozo 18 Hacienda la Candelaria, San Pedro Tlaquepaque

FICHA DE CAMPO				
Información general				
Nombre del pozo	Pozo 18, Hacienda la Candelaria			
Sistema hidrogeológico	Toluquilla	Municipio	San Pedro Tlaquepaque	
	Coordenadas UTM	Norte	661659	Oeste 2275396

Fecha de muestreo	30/06/2023	Hora Inicio	12:00	Hora fin	12:50
<b>Fotografía del pozo</b>					
					
<b>Uso de suelo de los alrededores del pozo</b>					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana		X
<b>Evaluación</b>					
<b>Datos proporcionados por el encargado</b>					
<b>Características físicas del pozo</b>					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
<b>Infraestructura del pozo</b>					
Profundidad del pozo	243			M	
Nivel dinámico	153			M	
Nivel estático	N/D			M	
Capacidad de bombeo	18			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes	
Sistema de cloración	Sí		No		
	X				
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio				
<b>Observaciones en campo</b>					
Infraestructura	Cisterna elevada. En buen funcionamiento. Alimenta pipas.				

<b>Alrededores</b>			
<b>Contaminación</b>	No se detectó.		
<b>Otro:</b>	Lluvias leves. Buen estado. Abastece el fraccionamiento La Candelaria y parcialmente Santa Anita.		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	El municipio realiza una visita mensual a los pozos de su administración, revisando el estado, así como algunos aspectos químicos.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	En funcionamiento al ingresar, 20 min		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>			<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>			<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	30.6		<b>°C</b>
<b>pH</b>	8		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.18		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	N/D		<b>ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			
			
<b>Toma de nivel dinámico (sonda métrica)</b>		<b>Corroboración del nivel dinámico (sonda digital)</b>	



**Toma de parámetros *in situ***



**Sellado de muestras para laboratorio**

Datos para el laboratorio			
<b>Códigos</b>	PHCTQ-1	PHCTQ-2	PHCTQ-3
<b>Hora de muestreo</b>	12:43	12:45	12:46
<b>Fecha de muestreo</b>	30/06/2023	30/06/2023	30/06/2023
Diagnóstico			
<b>Evaluación</b>	Pozo en buen funcionamiento.		
Recomendaciones			

*Tabla 52. Ficha de campo del pozo El Primavera, Zapopan*

FICHA DE CAMPO					
Información general					
<b>Nombre del pozo</b>	Pozo El Primavera				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Atemajac	<b>Municipio</b>	Zapopan		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	649755	<b>Oeste</b>	2292078	
<b>Fecha de muestreo</b>	04/07/2023	<b>Hora Inicio</b>	8:25	<b>Hora fin</b>	9:18
Fotografía del pozo					

Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola	X	Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal	X	
	Forestal (bosque)		Zona Rural	X	
	Ganadería	X	Zona Urbana		
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	189 (9 tramos de 6.4 metros cada uno).			M	
Nivel dinámico	Entre 53 y 60 metros.			M	
Nivel estático	Se comenta que el nivel estático después de lluvias está, aproximadamente, a 9 metros y a 20 metros en secas.			M	
Capacidad de bombeo	15			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
	X				
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes	
Sistema de cloración	Sí		No		
			X – No había cloro en las instalaciones		
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio				
Observaciones en campo					
Infraestructura	La bomba actual opera las 24 horas y es de 40hp. Alimenta una cisterna a unos 90 metros del sitio.				
Alrededores	Aunque el sitio está cercado, un habitante se acercó a señalar que hay tomas ilegales en la instalación.				
Contaminación	Posiblemente, por infiltración de agroquímicos y desagüe no tratado.				
Otro:	Para tomar muestra antes del cloro, se necesitaba llave Stilson. Cuando se muestreó no había cloro, por lo que se tomó la muestra después de la entrada de cloro. Inicio periodo de lluvias. Alimenta la colonia La Primavera. No incluye la venta del Astillero.				
Mantenimiento					
Comentarios del último mantenimiento	El municipio mide mensualmente el estado de los pozos, principalmente el nivel piezométrico y el cloro residual. Son aproximadamente 40 pozos, lo que indica 10 por semana.				
Evaluación					
Datos tomados en campo					
Tiempo de bombeo/purga	La purga se realizó de 8:29 a 9:00. No se tenía cloro en el pozo. Se tomó la muestra en la toma después del cloro.			min	

Nivel dinámico	30.5	M	
Nivel estático	N/D	M	
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
Apariencia del agua	Clara	Turbia	Color:
	X		
Olor del agua	Inolora	Fétida	Otra:
		Sí, ligeramente a gases (H <sub>2</sub> S)	
Temperatura del agua	23.2	°C	
pH	6.35	N/A	
Conductividad eléctrica	0.12	mS/cm	
Arsénico	Menor a 2	ppb	

**Fotografías del muestreo**



Manguera amplia para medir nivel.



Toma de muestras, método sin burbujas



Toma de medición con sonda sónica.  
Revisión de muestras sin aire



Pruebas de Arsénico *in situ*

**Datos para el laboratorio**

Códigos	PEPZ-1	PEPZ-2	PEPZ-3
Hora de muestreo	9:41	9:45	9:44
Fecha de muestreo	05/07/2023	05/07/2023	05/07/2023

**Diagnóstico**

Evaluación	Regular estado: al visitar no se tenía cloro en las instalaciones.
------------	--

### Recomendaciones

Mayor control en el almacenamiento de cloro, para evitar tiempos sin su administración.  
Mayor seguridad en las instalaciones para evitar tomas ilegales de agua.

*Tabla 53. Ficha de campo del pozo La Soledad de Nextipac, Zapopan*

FICHA DE CAMPO					
Información general					
Nombre del pozo	Pozo La Soledad de Nextipac				
Sistema hidrogeológico	Atemajac	Municipio	Zapopan		
Coordenadas UTM	Norte	653116.5	Oeste	2296406.3	
Fecha de muestreo	04/07/2023	Hora Inicio	9:48	Hora fin	10:40
Fotografía del pozo					
					
Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola	X	Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural	X	
	Ganadería		Zona Urbana		
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	218				M
Nivel dinámico	140 en noviembre del 2022. 140 en mayo 2023				M
Nivel estático	124.5 En noviembre del 2022. 90 en mayo 2022				M

<b>Capacidad de bombeo</b>	De 13 a 15		L/s
<b>Tipo de bomba</b>	<b>Sumergible</b>	<b>No sumergible</b>	<b>De repuesto</b>
	X		
<b>Gasto mensual del pozo</b>	N/D		L/s cada mes
<b>Sistema de cloración</b>	<b>Sí</b>		<b>No</b>
			X – La línea de cloro estaba cortada
<b>Tipo de cloración</b>	Hipoclorito de Sodio		
<b>Observaciones en campo</b>			
<b>Infraestructura</b>	La bomba se encuentra a unos 160 metros. En época de estiaje el pozo opera aproximadamente de 5 AM a 7 PM, en época de lluvias se reduce.		
<b>Alrededores</b>	Aunque el sitio está cercado, la línea de cloro cortada muestra el acceso indebido de habitantes.		
<b>Contaminación</b>	Posiblemente, por la infiltración de agroquímicos.		
<b>Otro:</b>	El pozo vibra. Al instalar la nueva bomba no se acoplaron correctamente las tuberías. Alimenta la zona de Nextipac, hasta la carretera. Inició periodo de lluvias.		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	El municipio mide mensualmente el estado de los pozos, principalmente el nivel piezométrico y el cloro residual. Son aproximadamente 40 pozos, lo que indica 10 por semana. El pozo vibra. Al instalar la nueva bomba no se acoplaron correctamente las tuberías.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	La purga se realizó de 9:42 a 10:20. Cubeta de 20L en 35.18s.		min
<b>Nivel dinámico</b>	81.13 por sonda sónica. No se pudo corroborar con la sonda de nivel, ya que se atoraba a los 50 metros.		M
<b>Nivel estático</b>	N/D		M
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
			Cloro
<b>Temperatura del agua</b>	27.8		°C
<b>pH</b>	8.1		N/A
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.6		mS/cm
<b>Arsénico</b>	Menor a 2		ppb
<b>Fotografías del muestreo</b>			

 <p><b>Tubería angosta para toma de nivel</b></p>	 <p><b>Toma de nivel dinámico</b></p>		
 <p><b>Revisión de burbujas en las muestras para laboratorio</b></p>	 <p><b>Resultados de la prueba rápida de Arsénico</b></p>		
<b>Datos para el laboratorio</b>			
<b>Códigos</b>	PSNZ-1	PSNZ -2	PSNZ -3
<b>Hora de muestreo</b>	10:23	10:24	10:26
<b>Fecha de muestreo</b>	05/07/2023	05/07/2023	05/07/2023
<b>Diagnóstico</b>			
<b>Evaluación</b>	Mal estado: pozo abierto, con posibilidad de ingreso de contaminantes. El pozo vibra, error al instalar la nueva bomba. Línea de cloro cortada.		
<b>Recomendaciones</b>			
<p>Cuidar la infraestructura del pozo para evitar su vibración. Igualmente sellar el pozo para evitar la infiltración directa de contaminantes por lluvias o introducción de animales. Tener mucho cuidado, ya que el pozo se encuentra en una zona vulnerable.</p>			

*Tabla 54. Ficha de campo del pozo La Teja, Zapopan*

**FICHA DE CAMPO**  
**Información general**



<b>Nombre del pozo</b>	Pozo La Teja				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Atemajac	<b>Municipio</b>	Zapopan		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	662646.7	<b>Oeste</b>	2300954.9	
<b>Fecha de muestreo</b>	04/07/2023	<b>Hora Inicio</b>	11:10	<b>Hora fin</b>	12:00

#### Fotografía del pozo



#### Uso de suelo de los alrededores del pozo

<b>Uso de suelo</b>	<b>Agrícola</b>	X	<b>Industrial</b>	
	<b>Cuerpo de Agua</b>		<b>Matorral Y Pastizal</b>	
	<b>Forestal (bosque)</b>		<b>Zona Rural</b>	X
	<b>Ganadería</b>		<b>Zona Urbana</b>	

#### Evaluación

#### Datos proporcionados por el encargado

#### Características físicas del pozo

<b>Tipo de abastecimiento</b>	<b>Público</b>	<b>Dom.</b>	<b>Industrial</b>	<b>Irrigación</b>	<b>Ganadería</b>
	X				

#### Infraestructura del pozo

<b>Profundidad del pozo</b>	165			<b>M</b>
<b>Nivel dinámico</b>	112 abril 2023			<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	73.4 diciembre del 2022			<b>M</b>
<b>Capacidad de bombeo</b>	Max 32, promedio 20 a 22			<b>L/s</b>
<b>Tipo de bomba</b>	<b>Sumergible</b>	<b>No sumergible</b>		<b>De repuesto</b>
	X			
<b>Gasto mensual del pozo</b>				<b>L/s cada mes</b>
<b>Sistema de cloración</b>	<b>Sí</b>		<b>No</b>	

<b>Tipo de cloración</b>	Hipoclorito de Sodio		
<b>Observaciones en campo</b>			
<b>Infraestructura</b>	La infraestructura y el pozo se construyeron y empezaron a operar aproximadamente hace 5 años. La bomba funciona 2 horas cada día (lo que tarda en llenar la cisterna nueva, pues la anterior contaba con muchas fugas).		
<b>Alrededores</b>			
<b>Contaminación</b>	Posiblemente por la infiltración de agroquímicos.		
<b>Otro:</b>	Inició el periodo de lluvias. Alimenta a la comunidad de Copalita.		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	El municipio mide mensualmente el estado de los pozos, principalmente el nivel piezométrico y el cloro residual. Son aproximadamente 40 pozos, lo que indica 10 por semana.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	El pozo <b>no</b> se encontraba operando cuando llegamos (se apagó a las 10AM). Se realizó una purga de 11:16 a 11:20 (el caudal es extremadamente alto).	<b>min</b>	
<b>Nivel dinámico</b>	91	<b>M</b>	
<b>Nivel estático</b>	83.7	<b>M</b>	
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
		Sí, ligeramente a gases (huevo podrido)	
<b>Temperatura del agua</b>	25.7		<b>°C</b>
<b>pH</b>	6.7		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.12		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	Menor a 2		<b>Ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			



 <p><b>Toma del nivel piezométrico</b></p>	 <p><b>Purga del pozo</b></p>		
 <p><b>Toma de muestras <i>in situ</i> y calibración del equipo</b></p>	 <p><b>Toma de muestras para laboratorio</b></p>		
<b>Datos para el laboratorio</b>			
<b>Códigos</b>	PSNZ-1	PSNZ-2	PSNZ-3
<b>Hora de muestreo</b>	11:38	11:39	11:42
<b>Fecha de muestreo</b>	05/07/2023	05/07/2023	05/07/2023
<b>Diagnóstico</b>			
<b>Evaluación</b>	Pozo en buenas condiciones. Olor desagradable en el pozo.		
<b>Recomendaciones</b>			
Revisar la causante del olor			

Tabla 55. Ficha de campo del pozo La Hortaliza - SIAPA, Tonalá

<b>FICHA DE CAMPO</b>					
<b>Información general</b>					
<b>Nombre del pozo</b>	La Hortaliza - SIAPA				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Atemajac	<b>Municipio</b>	Tonalá		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	680820	<b>Oeste</b>	2284246	
<b>Fecha de muestreo</b>	08/08/2023	<b>Hora Inicio</b>	10:10am	<b>Hora fin</b>	11:00am

### Fotografía del pozo



### Uso de suelo de los alrededores del pozo

Uso de suelo	Agrícola	Industrial
	Cuerpo de Agua	Matorral Y Pastizal
	Forestal (bosque)	Zona Rural
	Ganadería	Zona Urbana

### Evaluación

#### Datos proporcionados por el encargado

#### Características físicas del pozo

Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				

#### Infraestructura del pozo

Profundidad del pozo	N/D			M
Nivel dinámico	N/D			M
Nivel estático	N/D			M
Capacidad de bombeo	11 a 12			L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible	De repuesto	
	X			
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes
Sistema de cloración	Sí		No	
	X			
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio			

#### Observaciones en campo

Infraestructura	Pozo en regulares condiciones, el agua caliente y las fugas constantes propician el crecimiento de lama. En la cabina de control se tiene un medidor de caudal acumulado, los datos se recaban diariamente. El pozo funciona las 24h.
Alrededores	Se denota la inseguridad de la zona, por robos a los operadores.

<b>Contaminación</b>			
<b>Otro:</b>	El periodo de lluvias intensas inició a finales de junio 2023 (mes y medio previo al muestreo)		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	N/D		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	El pozo se encontraba en funcionamiento		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	81		<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D		<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	36.3		<b>°C</b>
<b>pH</b>	7.8		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.2		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	N/D		<b>ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			
			
<b>Medición del nivel dinámico</b>	<b>Toma de muestra <i>in situ</i></b>		
			
<b>Toma de muestra para laboratorio</b>	<b>Pozo enlamedo, por goteo y agua caliente</b>		
<b>Diagnóstico</b>			

<b>Evaluación</b>	Regular estado: enlamado por fugas y agua caliente.
<b>Recomendaciones</b>	
Evaluar las zonas con goteo y enlamadas para reemplazar las secciones correspondientes.	

Tabla 56. Ficha de campo del pozo Educadores Jaliscienses - SIAPA, Tonalá

FICHA DE CAMPO					
Información general					
<b>Nombre del pozo</b>	Educadores Jaliscienses - SIAPA				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Atemajac	<b>Municipio</b>	Tonalá		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	682059	<b>Oeste</b>	2283254	
<b>Fecha de muestreo</b>	08/08/2023	<b>Hora Inicio</b>	11:00am	<b>Hora fin</b> 12:00pm	
Fotografía del pozo					
					
Uso de suelo de los alrededores del pozo					
<b>Uso de suelo</b>	<b>Agrícola</b>		<b>Industrial</b>		
	<b>Cuerpo de Agua</b>		<b>Matorral Y Pastizal</b>		
	<b>Forestal (bosque)</b>		<b>Zona Rural</b>		
	<b>Ganadería</b>		<b>Zona Urbana</b>	X	
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
<b>Tipo de abastecimiento</b>	<b>Público</b>	<b>Dom.</b>	<b>Industrial</b>	<b>Irrigación</b>	<b>Ganadería</b>
	X				
Infraestructura del pozo					
<b>Profundidad del pozo</b>	N/D			<b>M</b>	
<b>Nivel dinámico</b>	N/D			<b>M</b>	
<b>Nivel estático</b>	N/D			<b>M</b>	
<b>Capacidad de bombeo</b>				<b>L/s</b>	
<b>Tipo de bomba</b>	<b>Sumergible</b>	<b>No sumergible</b>		<b>De repuesto</b>	

	X		
<b>Gasto mensual del pozo</b>	N/D		L/s cada mes
<b>Sistema de cloración</b>	<b>Sí</b>	<b>No</b>	
	X		
<b>Tipo de cloración</b>	Hipoclorito de Sodio		
<b>Observaciones en campo</b>			
<b>Infraestructura</b>	Se tiene cloro en las instalaciones y se utiliza correctamente. Dentro de la instalación se encuentra un antiguo tanque elevado para distribuir el agua por gravedad. Actualmente se tiene una cisterna. En la cabina de control se tiene un medidor de caudal acumulado. Los datos se recaban diariamente. El pozo funciona 20h al día.		
<b>Alrededores</b>	Se destaca que los pobladores tienen recelo a SIAPA y no les gusta ver el agua "tirarse" (cuando se purga y limpia el pozo).		
<b>Contaminación</b>			
<b>Otro:</b>	El periodo de lluvias intensas inició a finales de junio 2023 (mes y medio previo al muestreo)		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	N/D		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	El pozo se encontraba en funcionamiento		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	79.- La sonda métrica se atora a los 54 metros.		<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D		<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	32.3		<b>°C</b>
<b>pH</b>	8		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.16		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	N/D		<b>ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			

 <p><b>Purga del pozo</b></p>	 <p><b>Medición del nivel dinámico</b></p>
 <p><b>Toma de muestra <i>in situ</i></b></p>	 <p><b>Toma de muestra para laboratorio</b></p>
<b>Diagnóstico</b>	
<b>Evaluación</b>	Pozo en buenas condiciones.
<b>Recomendaciones</b>	
Ampliar la tubería de medición del nivel piezométrico.	

Tabla 57. Ficha de campo del pozo Agua Azul 2 - SIAPA, Guadalajara

<b>FICHA DE CAMPO</b>					
<b>Información general</b>					
<b>Nombre del pozo</b>	Agua Azul 2 - SIAPA				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Atemajac	<b>Municipio</b>	Guadalajara		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	672025	<b>Oeste</b>	2285221	
<b>Fecha de muestreo</b>	08/08/2023	<b>Hora Inicio</b>	1:00pm	<b>Hora fin</b>	1:35pm
<b>Fotografía del pozo</b>					



Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana		X
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	N/D				M
Nivel dinámico	N/D				M
Nivel estático	N/D				M
Capacidad de bombeo	N/D				L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
		X			
Gasto mensual del pozo	N/D				L/s cada mes
Sistema de cloración	Sí		No		
	X - se clora en la cisterna				
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio				
Observaciones en campo					
Infraestructura	Pozo elevado totalmente sellado sin tubería para medir niveles piezométricos. El pozo es del SIAPA, pero es operado por los guardabosques, donde solo prenden o apagan la bomba. SIAPA es el encargado de dar mantenimiento. La bomba envía agua a una cisterna y tanque, para uso de pipas y del parque Agua Azul				
Alrededores	Dentro del parque Agua Azul.				
Contaminación					

<b>Otro:</b>	El periodo de lluvias intensas inició a finales de junio 2023 (mes y medio previo al muestreo)		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	No. Comentan los guardabosques que desde hace 6 meses se derrama agua utilizada para el enfriamiento de la bomba (exceso de agua). El acompañante de SIAPA comenta que es normal.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	El pozo no se encontraba en funcionamiento		<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	No tiene manguera u hoyo para medir		<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	No tiene manguera u hoyo para medir		<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	N/D		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	N/D		
<b>Temperatura del agua</b>	25		<b>°C</b>
<b>pH</b>	7.6		<b>N/A</b>
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.58		<b>mS/cm</b>
<b>Arsénico</b>	N/D		<b>ppb</b>
<b>Fotografías del muestreo</b>			
			
<b>Toma de muestra <i>in situ</i></b>		<b>Toma de muestra para laboratorio</b>	
			
<b>Sellado de muestras para laboratorio</b>		<b>Agua para enfriar la bomba, desbordándose</b>	
<b>Diagnóstico</b>			
<b>Evaluación</b>	Pozo en buenas condiciones.		
<b>Recomendaciones</b>			

Evaluar, según el instructivo de operación de la bomba elevada, la cantidad de agua que realmente se necesita para enfriamiento y ajustar.  
 Generar la infraestructura para tener una línea de medición del nivel piezométrico.

Tabla 58. Ficha de campo del pozo CODE - SIAPA, Guadalajara

FICHA DE CAMPO					
Información general					
Nombre del pozo	CODE - SIAPA				
Sistema hidrogeológico	Atemajac		Municipio	Guadalajara	
Coordenadas UTM		Norte	672097	Oeste	2289857
Fecha de muestreo	08/08/2023	Hora Inicio	2:20pm	Hora fin	2:33pm
Fotografía del pozo					
					
Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana		X
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	N/D				M
Nivel dinámico	N/A				M
Nivel estático	N/D				M
Capacidad de bombeo	N/A				L/s
Tipo de bomba	Sumergible		No sumergible		De repuesto

		X	
<b>Gasto mensual del pozo</b>	N/A-pozo parado		L/s cada mes
<b>Sistema de cloración</b>	<b>Sí</b>		<b>No</b>
			N/A
<b>Tipo de cloración</b>	N/A		
<b>Observaciones en campo</b>			
<b>Infraestructura</b>			
<b>Alrededores</b>	En la esquina del CODE.		
<b>Contaminación</b>			
<b>Otro:</b>	Pozo sin operar desde el 2022. La bomba instalada es demasiado potente y las tuberías truenan, pues no se diseñó correctamente su integración al sistema.		
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	Sin operar desde hace 1 año.		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	N/A		min
<b>Nivel dinámico</b>	N/A		M
<b>Nivel estático</b>	64		M
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>
	X		
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>
	X		
<b>Temperatura del agua</b>	N/A		°C
<b>pH</b>	N/A		N/A
<b>Conductividad eléctrica</b>	N/A		mS/cm
<b>Arsénico</b>	N/A		ppb
<b>Fotografías del muestreo</b>			
			
<b>Medición del nivel estático</b>		<b>Medición del nivel estático, sonda sónica</b>	
<b>Diagnóstico</b>			

<b>Evaluación</b>	Regular estado: al visitar no se encontraba el sitio limpio (sofá abandonado y otros artículos considerados basura a la intemperie)
<b>Recomendaciones</b>	
Revisar la infraestructura de la zona, para generar los cambios óptimos y restaurar el uso del pozo, ya sea tal y como se encuentra o con los cambios que requieran.	

Tabla 59. Ficha de campo del pozo Górgoros - SIAPA, Guadalajara

FICHA DE CAMPO					
Información general					
<b>Nombre del pozo</b>	Górgoros - SIAPA				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Atemajac	<b>Municipio</b>	Guadalajara		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	668455	<b>Oeste</b>	2289857	
<b>Fecha de muestreo</b>	08/08/2023	<b>Hora Inicio</b>	3:00pm	<b>Hora fin</b>	3:30pm
Fotografía del pozo					
					
Uso de suelo de los alrededores del pozo					
<b>Uso de suelo</b>	<b>Agrícola</b>		<b>Industrial</b>		
	<b>Cuerpo de Agua</b>		<b>Matorral Y Pastizal</b>		
	<b>Forestal (bosque)</b>		<b>Zona Rural</b>		
	<b>Ganadería</b>		<b>Zona Urbana</b>	X	
Evaluación					
Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
<b>Tipo de abastecimiento</b>	<b>Público</b>	<b>Dom.</b>	<b>Industrial</b>	<b>Irrigación</b>	<b>Ganadería</b>
	X				
Infraestructura del pozo					
<b>Profundidad del pozo</b>	N/D				<b>M</b>
<b>Nivel dinámico</b>	N/D				<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D				<b>M</b>

Capacidad de bombeo	N/D		L/s
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible	De repuesto
		X	
Gasto mensual del pozo	N/D		L/s cada mes
Sistema de cloración	Sí	No	
	X		
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio		
<b>Observaciones en campo</b>			
Infraestructura	Pozo elevado totalmente y sellado, sin tubería para medir niveles piezométricos. El pozo se encuentra por abajo del nivel del suelo, dentro de un hoyo. Debajo del pozo se encuentra una cisterna. No se tienen instrumentos de medición de caudal o presión. Al funcionar el pozo, se prende y apaga constantemente (en intervalos de 3-5 minutos).		
Alrededores	Dentro del parque de providencia, Silvano Barba.		
Contaminación			
Otro:	El periodo de lluvias intensas inició a finales de junio 2023 (mes y medio previo al muestreo)		
<b>Mantenimiento</b>			
Comentarios del último mantenimiento	N/D		
<b>Evaluación</b>			
<b>Datos tomados en campo</b>			
Tiempo de bombeo/purga	15 min		min
Nivel dinámico	No tiene manguera de medición		M
Nivel estático	No tiene manguera de medición		M
<b>Parámetros determinados en campo</b>			
Apariencia del agua	Clara	Turbia	Color:
	X		
Olor del agua	Inolora	Fétida	Otra:
	X		
Temperatura del agua	26.5		°C
pH	7.1		N/A
Conductividad eléctrica	0.22		mS/cm
Arsénico	N/D		ppb
<b>Fotografías del muestreo</b>			



Tubería de escape de aire (negro)



Toma de muestra para laboratorio

**Diagnóstico**

**Evaluación** Regular estado: requiere instrumentos de medición de caudal.

**Recomendaciones**

Incrementar la altura de la cerca de protección, para instalar los instrumentos necesarios y que estos no sean robados.

Tabla 60. Ficha de campo del pozo Tesistán - SIAPA, Guadalajara

FICHA DE CAMPO					
Información general					
Nombre del pozo	Tesistán - SIAPA				
Sistema hidrogeológico	Atemajac	Municipio	Guadalajara		
Coordenadas UTM	Norte	667551	Oeste	2288045	
Fecha de muestreo	08/08/2023	Hora Inicio	3:50pm	Hora fin	4:10pm
Fotografía del pozo					
Uso de suelo de los alrededores del pozo					
Uso de suelo	Agrícola		Industrial		
	Cuerpo de Agua		Matorral Y Pastizal		
	Forestal (bosque)		Zona Rural		
	Ganadería		Zona Urbana	X	
Evaluación					

Datos proporcionados por el encargado					
Características físicas del pozo					
Tipo de abastecimiento	Público	Dom.	Industrial	Irrigación	Ganadería
	X				
Infraestructura del pozo					
Profundidad del pozo	N/D			M	
Nivel dinámico	N/D			M	
Nivel estático	N/D			M	
Capacidad de bombeo	N/D			L/s	
Tipo de bomba	Sumergible	No sumergible		De repuesto	
		X			
Gasto mensual del pozo	N/D			L/s cada mes	
Sistema de cloración	Sí		No		
	X				
Tipo de cloración	Hipoclorito de Sodio				
Observaciones en campo					
Infraestructura	Pozo elevado, con manguera de medición de nivel piezométrico angosta. La toma de agua antes de la adición de cloro no es apta para tomar muestras. La segunda toma, después del posible ingreso de cloro, es apta para tomar muestras. Instalaciones amplias, con cisterna.				
Alrededores					
Contaminación					
Otro:	El periodo de lluvias intensas inició a finales de junio 2023 (mes y medio previo al muestreo)				
Mantenimiento					
Comentarios del último mantenimiento	N/D				
Evaluación					
Datos tomados en campo					
Tiempo de bombeo/purga	Pozo en funcionamiento al ingresar			min	
Nivel dinámico	110 con sonda sónica			M	
Nivel estático	N/D			M	
Parámetros determinados en campo					
Apariencia del agua	Clara	Turbia		Color:	
	X				
Olor del agua	Inolora	Fétida		Otra:	
	X				
Temperatura del agua	25			°C	
pH	7.5			N/A	



<b>Conductividad eléctrica</b>	310	mS/cm
<b>Arsénico</b>	N/D	ppb
<b>Fotografías del muestreo</b>		
		
	<b>Medición del nivel dinámico</b>	<b>Toma de muestra <i>in situ</i></b>
<b>Diagnóstico</b>		
<b>Evaluación</b>	Regular estado: requiere instrumentos de medición de caudal.	
<b>Recomendaciones</b>		
Limpiar la zona de las partes y conexiones metálicas acumuladas.		

Tabla 61. Ficha de campo del pozo Lechera - SIAPA, Zapopan

<b>FICHA DE CAMPO</b>					
<b>Información general</b>					
<b>Nombre del pozo</b>	Lechera - SIAPA				
<b>Sistema hidrogeológico</b>	Atemajac	<b>Municipio</b>	Zapopan		
<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Norte</b>	666462	<b>Oeste</b>	2282491	
<b>Fecha de muestreo</b>	08/08/2023	<b>Hora Inicio</b>	4:30pm	<b>Hora fin</b>	5:00pm
<b>Fotografía del pozo</b>					
					
<b>Uso de suelo de los alrededores del pozo</b>					
<b>Uso de suelo</b>	<b>Agrícola</b>		<b>Industrial</b>		
	<b>Cuerpo de Agua</b>		<b>Matorral Y Pastizal</b>		
	<b>Forestal (bosque)</b>		<b>Zona Rural</b>		

	<b>Ganadería</b>		<b>Zona Urbana</b>	<b>X</b>
<b>Evaluación</b>				
<b>Datos proporcionados por el encargado</b>				
<b>Características físicas del pozo</b>				
<b>Tipo de abastecimiento</b>	<b>Público</b>	<b>Dom.</b>	<b>Industrial</b>	<b>Irrigación</b>
	X			
<b>Infraestructura del pozo</b>				
<b>Profundidad del pozo</b>	N/D			<b>M</b>
<b>Nivel dinámico</b>	N/D			<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D			<b>M</b>
<b>Capacidad de bombeo</b>	N/D			<b>L/s</b>
<b>Tipo de bomba</b>	<b>Sumergible</b>	<b>No sumergible</b>		<b>De repuesto</b>
		X		
<b>Gasto mensual del pozo</b>	N/D			<b>L/s cada mes</b>
<b>Sistema de cloración</b>	<b>Sí</b>		<b>No</b>	
	X			
<b>Tipo de cloración</b>	Hipoclorito de Sodio			
<b>Observaciones en campo</b>				
<b>Infraestructura</b>	Bomba elevada, con manguera angosta para medición del nivel piezométrico. Infraestructura del pozo dañada, oxidada por el exterior, se ve como si se estuviera descarapelando.			
<b>Alrededores</b>				
<b>Contaminación</b>				
<b>Otro:</b>	El periodo de lluvias intensas inició a finales de junio 2023 (mes y medio previo al muestreo)			
<b>Mantenimiento</b>				
<b>Comentarios del último mantenimiento</b>	N/D			
<b>Evaluación</b>				
<b>Datos tomados en campo</b>				
<b>Tiempo de bombeo/purga</b>	El pozo se encontraba en operación			<b>min</b>
<b>Nivel dinámico</b>	43 con sonda sónica			<b>M</b>
<b>Nivel estático</b>	N/D			<b>M</b>
<b>Parámetros determinados en campo</b>				
<b>Apariencia del agua</b>	<b>Clara</b>	<b>Turbia</b>	<b>Color:</b>	
	X			
<b>Olor del agua</b>	<b>Inolora</b>	<b>Fétida</b>	<b>Otra:</b>	
	X			
<b>Temperatura del agua</b>	24.6			<b>°C</b>
<b>pH</b>	7			<b>N/A</b>

<b>Conductividad eléctrica</b>	0.26	mS/cm
<b>Arsénico</b>	N/D	ppb

**Fotografías del muestreo**



**Manguera angosta para la medición del nivel**



**Toma de muestra *in situ***



**Toma de muestra para laboratorio**



**Pozo oxidado y carcomido**

**Diagnóstico**

**Evaluación**

Regular estado: requiere instrumentos de medición de caudal.

**Recomendaciones**

Analizar el estado del pozo y reemplazar las partes dañadas. Instalar los instrumentos de medición de caudal y presión correspondientes.

## ANEXO 5. RESULTADOS DEL MUESTREO

En los trabajos de campo se tomaron mediciones del nivel dinámico (véase Figura 161), además de pruebas *in situ* de: temperatura, pH, conductividad eléctrica y arsénico. Con estos valores se puede conocer características fisicoquímicas del agua. En total, se muestrearon 29 pozos en diferentes municipios: 3 en Ixtlahuacán de los Membrillos, 2 en El Salto, 1 en Juanacatlán, 4 en Zapotlanejo, 6 en Tlajomulco de Zúñiga, 3 en San Pedro Tlaquepaque, 3 en Zapopan, 7 pozos bajo la administración de SIAPA (2 en Tonalá, 4 en Guadalajara y 1 en Zapopan). De estos 29 pozos, en 8 no se midió el nivel dinámico, debido a que la infraestructura del pozo no se encontraba en condiciones adecuadas. Los 21 pozos en los que sí se logró medir el nivel, algunos destacaron. En el municipio de Zapotlanejo, los dos pozos denominados Manantial Agua Caliente (techo y virgen) presentaron niveles de 3.5 metros y 1 metro. En cuanto a los pozos con bombas de extracción, como el pozo Santa Cruz (Tlajomulco de Zúñiga) tuvo un nivel de 17 metros. Sin embargo, el pozo Hacienda del Sur, en el mismo municipio, registró un nivel dinámico de 278 metros.

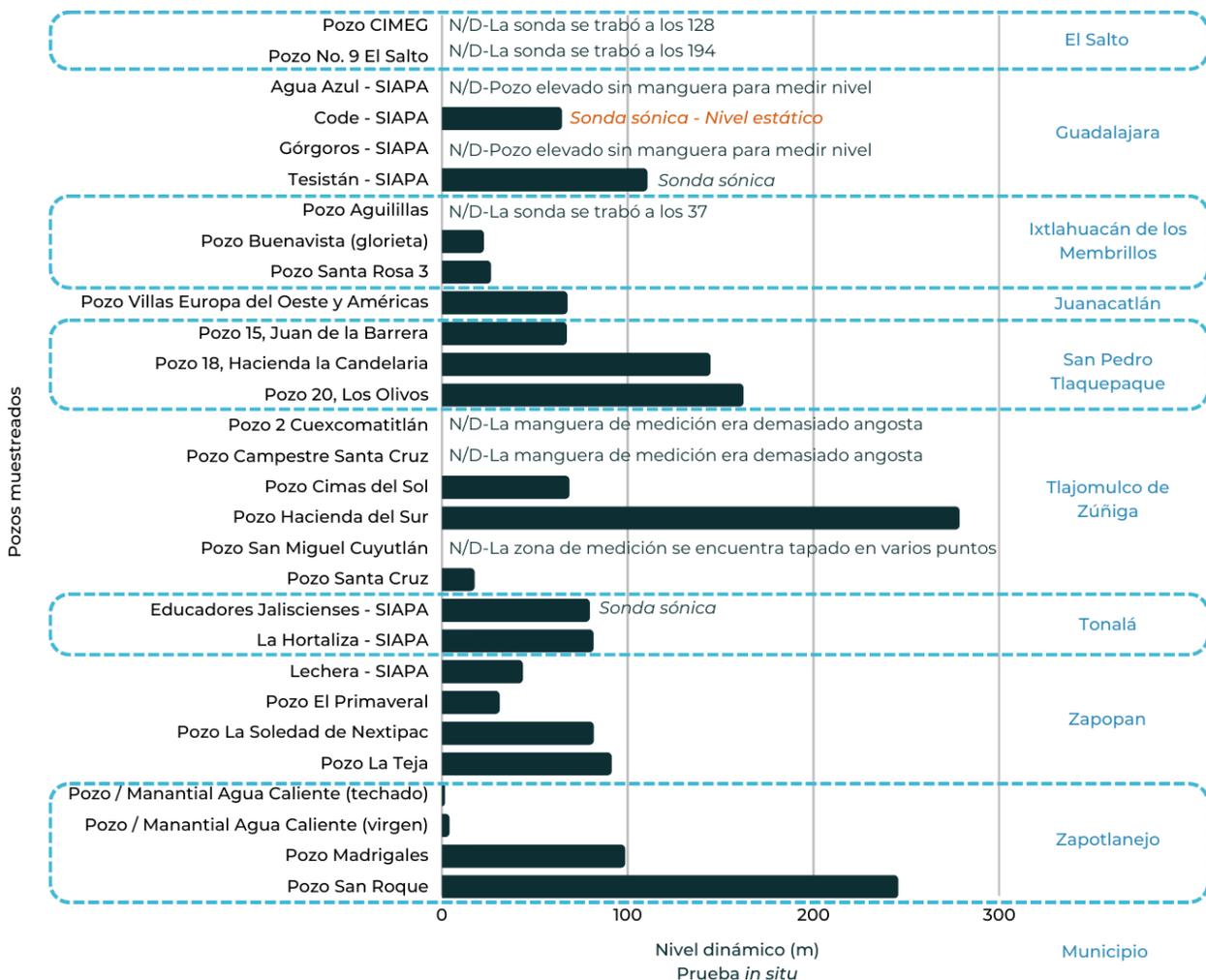


Figura 161. Resultado del muestreo de pozos: nivel dinámico

Respecto a la temperatura, se espera que los valores del agua rondan alrededor de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  en zonas no volcánicas. Sin embargo, para los pozos muestreados, se anticipaban temperaturas más elevadas, debido al contexto hidrogeológico analizado. Los resultados exhibieron un amplio rango (véase Figura 162), desde  $23.2^\circ\text{C}$  en El Primavera en Zapopan (un pozo cercano al Área Natural Protegida La Primavera, por lo que

una mayor temperatura era esperada) hasta 37°C en el Pozo 2 Cuexcomatitlán de Tlajomulco de Zúñiga (véase Figura 162). El promedio de temperatura resultó de 29°C. Por lo tanto, se observa que el agua es más cálida de lo registrado en la literatura consultada. Además, vale la pena mencionar que la NOM-127-SSA1-2021 no establece límites de temperatura

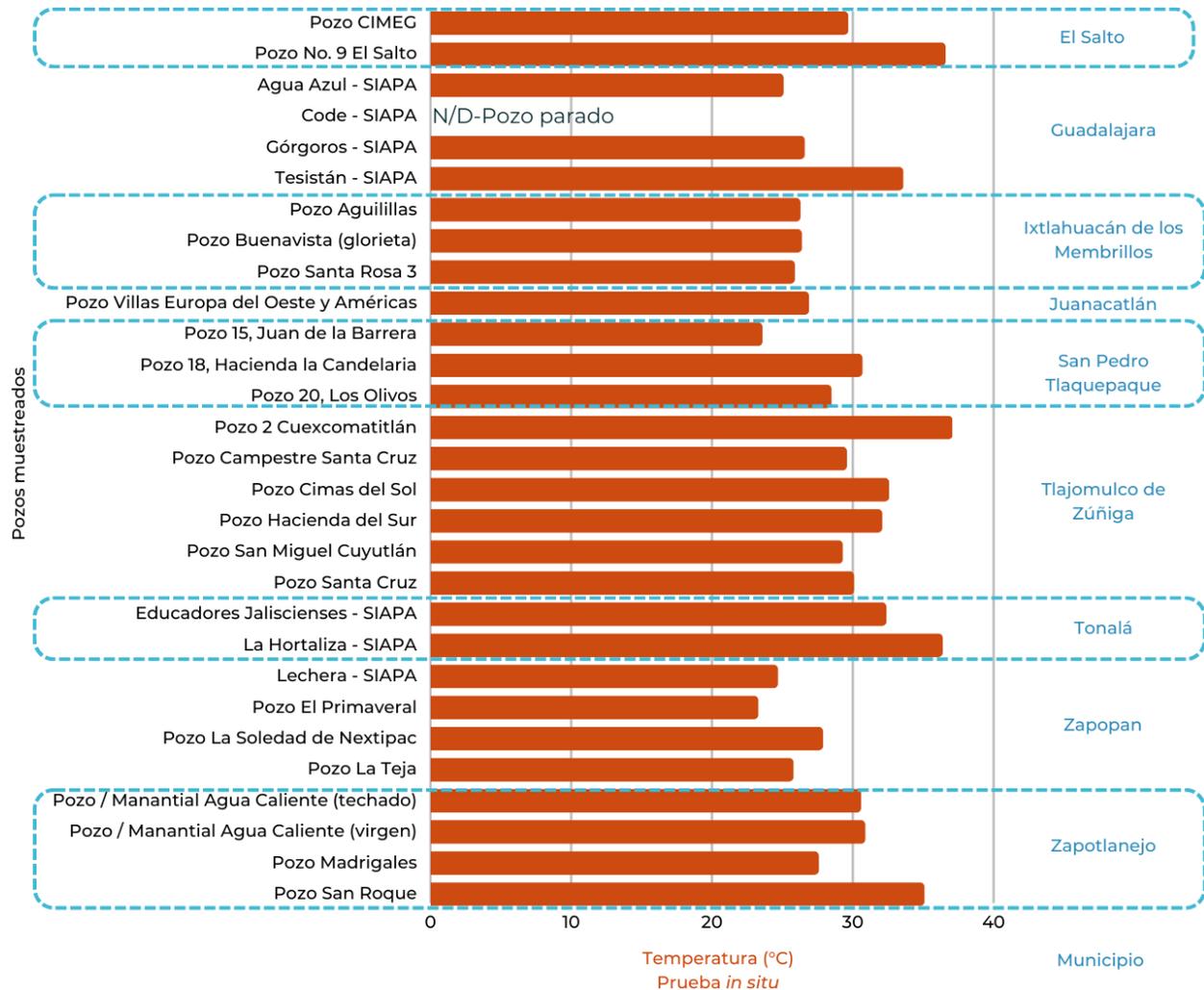


Figura 162. Resultado del muestreo de pozos: temperatura

El pH, o potencial de hidrógeno, es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua. Aunque el pH generalmente no tiene un impacto directo en los consumidores, es uno de los parámetros operativos más importantes de la calidad del agua (WHO, 2022, pág. 245). Según la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, los límites permisibles para el pH son de 6.5 a 8.5 (DOF, 2022), valores normales y aceptados a nivel mundial (WHO, 2022, pág. 245), ya que el valor neutro del pH es 7. El análisis de las muestras arrojó valores que variaron desde 6.3, en el pozo de Buenavista (glorieta) en el municipio de Ixtlahuacán de los Membrillos, hasta 9.4, en los pozos Manantial Agua Caliente del municipio de Zapotlanejo. El valor promedio de los pozos muestreados fue de 7.8 (véase la Figura 163). Al comparar los valores obtenidos con los límites permitidos en la norma, se notó que algunos pozos están por abajo del límite inferior de 6.5: Buenavista -glorieta- y Santa Rosa 3 en Ixtlahuacán de los Membrillos, con 6.3 y 6.4, respectivamente; El Primavera en Zapopan, con 6.4; y el Pozo 15 -Juan de la Barrera- en San Pedro Tlaquepaque, con 6.5. En cambio, cinco pozos resultaron por encima de las 8.5 unidades: Pozo 2 Cuexcomatitlán, pozo Cimas del Sol

y pozo San Miguel Cuyutlán, en Tlajomulco de Zúñiga, con valores de 9, 9, y 9.3, respectivamente; así como los pozos Manantial Agua Caliente, en Zapotlanejo, ambos con resultado de 9.4. Es importante que el agua subterránea mantenga un pH lo más neutro posible, ya que, de lo contrario, se podrían ocasionar desgastes en las tuberías (si el agua es muy ácida), o afectar a aquellos que beban el agua sin previa purificación (en caso de ser muy básica).

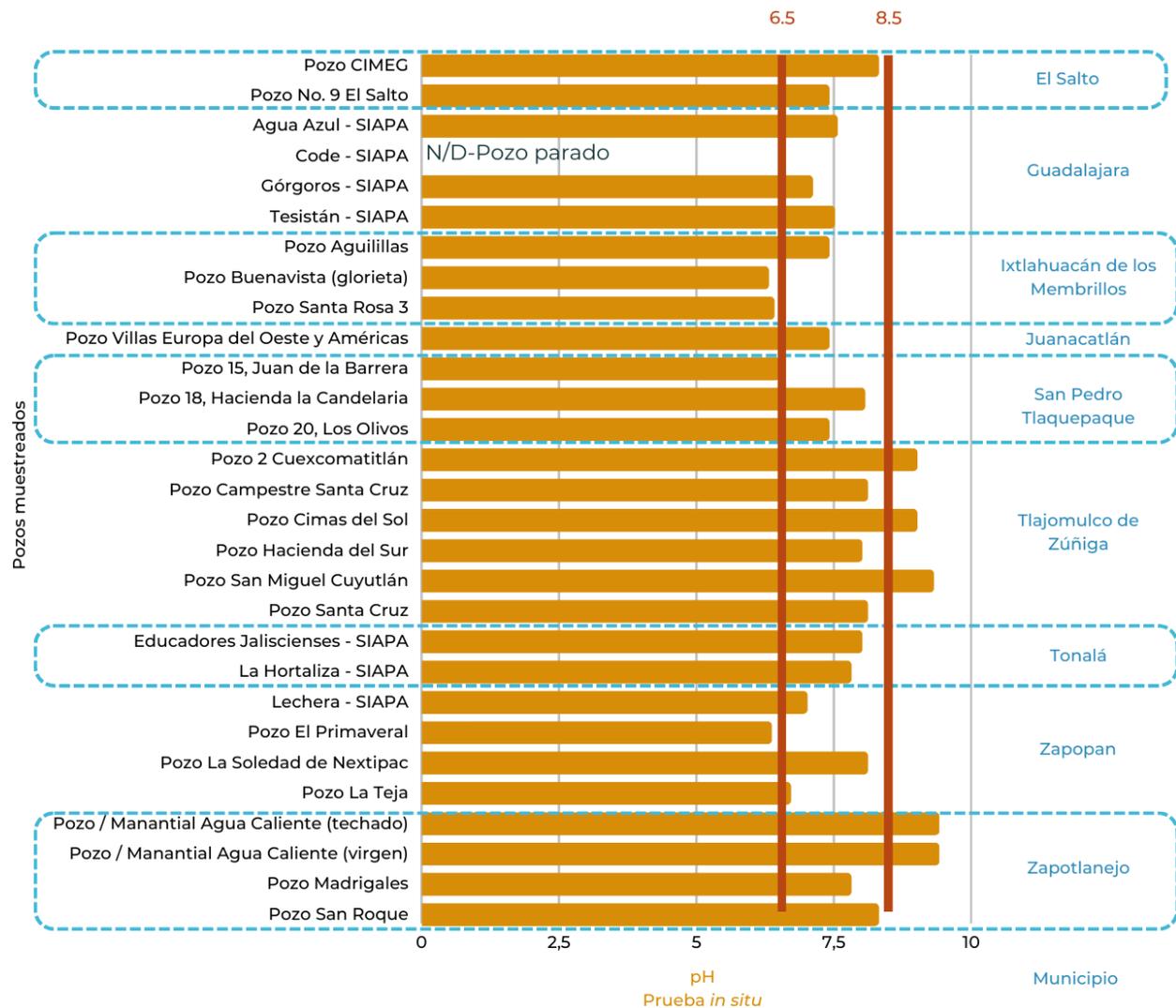


Figura 163. Resultado del muestreo de pozos: pH

La conductividad eléctrica, una vez estabilizada, permite conocer a grandes rasgos la concentración de sales disueltas en el agua; por lo general, cuanto más elevada es la conductividad, mayor es el contenido en sales, aunque se desconoce qué elementos particulares se encuentran disueltos. No obstante, la NOM-127-SSA1-2021 no establece límites permisibles de conductividad eléctrica. Entre los resultados (véase Figura 164), los valores mínimos obtenidos fueron de 0.11 mS/cm, en los pozos Manantial Agua Caliente del municipio de Zapotlanejo, así como en el pozo 2 Cuexcomatitlán de Tlajomulco de Zúñiga. Por su parte, el valor máximo fue de 0.6 mS/cm, en el pozo La Soledad de Nextipac del municipio Zapopan. El promedio, el valor fue de 0.23 mS/cm. Sin conocer la concentración de los elementos disueltos, no se puede realizar una predicción de si el agua contiene una concentración buena de minerales para consumo humano.

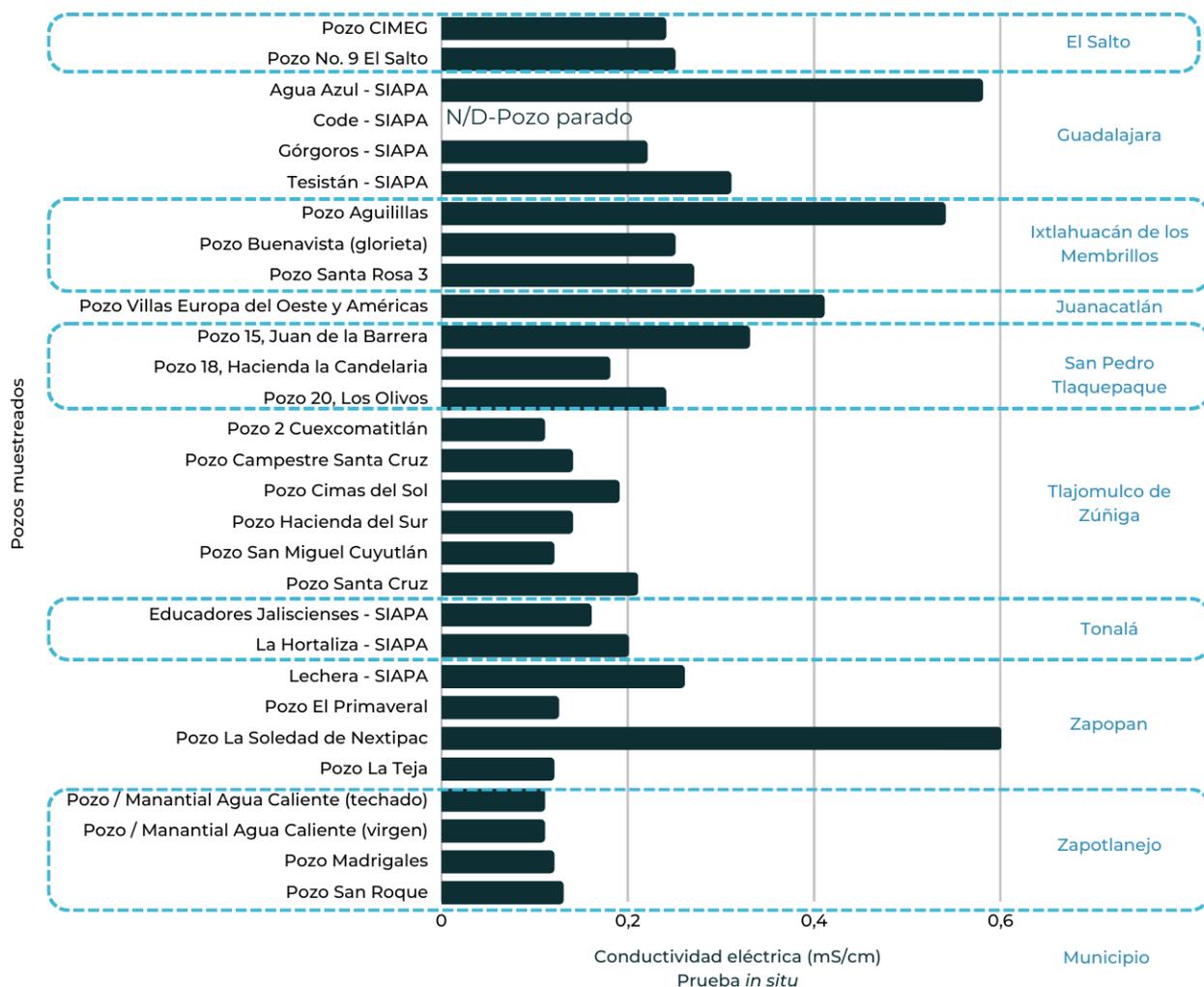


Figura 164. Resultado del muestreo de pozos: conductividad eléctrica

En lo que respecta al arsénico (As), este se encuentra ampliamente en la corteza terrestre en estados de oxidación de -3, 0, +3 y +5. En el agua, por ejemplo, está presente principalmente como arseniato (+5), aunque, en condiciones anaeróbicas, es probable que esté presente como arsenito (+3). Igualmente, suele estar presente en aguas naturales, en concentraciones inferiores a 1–2 µg/L o ppb. Sin embargo, en aguas, particularmente subterráneas, donde hay depósitos de minerales sulfurados y depósitos sedimentarios derivados de rocas volcánicas, las concentraciones pueden ser significativamente elevadas (WHO, 2022, pág. 315). Como referencia, desde el 2001 la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) estableció el nivel permisible de arsénico en el agua bebible, equivalente a 10 ppb (nivel máximo contaminante) (US EPA, 2022); al igual que la Organización Mundial de la Salud (OMS o WHO, por sus siglas en inglés), quien también recomienda un máximo de 10 ppb, como criterio provisional para el agua bebible (OMS, 2022).

La NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano, muestra que el límite máximo permisible (LMP) para arsénico será restringido paulatinamente, por lo cual el LMP actual es de 0.025 mg/L o 25 ppb. Esta norma será aplicada gradualmente, con el objetivo de restringir el agua a 0.01 mg/L o 10 ppb de arsénico, otorgando diferentes fechas límite, según la cantidad de habitantes de las localidades: para poblaciones con más de 500,000 habitantes será para 2024; aquellas con entre 50,000 y

499,999 habitantes tendrán hasta 2026; y las que tengan una población menor a 50,000 habitantes tendrán hasta 2029 (DOF, 2022). Respecto a los resultados obtenidos en los muestreos, se resalta que los pozos de Buenavista (glorieta) en Ixtlahuacán de los Membrillos, Pozo 18 Hacienda la Candelaria en San Pedro Tlaquepaque, y Pozo Santa Cruz en Tlajomulco de Zúñiga, resultaron con concentraciones de As de 12, 12 y 10 ppb, respectivamente; sobrepasando el límite recomendado por la OMS y la EPA. En contraste, en once pozos muestreados se observó un valor menor a 2 ppb, mientras en algunos otros no fue posible la realización de la prueba de arsénico, como se muestra en la Figura 165.

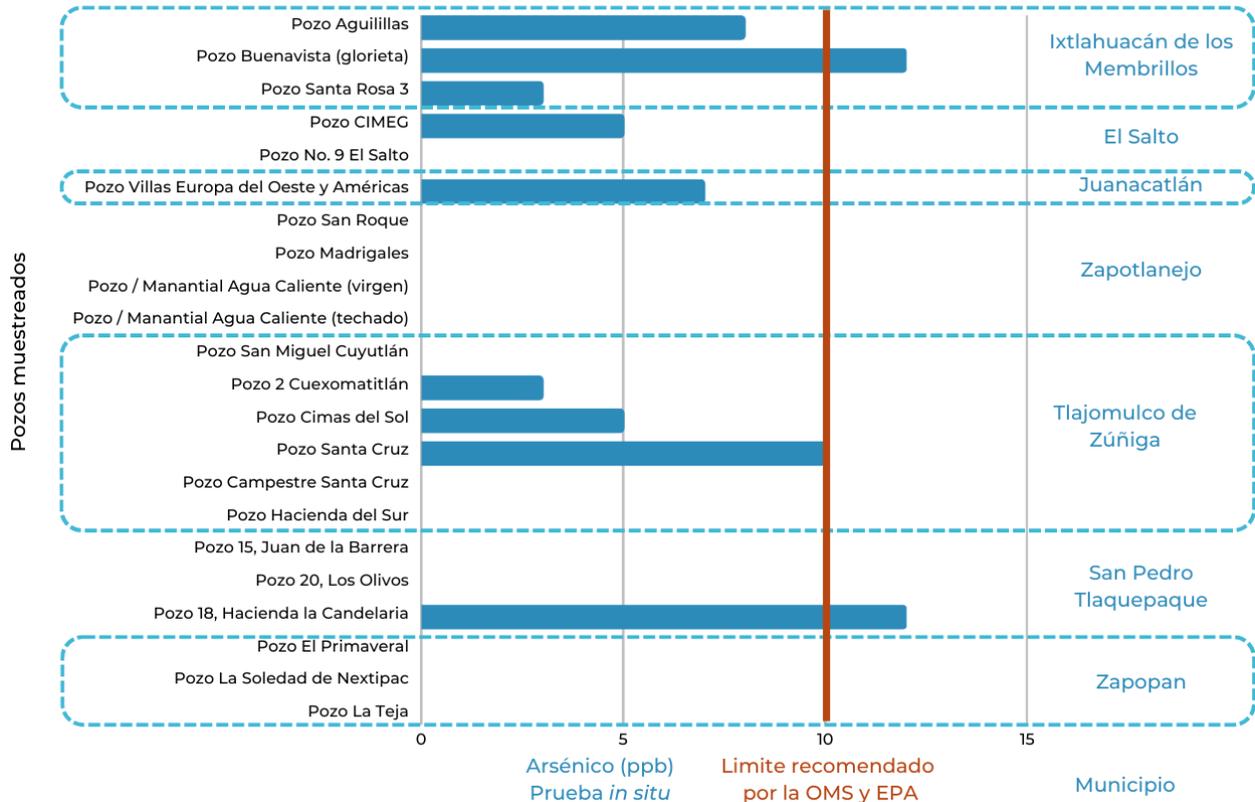


Figura 165. Resultado del muestreo de pozos: arsénico

Después de realizar la selección y muestreo de los pozos, se desea resaltar que solo algunos pozos no se encontraban en funcionamiento. Por otro lado, al realizar las entrevistas con los encargados de cada pozo, uno de los hallazgos más notables fue la ausencia de cloración de los pozos por diversas razones, entre las que destacó el robo de equipo, la solicitud de los habitantes para ello, así como la falta de mantenimiento preventivo (véase Tabla 62).

Tabla 62. Condición del pozo y otras anotaciones. Fuente: Enlace Ambiental y Proyectos S.C.

Municipio	Nombre del pozo	Sistema Hidrogeológico	Evaluación
El Salto	Pozo CIMEG	Toluquilla	Mal estado: no funcionan varios mecanismos del pozo, con obstrucciones para medición del nivel del pozo.
	Pozo No. 9 El Salto		Regular estado: con obstrucciones para medición del nivel del pozo.
Guadalajara	Agua Azul 2- SIAPA	Atemajac	Regular estado: exceso de agua para enfriar la bomba.
	CODE - SIAPA		Regular estado: al visitar no se encontraba el sitio limpio (sofá y otros artículos considerados basura a la intemperie)
	Górgoros - SIAPA		Regular estado: requiere instrumentos de medición de caudal.
	Tesistán - SIAPA		Regular estado: requiere instrumentos de medición de caudal.
Ixtlahuacán de los Membrillos	Pozo Aguilillas	Ixtlahuacán de los Membrillos	Mal estado: con obstrucciones para medición del nivel del pozo, agua de color amarilla con olor a cloro. Concentración de arsénico cerca del límite.
	Pozo Buenavista (glorieta)		Mal estado: pozo en buenas condiciones. Concentración de arsénico rebasa el límite.
	Pozo Santa Rosa 3		Mal estado: pozo abierto, con posibilidad de ingreso de contaminantes.
Juanacatlán	Pozo Villas Europa del Oeste y Américas	Los Altos	Regular estado: agua altamente gaseosa. Concentración de arsénico cerca del límite.
San Pedro Tlaquepaque	Pozo 15, Juan de la Barrera	Toluquilla	Pozo en buenas condiciones. Con fuga leve en la tubería.
	Pozo 18, Hacienda la Candelaria		Pozo en buenas condiciones.
	Pozo 20, Los Olivos		Pozo en buenas condiciones.
Tlajomulco de Zúñiga	Pozo 2 Cuexcomatlán	Cajititlán	Regular estado: requiere dispensador automático de cloro.
	Pozo Campestre Santa Cruz	San Isidro	Mal estado: pozo abierto, con posibilidad de ingreso de contaminantes. Bombeo insuficiente a la comunidad
	Pozo Cimas del Sol	Cajititlán	Pozo en buenas condiciones. Requiere trabajos de limpieza de pasto crecido.
	Pozo Hacienda del Sur	Toluquilla	Mal estado: no funcionan varios mecanismos del pozo. Requiere instrumentos de medición del caudal y presión. Así como mejor control en el uso y almacenamiento de cloro.
	Pozo San Miguel Cuyutlán	Cajititlán	Regular estado: requiere dispensador automático de cloro, requiere mayor seguridad en las instalaciones. Plaga de ratas en las instalaciones.

Municipio	Nombre del pozo	Sistema Hidrogeológico	Evaluación
	Pozo Santa Cruz	San Isidro	Regular estado: el pozo opera correctamente, la planta por osmosis parece funcionar correctamente. Concentración de arsénico cerca del límite.
Tonalá	Educadores Jaliscienses - SIAPA	Atemajac	Pozo en buenas condiciones.
	La Hortaliza - SIAPA		Regular estado: enlamado, por fugas y agua caliente.
Zapopan	Lechera - SIAPA		Regular estado: requiere instrumentos de medición de caudal.
	Pozo El Primavera		Regular estado: al visitar no se tenía cloro en las instalaciones.
	Pozo La Soledad de Nextipac		Mal estado: pozo abierto, con posibilidad de ingreso de contaminantes. El pozo vibra, error al instalar la nueva bomba. Línea de cloro cortada.
	Pozo La Teja		Pozo en buenas condiciones. Olor desagradable en el pozo.
Zapotlanejo	Pozo / Manantial Agua Caliente (techado)		Los Altos
	Pozo / Manantial Agua Caliente (virgen)	Perforación tipo naciente en buenas condiciones.	
	Pozo Madrigales	Pozo en buenas condiciones.	
	Pozo San Roque	Pozo en buenas condiciones.	

Fuente: Elaboración propia Enlace ambiental y Proyectos.

## ANEXO 6. RESULTADOS DE LABORATORIO

En esta sección se presentan los resultados de los 29 pozos. Los parámetros medidos en laboratorio fueron: temperatura, pH, conductividad eléctrica, dureza (por los iones calcio y magnesio), concentraciones de ion sodio, ion potasio, ion nitrato, ion sulfato, ion flúor y cloro libre o cloruro, al igual que la corrosividad con los iones bicarbonato y carbonato. Con estos valores se pudieron identificar características específicas del agua subterránea en el AMG.

El pH, o potencial de hidrógeno, es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua. Aunque generalmente no tiene un impacto directo en los consumidores, es uno de los parámetros operativos más importantes de la calidad del agua (WHO, 2022, pág. 245). Según la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, los límites permisibles para el pH son de 6.5 a 8.5 (DOF, 2022), valores normales y aceptados a nivel mundial (WHO, 2022, pág. 245), ya que el valor neutro es 7. Los valores obtenidos en las muestras variaron entre 6.4, en el pozo El Primavera en Zapopan, y 8.4, en el pozo Aguillillas en Ixtlahuacán de los Membrillos. El promedio en los pozos muestreados fue 7.8 (véase Figura 166). Al comparar estos resultados con los Límites Máximos Permisibles establecidos por la norma, se observa que solo un pozo se encuentra ligeramente por debajo del valor mínimo de 6.5 (pozo El Primavera). Ningún pozo superó los valores máximos permitidos. Mantener el pH del agua cerca del valor neutral de 7 es crucial, ya que de lo contrario podría tener efectos negativos. Si el agua es demasiado ácida, podría ocasionar daños en las tuberías o impactar a aquellos que consumen el agua sin purificación previa.

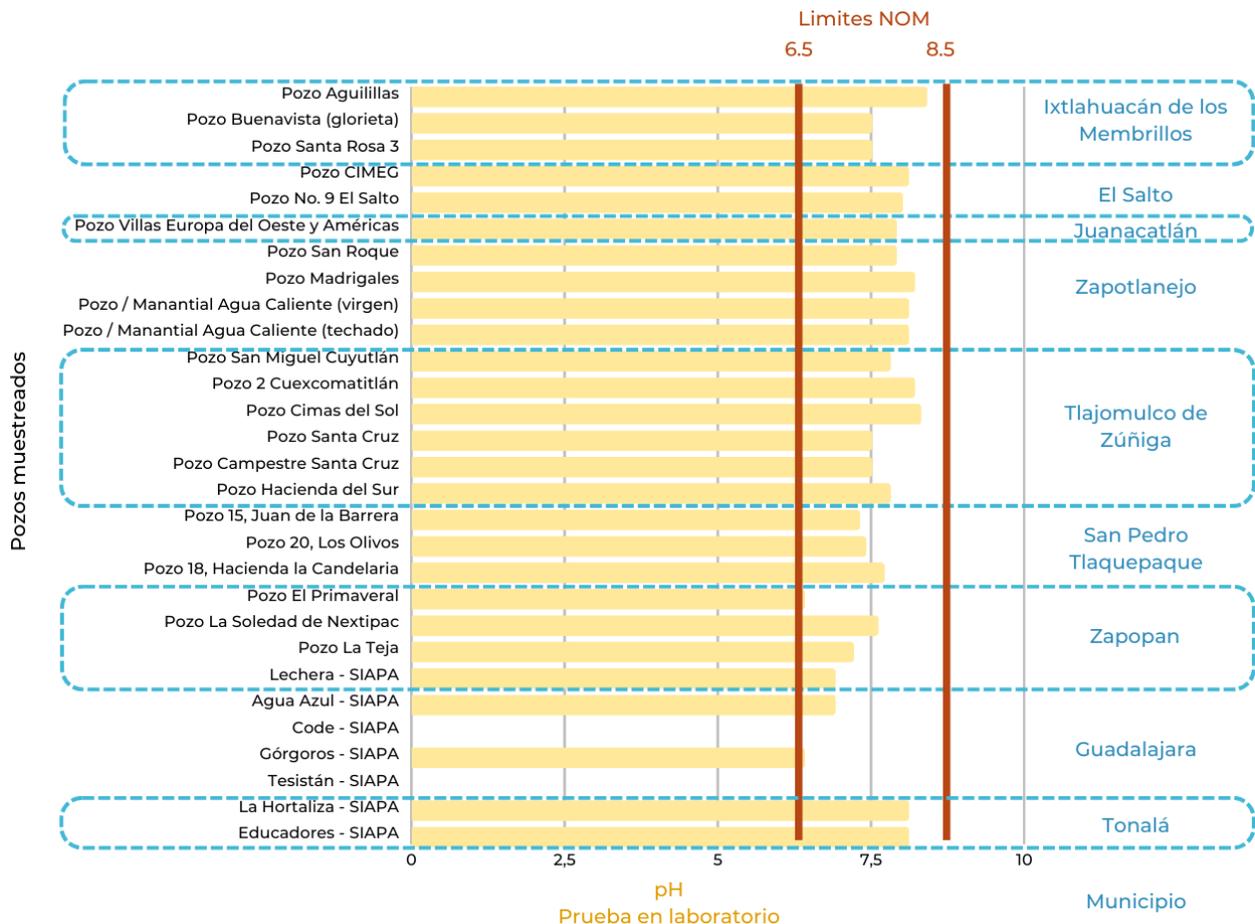


Figura 166. Resultados de las muestras de laboratorio: pH

La conductividad eléctrica permite conocer, a grandes rasgos, la concentración de sales disueltas en el agua; por lo general, cuanto más elevada es la conductividad, mayor es el contenido en sales, aunque se desconoce qué elementos particulares se encuentran disueltos. No obstante, la NOM-127-SSA1-2021 no establece límites permisibles de conductividad eléctrica. En los resultados obtenidos, se observaron valores mínimos de 0.112 mS/cm en el pozo La Soledad de Nextipac, en el municipio de Zapopan. En contraste, el valor máximo fue de 0.885 mS/cm, en el pozo Agua Azul - SIAPA. (véase Figura 167).

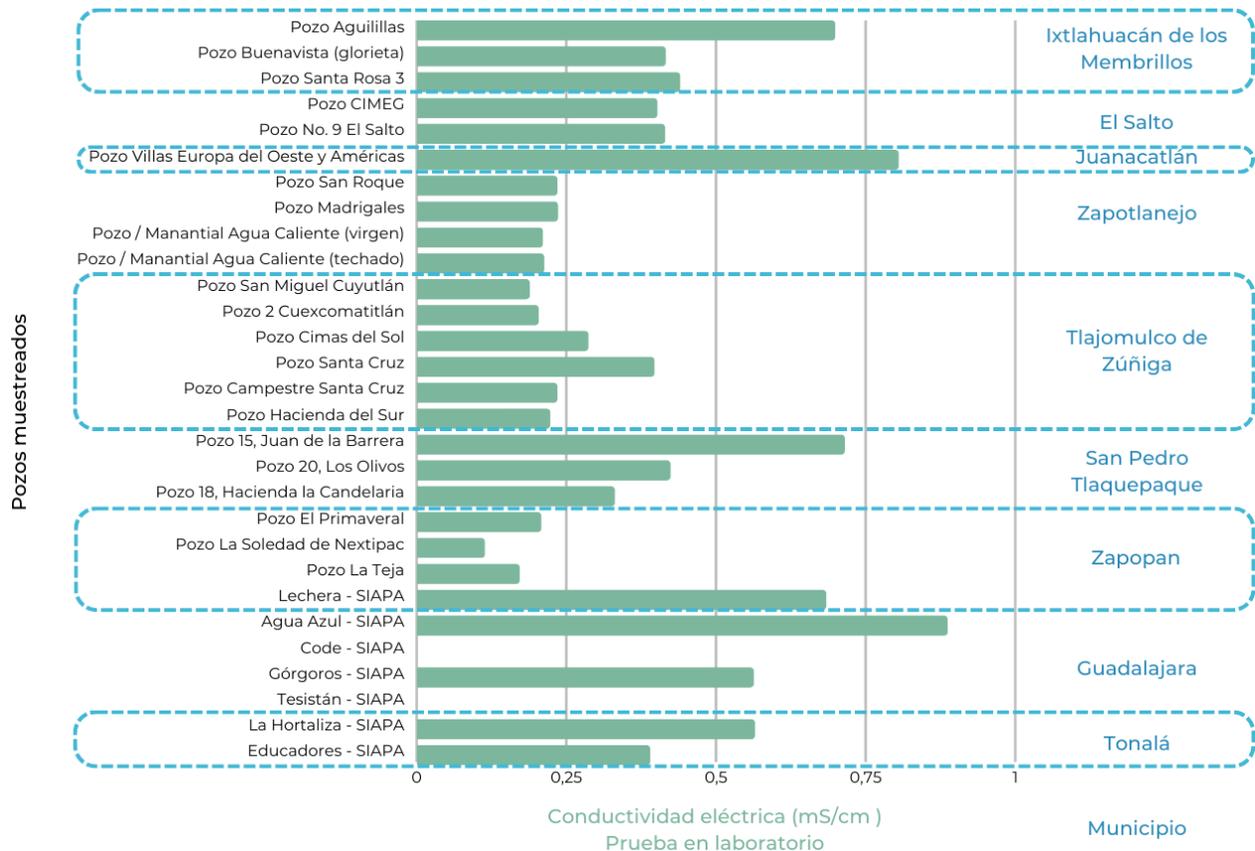


Figura 167. Resultados de las muestras de laboratorio: conductividad eléctrica

Respecto a la dureza, el término original se refiere a la capacidad del agua para precipitar jabón. Este fenómeno se produce principalmente por los iones de calcio y magnesio, aunque pueden intervenir otros metales polivalentes como fierro, zinc, aluminio, manganeso y estroncio, además de los iones hidrógeno. Sin embargo, para fines del proyecto, se definirá como la concentración total de magnesio (Mg) y calcio (Ca) únicamente, expresada en concentración de carbonato de calcio (DOF, 2022). La percepción pública de la aceptabilidad de la dureza del agua puede variar según la comunidad. El umbral de sabor para el ion calcio oscila entre 100 y 300 mg/L, dependiendo del anión asociado, y posiblemente es más bajo para el magnesio; aunque, en algunos casos, los consumidores toleran niveles de dureza superiores a 500 mg/L (WHO, 2022, pág. 243).

Según la NOM-127-SSA1-2021, el límite máximo permisible de dureza total como  $\text{CaCO}_3$  es de 500 mg/L. De acuerdo con la escala de Merk, el agua se clasifica en diferentes niveles de dureza. Si la concentración de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es de 0 a 79 mg/L, se clasifica como agua muy blanda; en el rango de 80 a 149 mg/L, se considera agua blanda; para concentraciones de 150 a 329 mg/L, se califica como agua semi dura; si la

concentración está en el intervalo de 330 a 549 mg/L, se considera agua dura; y cuando la concentración supera los 550 mg/L, se clasifica como agua muy dura.

Los resultados obtenidos en el laboratorio muestran una concentración mínima de 24.72 mg/L (pozo La Soledad de Nextipac, en Zapopan) y un valor máximo de 286.34 mg/L (pozo Villas Europa del Oeste y Américas, en Juanacatlán), el cual ya se considera propio de agua semi dura. A su vez, los pozos de agua caliente en Zapotlanejo presentaron valores de 74.16 y 78.28 mg/L, mientras el pozo No. 9 de El Salto mostró un valor de 39.15 mg/L (véase la Figura 168). Finalmente, el promedio de la dureza en los pozos fue de 80 mg/L, categorizado como agua muy blanda o blanda. Todos los valores cumplen con los estándares establecidos por la normativa.

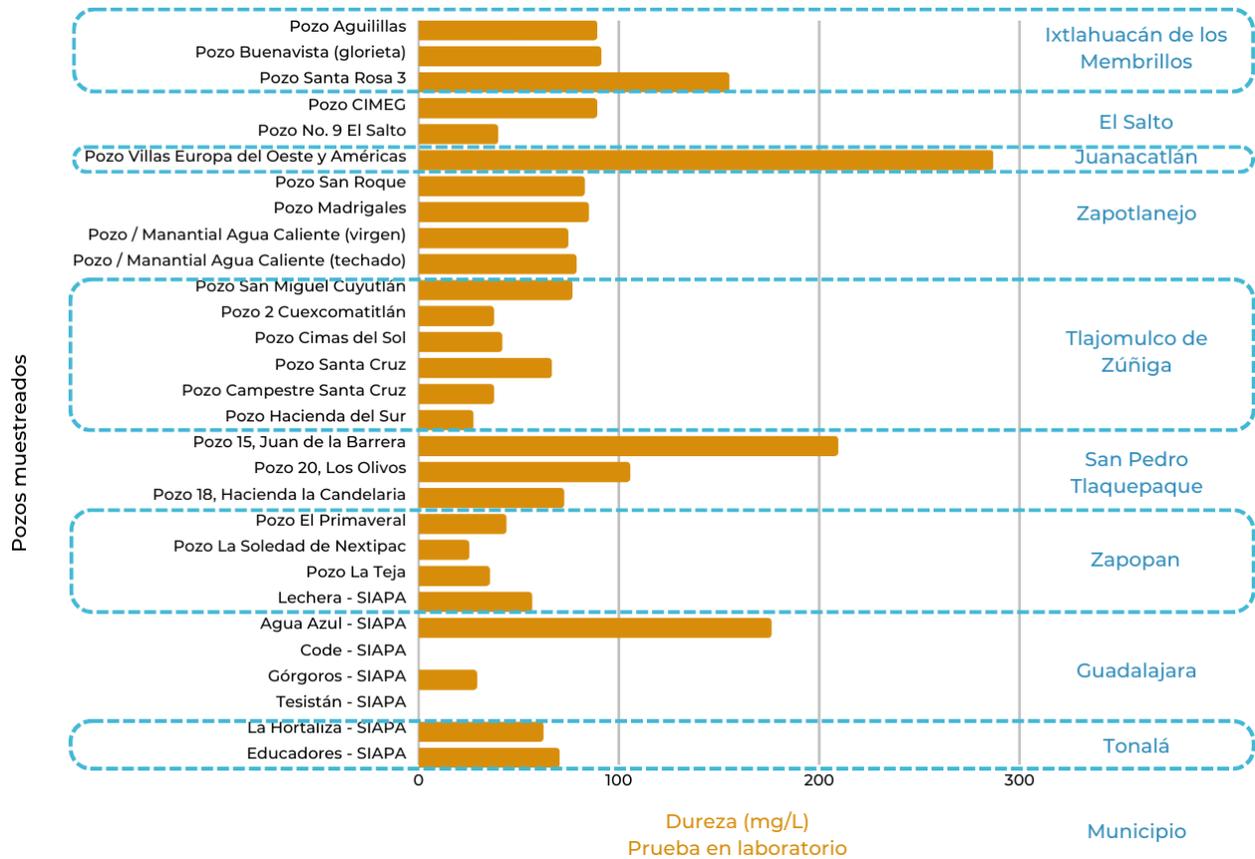


Figura 168. Resultados de las muestras de laboratorio: dureza

En relación con el parámetro del ion calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), este forma parte de los iones que determinan si el agua es clasificada como "dura" o no. El calcio desempeña un papel crucial en el control de la corrosión, por lo que su monitoreo se vincula con la observación de parámetros como las concentraciones de bicarbonato, carbonato y oxígeno disuelto, además del pH (WHO, 2022, pág. 207). Para su regulación en México, la NOM-127-SSA1-2021 no propone límites específicos para este ion; aunque el umbral gustativo para este ion está en el rango de 100 a 300 mg/L, dependiendo del anión asociado (WHO, 2022, pág. 243). Los valores obtenidos en los análisis de las muestras presentan un mínimo de 3.519 mg/L en el pozo La Soledad de Nextipac, en Zapopan, y un máximo de 63.68 mg/L en el pozo Villas Europa del Oeste y Américas, en Juanacatlán; obteniendo así una concentración promedio total de 17 mg/L (véase la Figura 169).

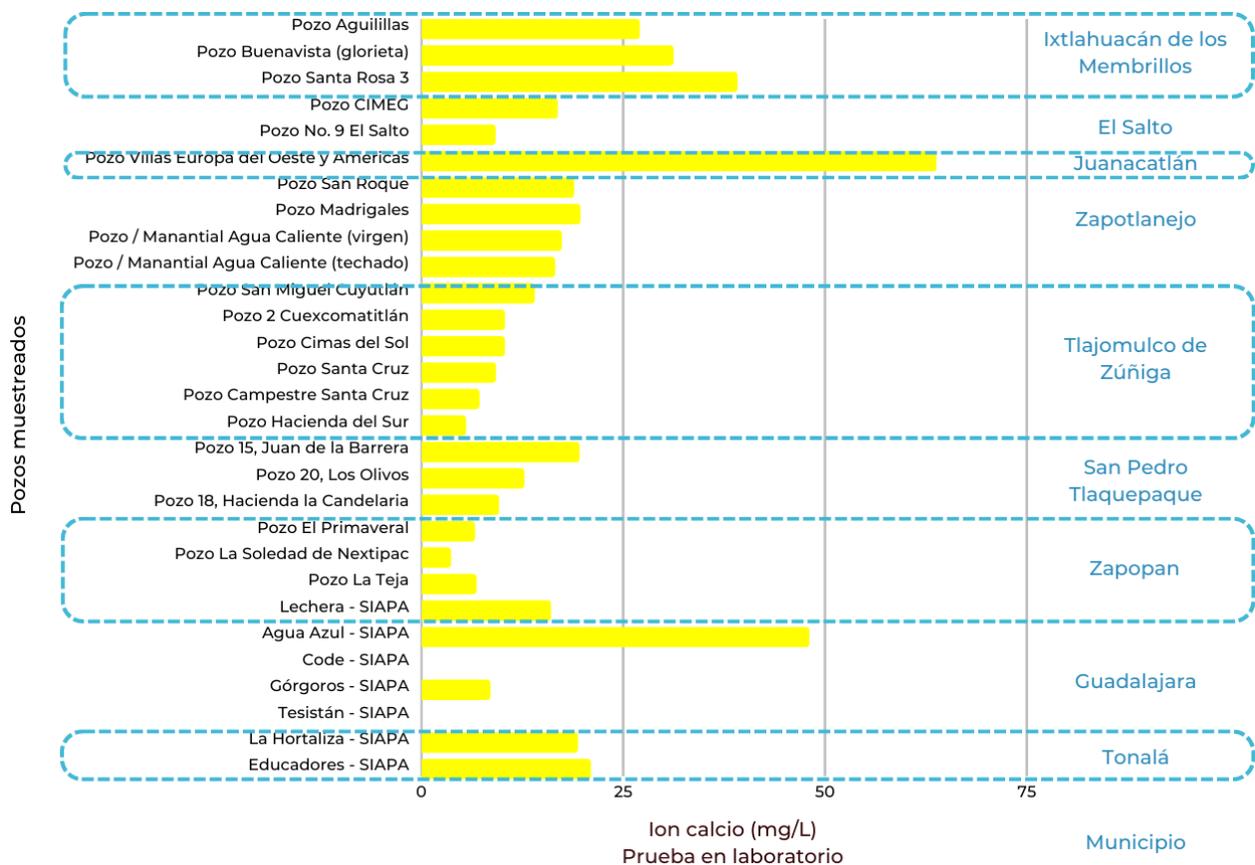


Figura 169. Resultados de las muestras de laboratorio: ion calcio

El ion magnesio ( $Mg^{2+}$ ) también es parte del conjunto de iones que definen la dureza del agua, y su umbral gustativo es probablemente más bajo que el del calcio (100 a 300 mg/L) (WHO, 2022, pág. 243). Del mismo modo, la NOM-127-SSA1-2021 no propone límites específicos para este ion. Los valores obtenidos, a través del análisis de laboratorio, muestran un valor mínimo de 1.0705 mg/L, en el pozo 2 Cuexcomatlán de Tlajomulco de Zúñiga, y un máximo de 31.42 mg/L, en el pozo Villas Europa del Oeste y Américas de Juanacatlán. Como resultado, se obtuvo una concentración promedio de 8 mg/L de ion magnesio (véase la Figura 170).

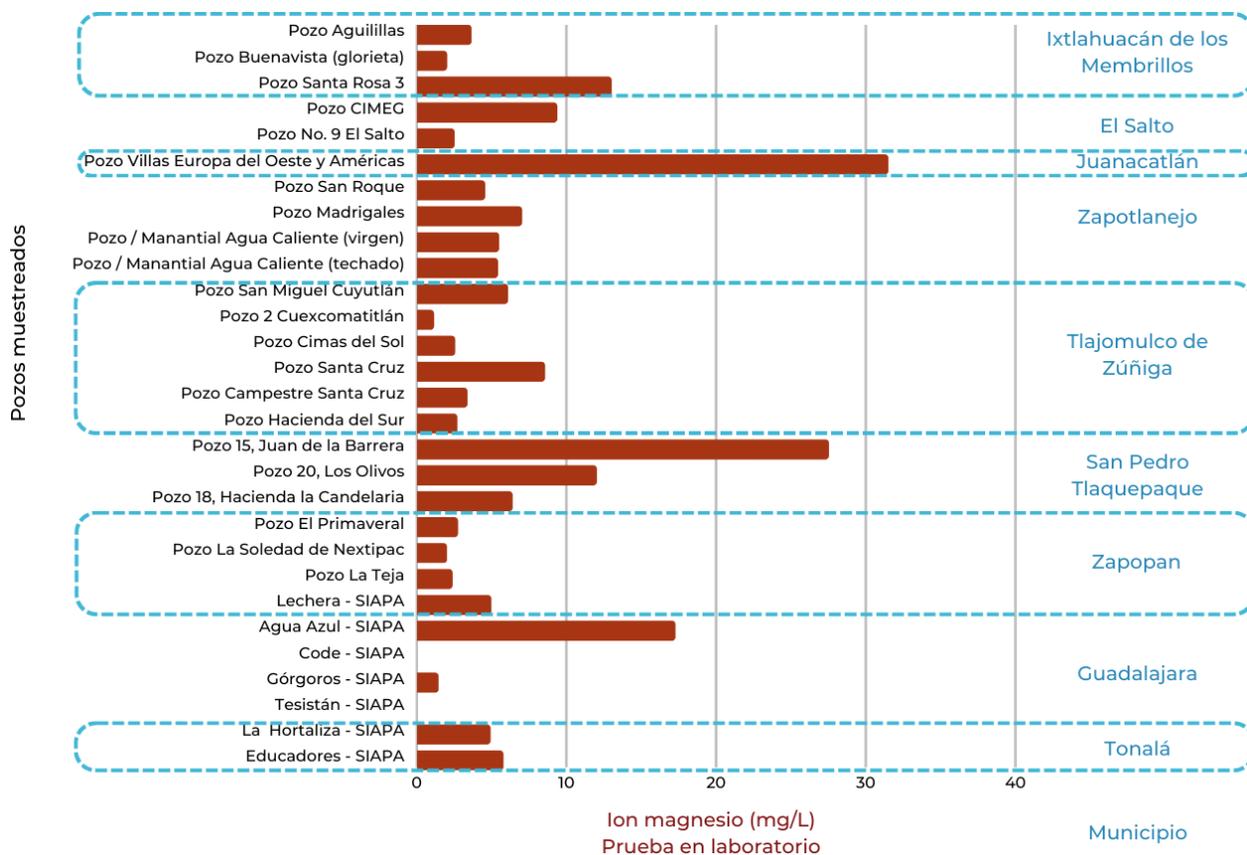


Figura 170. Resultados de las muestras de laboratorio: ion magnesio

En lo que respecta al ion sodio ( $\text{Na}^{2+}$ ), este se conoce más fácilmente por su combinación con el cloruro, para formar sal común o sal de mesa, aunque también se puede encontrar como KCl. En el agua potable, las concentraciones de sodio suelen estar por debajo de 20 mg/L, aun cuando en algunos países estos valores pueden ser significativamente mayores (WHO, 2022, pág. 463). El umbral de sabor del sodio en el agua depende de factores como el anión asociado y la temperatura de la solución. A temperatura ambiente, el umbral de sabor es de unos 200 mg/L (WHO, 2022, pág. 245). En 1993 se determinó que no era necesario establecer un valor de referencia, porque los niveles de sodio en el agua potable no eran de preocupación para la salud. Sin embargo, las concentraciones superiores a 200 mg/L pueden dar lugar a un sabor inaceptable (WHO, 2022, pág. 463). Como referencia, el agua de mar contiene de 33,000 a 37,000 mg de cloruro de sodio por cada litro. Para productos químicos utilizados en el tratamiento del agua o materiales en contacto con el agua potable, se establece como valor de referencia para el sodio, en su forma de dicloroisocianurato de sodio, un límite de 50 mg/L, ya que se considera de importancia para la salud (WHO, 2022, pág. 202). A pesar de ello, la NOM-127-SSA1-2021 no propone límites específicos para este ion.

Como resultado, se obtuvieron concentraciones que muestran un valor mínimo de 12.284 mg/L para el pozo San Miguel Cuyutlán (Tlajomulco de Zúñiga) y un valor máximo de 124.47 mg/L para el pozo Aguilillas (Ixtlahuacán de los Membrillos). Además, la concentración promedio de los pozos fue de 45.79 mg/L (véase la Figura 171). Por lo anterior, aunque no se rebasan los límites aceptables del umbral del sabor de 200 mg/L, sí se rebasa el valor que se suele tener de concentración de sodio en el agua potable (*i.e.*, 20 mg/L) en 20 de los 29 pozos muestreados.

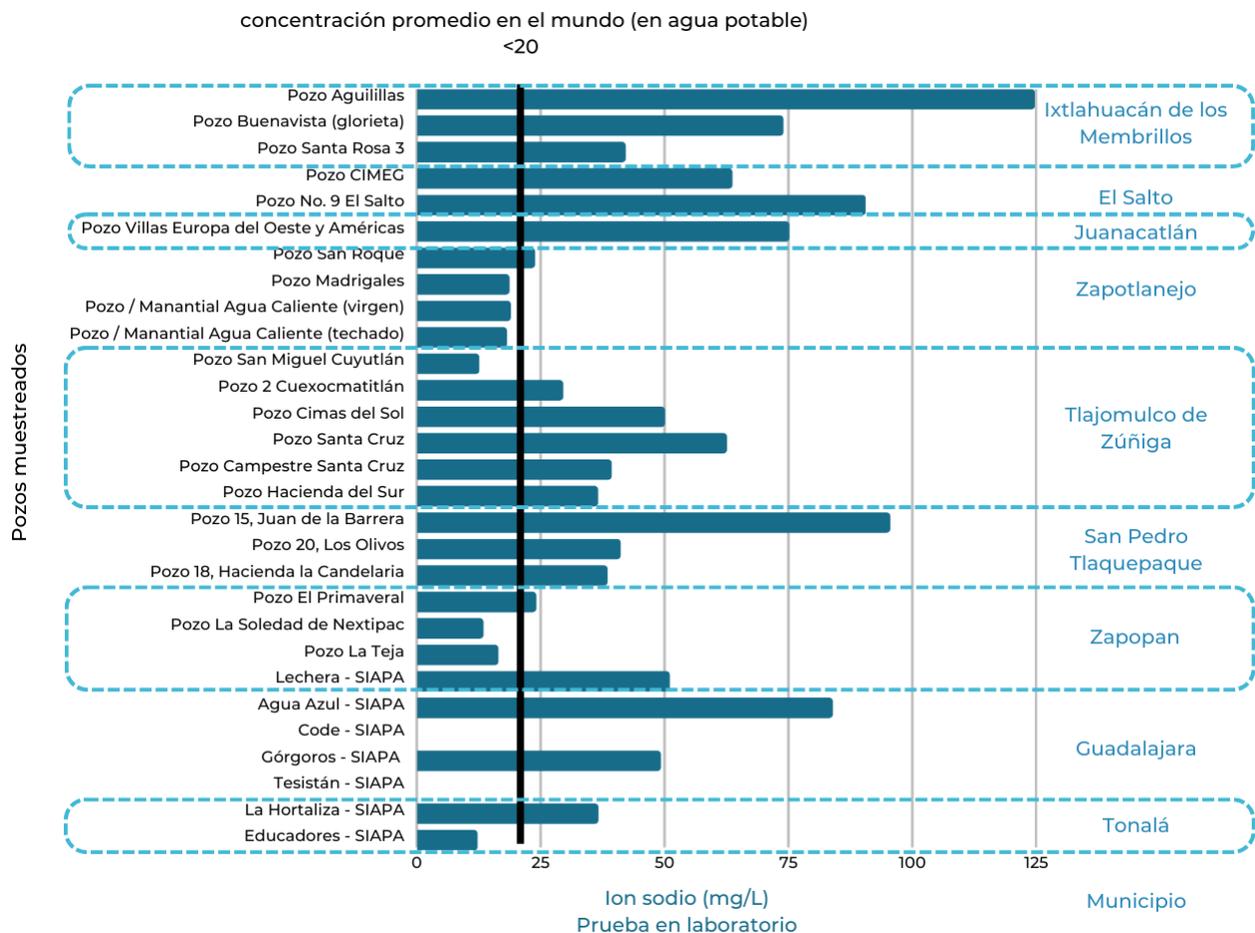


Figura 171. Resultados de las muestras de laboratorio: ion sodio

En relación con el ion potasio ( $K^+$ ), este es un elemento esencial en los seres humanos y rara vez, o nunca, se encuentra en el agua potable en niveles que podrían ser una preocupación para la salud. Asimismo, el ion potasio se encuentra de manera abundante en el medio ambiente, incluyendo todas las aguas naturales. Además, puede estar presente en el agua potable, debido al uso del permanganato de potasio como oxidante en el proceso de tratamiento del agua. En algunos lugares, el cloruro de potasio se utiliza en sistemas de intercambio iónico para ablandar el agua doméstica, en reemplazo o mezclado con el cloruro de sodio. Esto permite que los iones de potasio se intercambien por los iones de calcio y magnesio (WHO, 2022, pág. 455). Por su parte, la NOM-127-SSA1-2021 no propone límites específicos para este ion.

Los valores analizados en las muestras reflejan un valor mínimo de 0.5 mg/L en el pozo La Soledad de Nextipac (Zapopan), seguido del resultado de 3.243 mg/L del pozo Buenavista (glorieta), en Ixtlahuacán de los Membrillos; en contraste con el valor máximo de 18.21 mg/L en el Pozo 15 Juan de la Barrera (San Pedro Tlaquepaque). Por lo tanto, la concentración media de los pozos fue de 8.21 mg/L de  $K^+$  (véase la Figura 172).

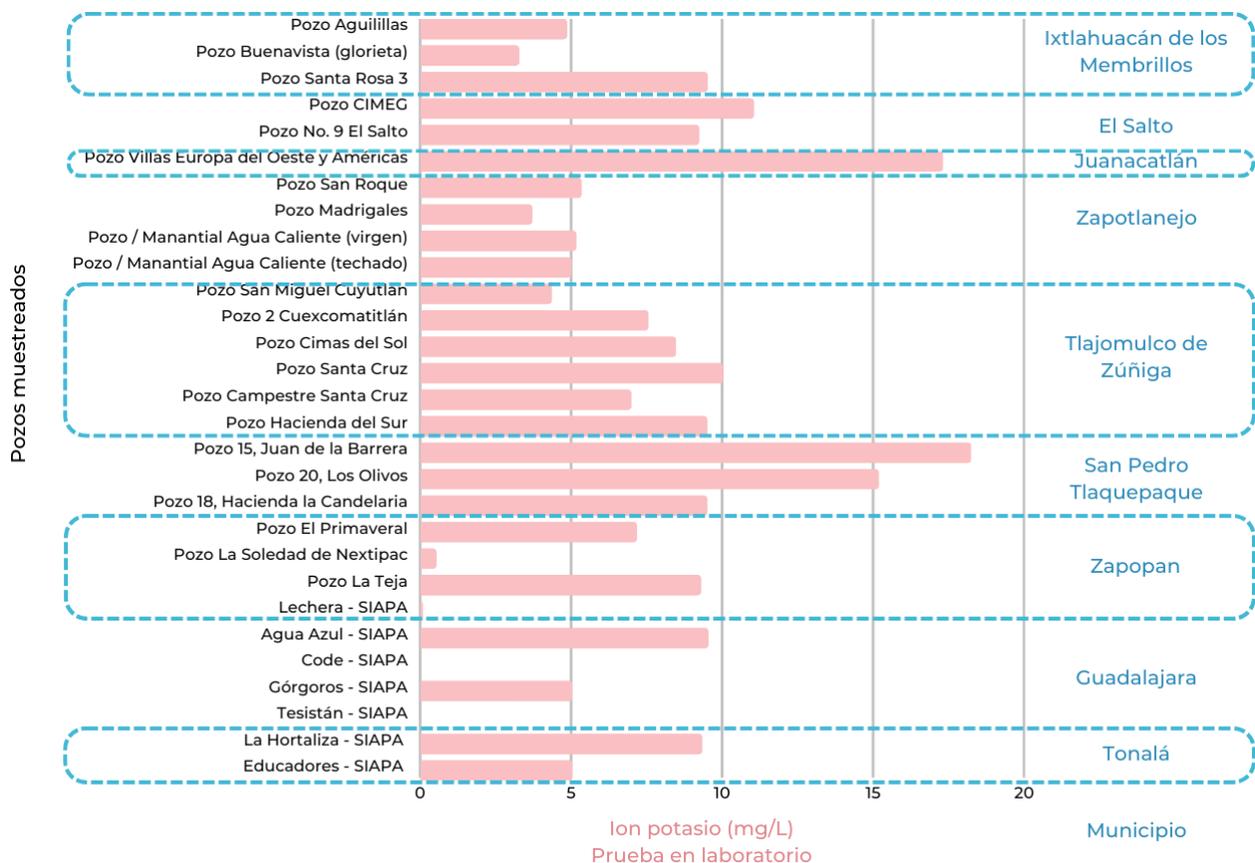


Figura 172. Resultados de las muestras de laboratorio: ion potasio

Se conoce como corrosión al proceso de disolución parcial de materiales como tuberías, tanques y válvulas, por mencionar algunos. En ciertas situaciones, cualquier sustancia puede ser corrosiva, incluida el agua. Esta acción, si sucede en infraestructura hidráulica, puede conducir a problemas estructurales, filtraciones y degradación de la calidad química y microbiológica del agua. Esto, ya que la corrosión interna de tuberías puede influir en la concentración de componentes como plomo y cobre en el líquido. Así, el control de la corrosión es vital para la seguridad y requiere atender varios factores, como las concentraciones de calcio, bicarbonato, carbonato, oxígeno disuelto y pH. El último, funciona como regulador de la solubilidad y velocidad de reacción de muchos metales involucrados en la corrosión, además de ser crucial para la formación de capas protectoras en la superficie del metal. También, la alcalinidad y el calcio pueden afectar las tasas de corrosión para algunos materiales (WHO, 2022, pág. 188).

No existe un índice de corrosión general que se pueda aplicar a todos los materiales, por lo que la NOM-127-SSA1-2021 no propone límites específicos para este ion. No obstante, se utiliza como referencia el parámetro bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), que se encuentra ligado a corrosividad, junto con las concentraciones de calcio, carbonato y oxígeno disuelto (WHO, 2022, pág. 207). Por ende, los valores obtenidos de  $\text{HCO}_3^-$  muestran un valor mínimo de 32.24 mg/L en el pozo El Primavera (Zapopan) y uno máximo de 375.44 mg/L en el Pozo 15 Juan de la Barrera (San Pedro Tlaquepaque). Así pues, la concentración promedio de los pozos fue de 149.41 mg/L de bicarbonato (véase la Figura 173).

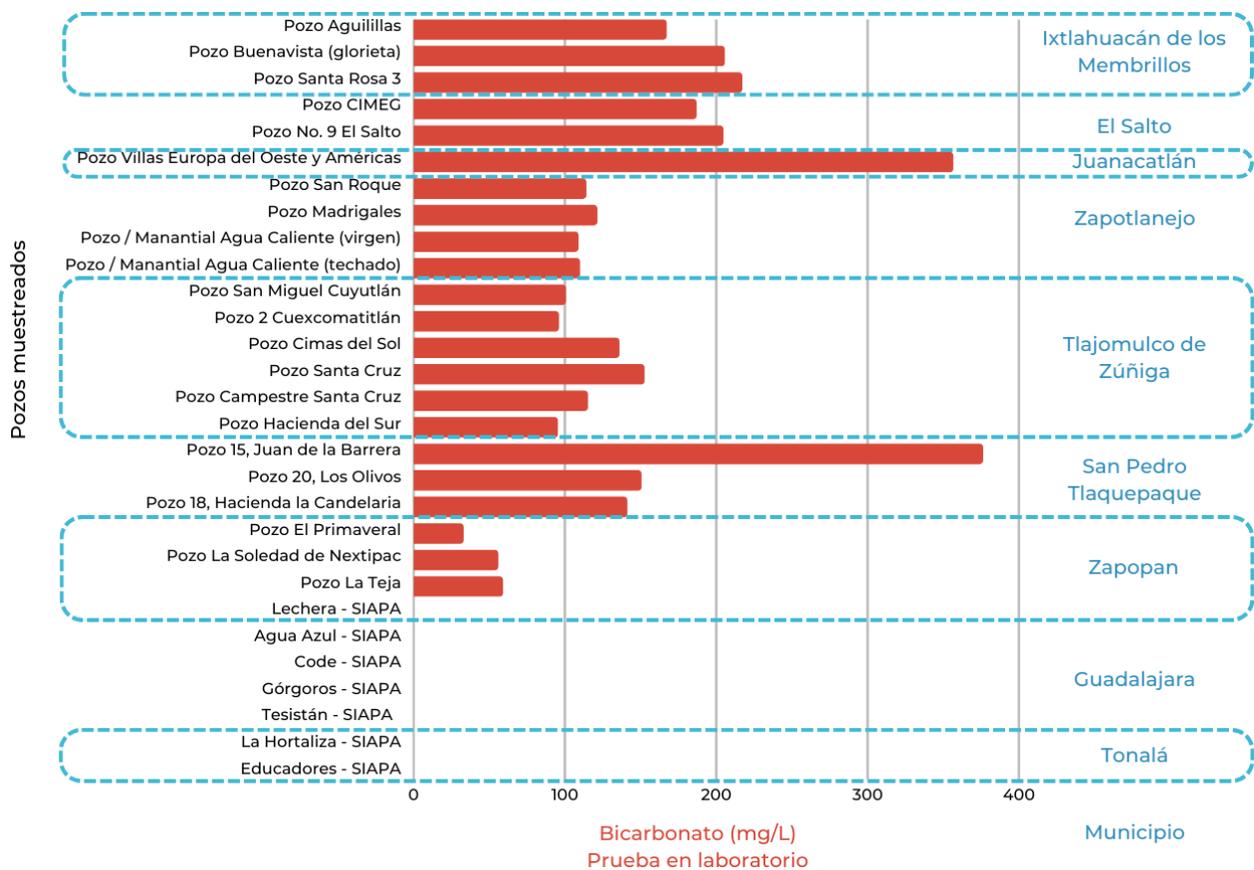


Figura 173. Resultados de las muestras de laboratorio: bicarbonato

Hablando del ion carbonato o ion trióxido de carbono ( $\text{CO}_3^{-2}$ ), este se encuentra ligado a corrosividad, al igual que el calcio, bicarbonato, oxígeno disuelto y pH. Por ello, las aguas duras, al calentarse, forman precipitados de carbonato de calcio (WHO, 2022, pág. 264). A pesar de ello, la NOM-127-SSA1-2021 no propone límites específicos para este ion. Las concentraciones obtenidas con los muestreos exhiben 21 pozos con valores de 5 mg/L, el único pozo con valor distinto es el pozo Aguillillas, en el municipio de Ixtlahuacán de los Membrillos, que resultó con 83.2 mg/L (véase la Figura 174).

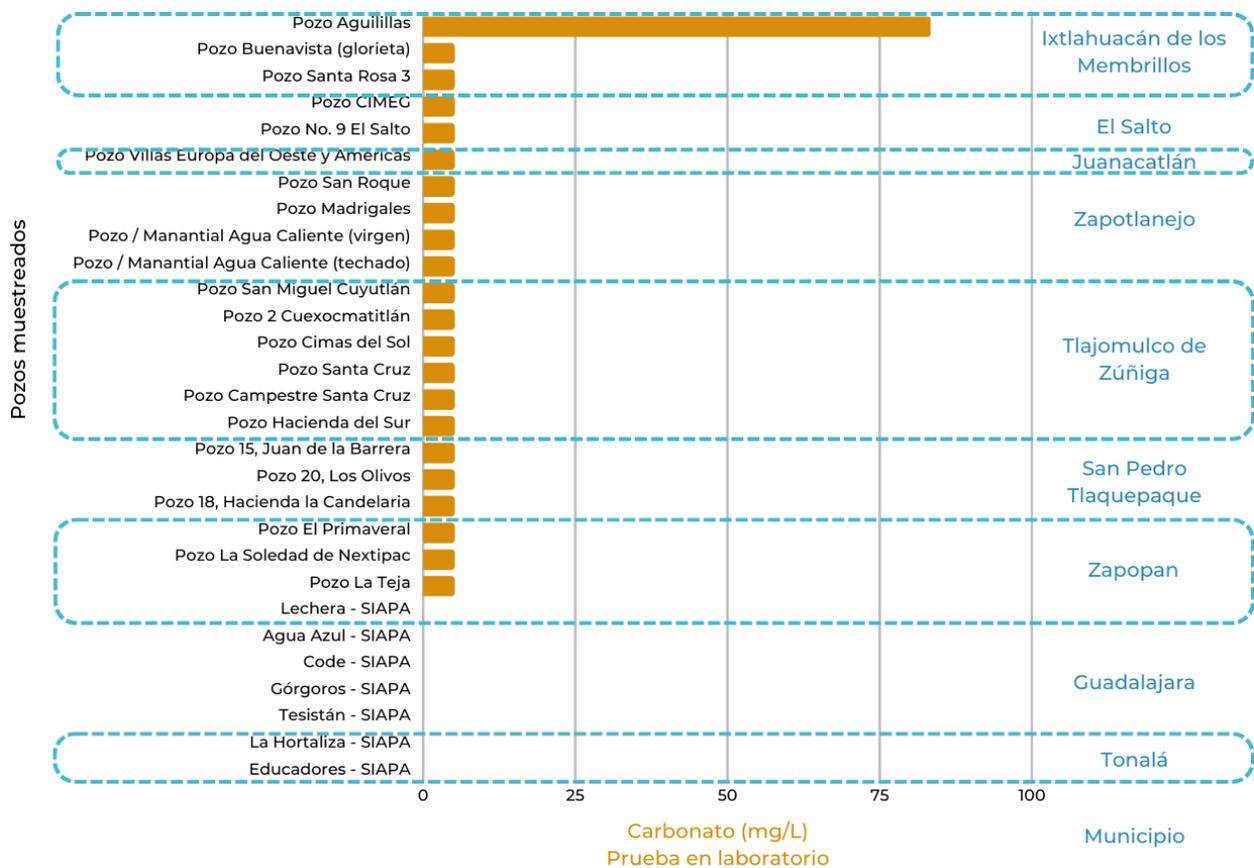


Figura 174. Resultados de las muestras de laboratorio: carbonato

El ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) se encuentra en la naturaleza y es esencial como nutriente para las plantas. Su presencia en aguas subterráneas y superficiales puede originarse por prácticas agrícolas intensivas, liberación de aguas residuales y degradación de compuestos nitrogenados presentes en desechos humanos, animales y vegetación. Las concentraciones de nitrato en aguas superficiales pueden variar rápidamente debido a factores como escorrentía de fertilizantes y procesos biológicos. En cambio, en aguas subterráneas, los cambios suelen ser más graduales (WHO, 2022, pág. 438). Para los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), se establece un límite guía de 50 mg/L y, como referencia, para los nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) un límite de 3 mg/L, basado en efectos a corto plazo, pero protegiendo los efectos a largo plazo (WHO, 2022, pág. 198). No obstante, la NOM-127-SSA1-2021 especifica límite para el nitrógeno de nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) de 11 mg/L y de nitrógeno de nitritos ( $\text{N-NO}_2^-$ ) de 0.9 mg/L (DOF, 2022) Los resultados obtenidos en laboratorio muestran un valor mínimo de 0.05 mg/L en cuatro pozos, por el ajuste con base en LPC (en la prueba de laboratorio), y un valor máximo de 9.84 mg/L en el pozo Agua Azul - SIAPA. Por su parte, la concentración media fue de 2.21 mg/L de ion nitrato (véase la Figura 175). Así pues, ninguno rebasa los límites normativos o recomendados.

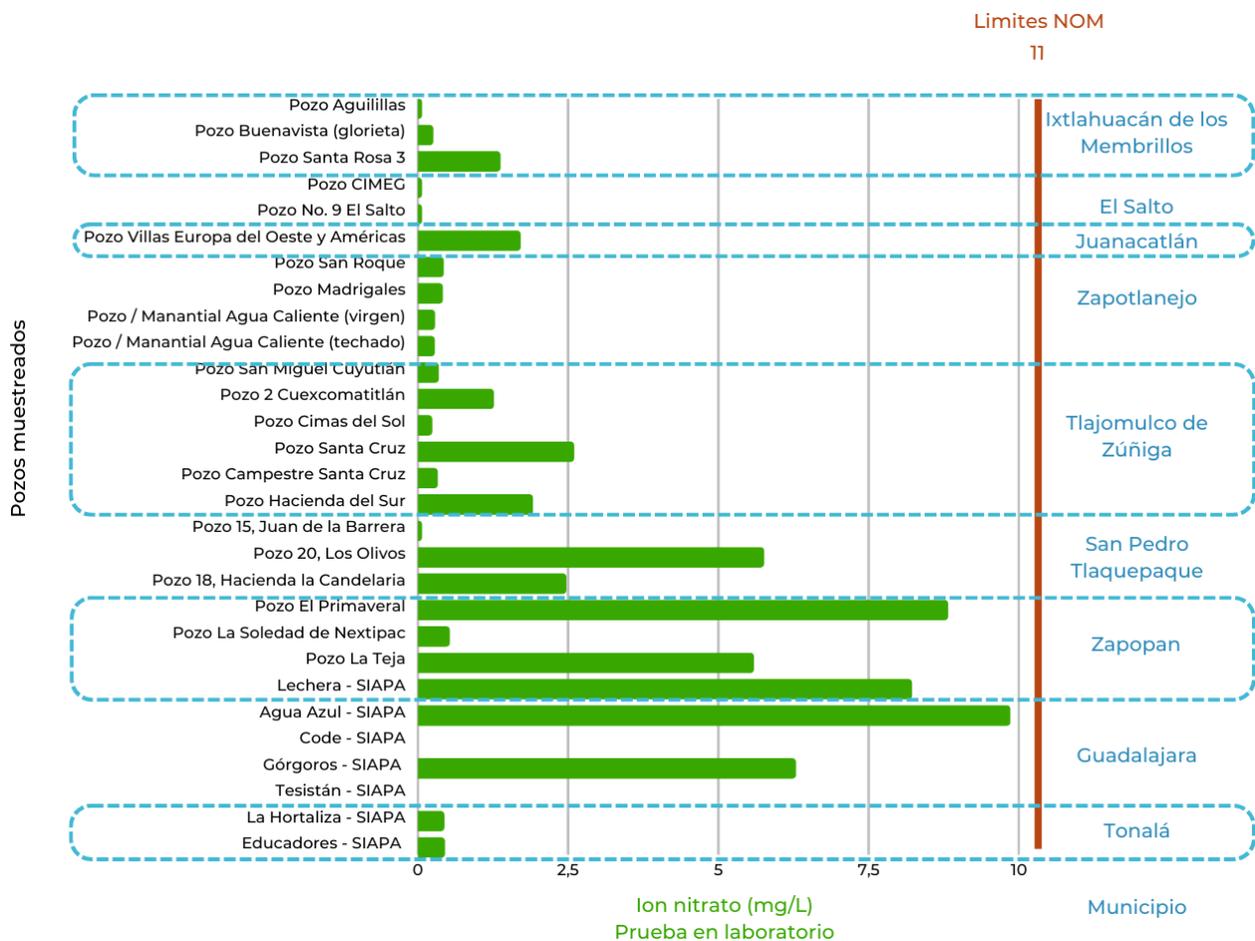


Figura 175. Resultados de las muestras de laboratorio: ion nitrato

En relación con el ion cloro o cloro libre ( $\text{Cl}^-$ ), este compuesto se utiliza regularmente para desinfectar el agua. Para lograr una desinfección eficaz, es necesario mantener una concentración residual de cloro libre de  $\geq 0.5 \text{ mg/L}$ , después de un contacto de al menos 30 minutos, a un  $\text{pH} < 8.0$ . Además, se debe mantener un nivel de cloro residual en todo el sistema de distribución, con un mínimo de  $0.2 \text{ mg/L}$  en el punto de entrega. El límite superior establecido por la OMS es de  $5 \text{ mg/L}$  (WHO, 2022, pág. 202). De manera similar, para productos químicos empleados en el tratamiento del agua o en materiales en contacto con el agua potable, como el clorato ( $\text{HClO}_3$ ) y el clorito ( $\text{ClO}_2^-$ ), se establece un límite provisional de  $0.7 \text{ mg/L}$ . Esto se debe a que la desinfección conllevar a que este valor se supere (WHO, 2022, págs. 203-204).

La NOM-127-SSA1-2021 especifica límites para el cloro residual de  $0.2$  a  $1.5 \text{ mg/L}$ , tanto para asegurar la purificación del agua, como para que el cloro no reaccione con otros compuestos y genere productos que afecten la salud (DOF, 2022). En los resultados obtenidos, la mayoría de los pozos mostraron valores menores a  $0.1 \text{ mg/L}$ , ajustados según LPC (prueba en laboratorio); solo se obtuvo un valor de  $66.8 \text{ mg/L}$  en el pozo Aguillillas, en el municipio de Ixtlahuacán de los Membrillos (véase la Figura 176). Se considera pertinente resaltar que, durante la visita de muestreo, el olor a cloro era altamente perceptible, así como su color ligeramente amarillo. La concentración de cloro en este pozo rebaza significativamente la normativa y es imperativo verificar el funcionamiento del difusor de cloro.

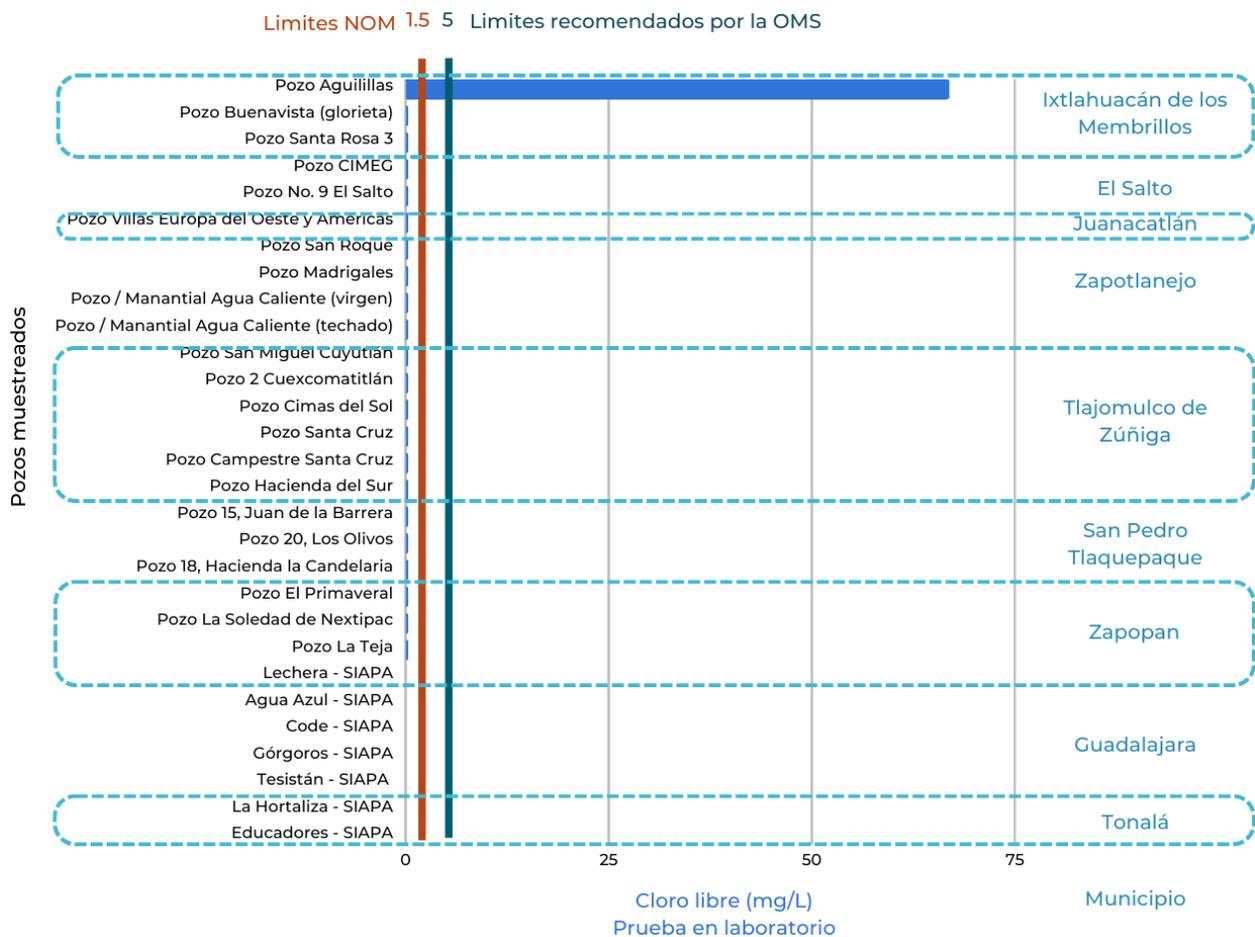


Figura 176. Resultados de las muestras de laboratorio: ion cloro

En lo que al ion sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) respecta, concentraciones de este se encuentran, de forma natural, en muchos minerales y se utilizan comercialmente, sobre todo en la industria química. Estos iones se vierten al agua procedente de efluentes industriales y mediante deposición atmosférica. No obstante, las concentraciones más altas suelen encontrarse en aguas subterráneas y provenientes de fuentes naturales (WHO, 2022, pág. 245). La presencia de sulfato en el agua potable puede causar un sabor notable, y niveles muy altos pueden causar un efecto laxante en consumidores no acostumbrados. El deterioro del gusto varía según la naturaleza del catión asociado. Se ha encontrado que los umbrales de sabor varían de 250 mg/L, para el sulfato de sodio, a 1,000 mg/L, para el sulfato de calcio. En general, se considera que la alteración del gusto es mínima a niveles inferiores a 250 mg/L (WHO, 2022, págs. 245-246). Sin embargo, debido a los efectos gastrointestinales resultantes de la ingesta de agua potable con altos niveles de sulfato, se recomienda que las autoridades sanitarias sean notificadas de las fuentes de agua contaminadas con concentraciones de sulfato superiores a 500 mg/L (WHO, 2022, pág. 466). La NOM-127-SSA1-2021 establece el límite para sulfato en 400 mg/L (DOF, 2022). Los valores obtenidos muestran un valor mínimo de 5.14 mg/L, por el ajuste con base en LPC (ajuste del laboratorio), y un valor máximo de 112.45 mg/L en el pozo Agua Azul – SIAPA. Como resultado, el valor promedio de los pozos fue de 17.99 mg/L para el ion sulfato (véase la Figura 177).

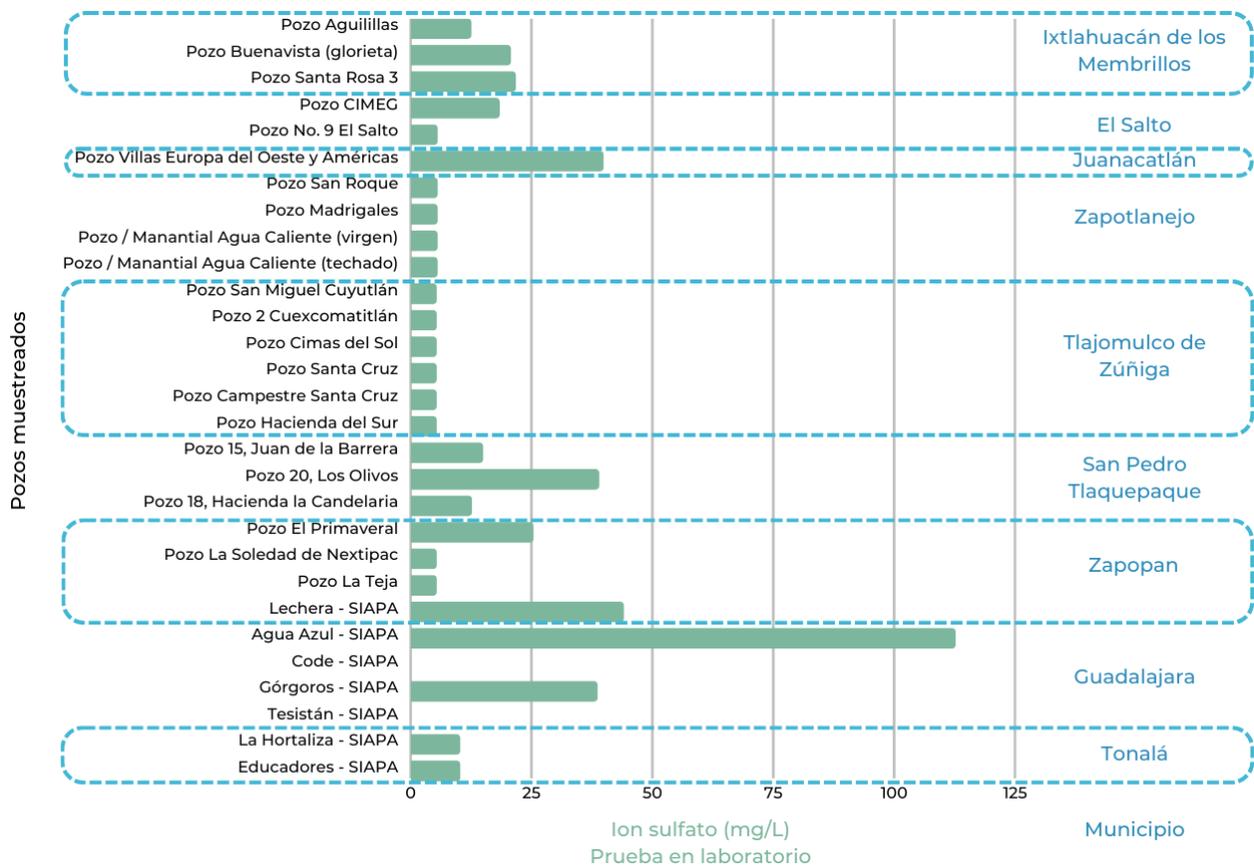


Figura 177. Resultados de las muestras de laboratorio: ion sulfato

Es importante destacar que se observaron niveles significativamente elevados de ciertos parámetros en el pozo Villas Europa del Oeste y Américas, ubicado en el municipio de Juanacatlán. En contraste, el pozo La Soledad de Nextipac, en Zapopan, presentó valores notablemente bajos en parámetros como conductividad eléctrica y dureza ( $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ). A su vez, el Pozo 15, denominado Juan de la Barrera, ubicado en San Pedro Tlaquepaque, registró los niveles más elevados de potasio y bicarbonato. Por último, el pozo Aguilillas, en el municipio de Ixtlahuacán de los Membrillos, tuvo un valor de 66.8 mg/L de cloro residual, mismo que se percibió en la visita de campo, así como su color ligeramente amarillo. La concentración de cloro en este pozo supera considerablemente las normativas establecidas, por lo que es importante verificar el funcionamiento del difusor de cloro y tomar medidas correctivas.

## ANEXO 7. SELECCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL

Para seleccionar los puntos de control, se revisaron diferentes fuentes de información puntos como manantiales, pozos, norias, etc. Algunas fuentes de información fueron: INEGI, IIEG, CONAGUA, SIAPA, CEA, información proporcionada por los municipios del AMG, investigaciones científicas, recorridos en campo, entre otras. Por lo anterior, algunos puntos son duplicados de otros, lo cual sirve para corroborar la ubicación del punto de interés y complementar la información disponible.

Para generar las propuestas, se tomó en consideración la densidad de puntos en todas las zonas de interés, con el fin de tener un control representativo de los sistemas hidrogeológicos. Con ello, se seleccionaron los pozos propuestos, tomando en cuenta, además, la calidad y cantidad de información que tenían. La tabla 63 muestra los pozos propuestos para el sistema de control hidrogeológico.

Tabla 63. Pozos propuestos para el sistema de control hidrogeológico.

ID	Nombre del Pozo	Coordenadas		Municipio	Sistema hidrogeológico	Profundidad del pozo	Nivel dinámico	Nivel Estático	Estado de operación	Fuente	Zona de Recarga	Vulnerabilidad
		UTM X	UTM Y									
1	LOMAS DEL SALTO	689130	2274709	El Salto	Los Altos	120	0	0	Desconocido		3	Alta
2	POZO NO. 9 EL SALTO	689967	2270462	El Salto	Toluquilla	180	172	112	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	3	Moderada
3	LOMAS DEL VERDE	678608	2275455	El Salto	Toluquilla	115	107	94	Desconocido		3	Moderada
4	CIMEG	682728	2271496	El Salto	Toluquilla	200	59	57	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	4	Moderada
5	AGUA AZUL 1	671930	2285387	Guadalajara	Atemajac	20	0	4	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	5	Alta
6	INJUVE/CODE	672098	2289857	Guadalajara	Atemajac	0	97	22	Pozo inactivo	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	3	Alta
7	PARQUE ITALIA	667797	2289328	Guadalajara	Atemajac	0	68	16	Desconocido		5	Alta
8	JARDINES DEL BOSQUE	668001	2285318	Guadalajara	Atemajac	0	113	22	Desconocido		3	Alta
9	N.1 RINCONADA LAS LOMAS	685508	2262512	Ixtlahuacán de los Membrillos	Ixtlahuacán	250	150	100	Desconocido		4	Moderada
10	N.1 AGUILILLAS	686827	2251294	Ixtlahuacán de los Membrillos	Ixtlahuacán	170	71	55	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	3	Moderada
11	N.1 LA CAÑADA (LUIS GARCÍA)	681887	2254152	Ixtlahuacán de los Membrillos	Ixtlahuacán	114	50	35	Desconocido		3	Moderada
12	N.1 ATEQUIZA (CITEC)	693949	2257039	Ixtlahuacán de los Membrillos	Ixtlahuacán	200	40	25	Desconocido		4	Alta
13	EL SACRIFICIO	687493	2257675	Ixtlahuacán de los Membrillos	Ixtlahuacán	70	30	10	Desconocido		4	Alta
14	SANTA ROSA	684204	2258268	Ixtlahuacán de los membrillos	Ixtlahuacán	50	18	10	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	3	Alta
15	PZO 6 NUÑO	689417	2267113	Juanacatlán	Toluquilla	190	0	0	Desconocido		4	Moderada
16	JUAN DE LA BARRERA	673333	2275333	San Pedro Tlaquepaque	Toluquilla	163	109	53	Desconocido		3	Moderada
17	LOS OLIVOS	668327	2276598	San Pedro Tlaquepaque	Toluquilla	330	163	70	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	3	Moderada
18	POZO 2 LOMAS DE TEJEDA	666376	2263512	Tlajomulco de Zúñiga	Cajititlán	0	80	72	Desconocido		5	Alta
19	PEÑAFIEL	663094	2262675	Tlajomulco de Zúñiga	Cajititlán	0	0	0	Desconocido		5	Moderada
20	POZO 2 CUEXCOMATITLAN	670838	2260291	Tlajomulco de Zúñiga	Cajititlán	160	77	71	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	4	Moderada
21	POZO 3 SAN MIGUEL CUYUTLAN	667368	2258429	Tlajomulco de Zúñiga	Cajititlán	0	59	49	Desconocido		4	Moderada
22	LA TEJA	658193	2261571	Tlajomulco de Zúñiga	San Isidro	0	0	0	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	5	Alta
23	SANTA CRUZ DE LA LOMA (TEPETATES)	651283	2265842	Tlajomulco de Zúñiga	San Isidro	0	0	0	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	4	Alta
24	BUENAVISTA	654272	2262339	Tlajomulco de Zúñiga	San Isidro	140	30	22	Desconocido		3	Alta

ID	Nombre del Pozo	Coordenadas		Municipio	Sistema hidrogeológico	Profundidad del pozo	Nivel dinámico	Nivel Estático	Estado de operación	Fuente	Zona de Recarga	Vulnerabilidad
		UTM X	UTM Y									
25	SANTA CRUZ DE LAS FLORES (VICENTE TRIGO)	655866	2265513	Tlajomulco de Zúñiga	San Isidro	0	35	21	Desconocido		5	Alta
26	SAN VICENTE " POZO 3 EL ZAPOTE "	677477	2268742	Tlajomulco de Zúñiga	Toluquilla	140	63	45	Desconocido		5	Moderada
27	HACIENDAS DEL SUR	659322	2272291	Tlajomulco de Zúñiga	Toluquilla	0	120	64	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	5	Alta
28	POZO 3 CHULAVISTA	671761	2267605	Tlajomulco de Zúñiga	Toluquilla	0	0	0	Desconocido		3	Alta
29	TOLUQUILLA 12	669093	2273280	Tlajomulco de Zúñiga	Toluquilla	250	0	14.61	Pozo inactivo	GEOEX-SIAPA, 2003	5	Alta
30	VILLAS LA ALAMEDA	682063	2268381	Tlajomulco de Zúñiga	Toluquilla	230	178	112	Desconocido		3	Moderada
31	SAN LUCAS POZO 1	671270	2257159	Tlajomulco de Zúñiga	Cajititlán	0	60	51	Pozo en operación		4	Alta
32	EDUCADORES JALISCIENCES	682057	2283254	Tonalá	Atemajac	0	225	123	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	3	Moderada
33	LA HORTALIZA	680818	2284252	Tonalá	Atemajac	0	132	128	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	3	Moderada
34	PARAJE SAN ISMAEL	691144	2280002	Tonalá	Los Altos	0	210	111	Desconocido		4	Moderada
35	PASEOS DE LA CAÑADA	687946	2281889	Tonalá	Los Altos	0	118	109.5	Desconocido		3	Moderada
36	TATEPOSCO 2	683202	2278574	Tonalá	Toluquilla	0	82	79	Desconocido		3	Moderada
37	BIMBO	659957	2290512	Zapopan	Atemajac	0	104	13.3	Desconocido		3	Moderada
38	EL SAUZ (LOS ROBLES)	664351	2295025	Zapopan	Atemajac	0	170	99	Desconocido		5	Moderada
39	HACIENDA REAL (TANQUE JARDINES DE GUADALUPE)	664924	2285686	Zapopan	Atemajac	0	140	58	Desconocido		5	Alta
40	TESISTÁN 71	656183	2300852	Zapopan	Atemajac	0	118	66.81	Desconocido		3	Alta
41	EL PRIMAVERAL	649754	2292065	Zapopan	Atemajac	200	35	10	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	5	Alta
42	MESÓN DE COPALA	663348	2306053	Zapopan	Atemajac	206	128	125.4	Desconocido		3	Moderada
43	NEXTIPAC ADOBERA	652601	2297053	Zapopan	Atemajac	225	0	92	Desconocido		4	Alta
44	LA ESCOBA	662639	2300944	Zapopan	Atemajac	165	113	73.4	Desconocido		4	Moderada
45	TESISTÁN 43	659949	2296803	Zapopan	Atemajac	0	102.79	81	Desconocido		5	Alta
46	MIGUEL DE LA MADRID	663029	2279665	Zapopan	Toluquilla	169.5	65.8	54	Desconocido		3	Moderada
47	POZO SAN ROQUE	698034	2286142	Zapotlanejo	Los Altos	382	0	243.5	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	4	Moderada
48	POZO CUCHILLAS	701319	2274928	Zapotlanejo	Los Altos	0	0	0	Desconocido		4	Alta
49	COYOTES	715557	2277338	Zapotlanejo	Los Altos	250	43	43	Desconocido		3	Moderada
50	POZO MADRIGALES	710181	2287106	Zapotlanejo	Los Altos	200	0	0	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	4	Alta
51	MANANTIAL DE LA VIRGEN	706543	2280942	Zapotlanejo	Los Altos	0	0	0	Pozo en operación	Vista de campo Enlace Ambiental, 2023	3	Alta
52	CAÑADA SILVESTRE	701738	2290411	Zapotlanejo	Los Altos	185	135	123	Desconocido		4	Moderada
53	POZO LA BARAÑA (COBAEJ)	697028	2277652	Zapotlanejo	Los Altos	250	0	86	Desconocido		3	Moderada

## ANEXO 8. EQUIPO PARA MONITOREO DE PARÁMETROS

Las herramientas de medición necesarias se pueden distinguir en dos grandes momentos: muestreo directamente en el pozo y análisis en el laboratorio acreditado. Para el primero, también conocido como monitoreo *in situ*, se incita a instalar registradores automáticos.

### Equipo Monitoreo *in situ*

Cuando se realizó la propuesta de monitoreo de GEOEX y SIAPA, se consideraron los equipos y accesorios de la Tabla 5 (GEOEX-SIAPA, Diseño e instalación de un sistema de monitoreo del acuífero, 2003)

Tabla 64 Monitoreo *in situ* automático (GEOEX-SIAPA, 2003).

Monitoreo <i>in situ</i> automático (GEOEX-SIAPA, Diseño e instalación de un sistema de monitoreo del acuífero, 2003)	
Equipos y/o accesorios	
	Titulador automático, modelo 702 sm titrino, metrohm.
	Levellogger ltc m100, c50
	Barologger M1.5, F5
	Paquete de comunicación lectura directa para levellogger
	Incluye: lector óptico, cd con manual y software para dos y windows y cable de interfase
	Paquete de conectores lectura directa para levellogger
	Paquete de conectores lectura directa para barologger
	Leveloader con cable de interfase para levellogger
	Tapa pozo 2" dual para levellogger y barologger
	Solución Para Calibración De Cond. Eléctrica (5000 $\mu\text{s}/\text{Cm}$ )
	Cables de lectura directa para levellogger
	Cables de lectura directa para barologger

En caso de realizar el monitoreo manual, es indispensable contar con:

Tabla 65. Monitoreo *in situ* manual (AMVA, 2017).

Monitoreo <i>in situ</i> manual (AMVA, 2017)	
Equipos y/o accesorios	
	Sonda para medición de niveles
	Baterías de repuesto para la sonda
	Conductímetro
	pH-metro
	Termómetro
	Agua destilada
	Bomba de vacío o jeringa
	Frasco según el tipo de muestra a tomar
	Goteros con reactivos para preservación
	Etiquetas
	Formatos de campo
	Mapa con ubicación de puntos a muestrear (se recomienda un mapa digital y uno físico)
	Lista con direcciones y teléfonos de los puntos a monitorear
	Lápices y lapiceros
	Tabla porta papeles

## Equipo análisis en laboratorio

Inicialmente se buscaron materiales y equipo que cumplieran con la normativa mexicana. En especial, se analizó la NOM-127-SSA1-2021, en la cual se establecen los límites máximos permisibles de calidad del agua para el uso y consumo de agua. Además, se consideraron también algunos parámetros internacionales, como es el caso del arsénico, con el fin de comparar los valores establecidos y revisar los resultados obtenidos en distintos marcos normativos. Entre otras fuentes bibliográficas, se resalta el ejemplo utilizado por el Manual de Monitoreo de Agua Subterránea del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en el que se enfatiza que las muestras deben ser analizadas en laboratorios acreditados, que cuenten con equipos y técnicas de análisis calibradas para detectar límites de concentración bajos, incluso por debajo de los valores establecidos en la normatividad aplicable hacia el consumo humano. En la Tabla 66 se listan los métodos de laboratorio utilizados por el Laboratorio de Calidad Ambiental de CORANTIOQUIA en la determinación de los parámetros (AMVA, 2017).

Tabla 66. Métodos de análisis de laboratorio. Laboratorio de Calidad Ambiental de CORANTIOQUIA (AMVA, 2017)

Métodos de análisis de laboratorio. Comparación a nivel mundial (AMVA, 2017)				
Parámetro por medir	Método de ensayo	Standar Methods	Expresión de la incertidumbre	Equipo de medición y ensayo
Alcalinidad total y fenolftaleína	Titulométrico	2320 B	0,034*C	Titulador automático, modelo 702 SM Titrino, METROHM.
Bicarbonatos	Titulométrico.	2320	N/D	LCA/FTi-2. Titulador automático, modelo 702 SM Titrino, METROHM.
Calcio	Titulométrico de EDTA (Espectrodo)	2340 C	2,03*10-2 C	Titulador automático, modelo 702 SM Titrino, METROHM. Espectrodo
Carbono Orgánico	Oxidación por combustión catalítica/infrarrojo no dispersivo	5310 B	N/D	LCA/CCT-1. Analizador de Carbono Orgánico Total, modelo Apollo 9000, TELEDYNE
Carbonatos	Titulométrico	2320	N/D	LCA/FTi-2. Titulador automático, modelo 702 SM Titrino, METROHM.
Cianuro total	Titulométrico	4500CN- D;	0,05mgCN- /L	LCA/FTi-2. Titulador automático, modelo 702 SM Titrino, METROHM.
Color	Comparación visual	2120B;	N/D	
Cloruros	Titulométrico	4500-Cl B	0,01*C	Titulador automático, modelo 702 SM Titrino, METROHM.
Conductividad	Electrométrico	2510 B	N/D	Conductímetro, modelo 150 <sup>a</sup> +, ORION.
Coliformes Totales, Fecales y E. Coli	Método tubos múltiples	9223;	N/D	LCA/MLu-2. Lámpara de luz UV Merck. LCA/MIn-2. Incubadora con controlador de temperatura, modelo IDBO-9, ECQT/CHALLENGER.
Cromo	Absorción atómica (llama óxido nitroso - acetileno)	3111D;	N/D	Espectrofotómetro de Absorción Atómica con llama, horno de grafito y automuestreador, modelo M5, TERMO ELECTRÓN CORPORATION.
Detergentes	Método colorimétrico surfactantes aniónicos como SAAM	5540C	N/D	Espectrofotómetro UV- VS - modelo HELVOS W, UNICAM.
DBO5	Test DBO 5días	5210B;	0,032*C	

Métodos de análisis de laboratorio. Comparación a nivel mundial (AMVA, 2017)				
Parámetro por medir	Método de ensayo	Standar Methods	Expresión de la incertidumbre	Equipo de medición y ensayo
DQO	Método colorimétrico- reflujo cerrado	5220D	*Rango bajo curva: 0 - 60mgO <sub>2</sub> /L: 0,068* <sup>c</sup> *Rango alto curva: > 60mgO <sub>2</sub> /L: 0,036* <sup>c</sup>	LCA/FTr-1. Termoreactor, modelo TR 300, MERCK LCA/FTr-2. Termoreactor, modelo TR 300, MERCK LCA/FUv1. Espectrofotómetro UV- S modelo HELVOS W, UNICAM.
Dureza total	Titulométrico de EDTA (Espectrodo)	2340 C	0,053* <sup>c</sup>	Titulador automático, modelo 702 SM Titrino, METROHM. Espectrodo.
Grasas y Aceites	gravimétrico - extracción soxhlet con hexano	5520D-F	N/D	LCA/PBa-3. Balanza analítica, modelo AB265-S/FACT, METTER TOLEDO. LCA/FEu-2. Extractor universal, modelo B-811, BUCHI.
Hierro	Fenantrolina	3500 Fe B	0,078* <sup>c</sup>	Plancha de calentamiento, modelo HP 47135, CIMAREC 3. Espectrofotómetro UV- VS modelo HELLOS α, UNICAM.
Magnesio	Absorción atómica (llama aire – acetileno)	3111 B	N/D	Espectrofotómetro de Absorción Atómica con llama, horno de grafito y automuestreador, modelo M5, TERMO ELECTRÓN CORPORATION.
Níquel	Absorción atómica (llama aire – acetileno)	3111B;	N/D	Espectrofotómetro de Absorción Atómica con llama, horno de grafito y automuestreador, modelo M5, TERMO ELECTRÓN CORPORATION.
Nitratos	Electrométrico (Ion selectivo nitrato)	4500 (NO <sub>3</sub> )-D	0,031* <sup>c</sup>	Medidor de ion selectivo, modelo 781, METROHM.
Nitritos	Colorimétrico	4500 (NO <sub>2</sub> )-B	0,06* <sup>c</sup>	Espectrofotómetro UV- VS modelo HELLOS α, UNICAM.
Nitrógeno Amoniacal	Método Titulométrico	4500A, B, C	0,1* <sup>c</sup>	LCA/FKj-2. Destilador automático de nitrógeno, modelo UDK 142, VELD SCIENTIFICA. LCA/FTi-1. Titulador automático, modelo 702 SM Titrino, METROHM.
Ortofosfatos totales	Ácido ascórbico	4500-P E	0,02* <sup>c</sup>	Espectrofotómetro UV- VS modelo HELLOS α, UNICAM.
pH	Potenciométrico	4500H+ B	0,03* <sup>c</sup>	LCA/FTi-2. Titulador automático, modelo 702 SM Titrino, METROHM.

Métodos de análisis de laboratorio. Comparación a nivel mundial (AMVA, 2017)				
Parámetro por medir	Método de ensayo	Standar Methods	Expresión de la incertidumbre	Equipo de medición y ensayo
Potasio	Absorción atómica (llama aire - acetileno)	3111 B	N/D	Espectrofotómetro de Absorción Atómica con llama, horno de grafito y automuestreador, modelo M5, TERMO ELECTRÓN CORPORATION.
Sílice	Absorción atómica (llama óxido nitroso - acetileno)	3111 d	N/D	Espectrofotómetro de Absorción Atómica con llama, horno de grafito y automuestreador, modelo M5, TERMO ELECTRÓN CORPORATION.
Sodio	Absorción atómica (llama aire - acetileno)	3111 B	N/D	Espectrofotómetro de Absorción Atómica con llama, horno de grafito y automuestreador, modelo M5, TERMO ELECTRÓN CORPORATION.
Sólidos disueltos totales	Gravimétrico	2540 C-E	5,15*10 <sup>-2</sup> C	Balanza analítica, modelo BA 110S, SARTORIUS. Estufa, modelo ED53- UL, BINDER
Sulfatos	Medidor de turbidez	4500- (SO4)2- E	0,039*C	Turbidímetro Turbiquant 1500 T, MERCK
Sulfuros	yodométrico	4500S2-F;	N/D	LCA/FDo-7. Bureta Digital, modelo III (4487), BRAND.
Turbiedad	Nefelométrico	2130B	N/D	
Zinc	Absorción atómica (llama aire - acetileno)	3111B	N/D	Espectrofotómetro de Absorción Atómica con llama, horno de grafito y automuestreador, modelo M5, TERMO ELECTRÓN CORPORATION.

Fuente: Elaboración propia.

## Agradecimientos

Se desea expresar un agradecimiento a la Dirección de Gestión Integral del Agua y Drenaje de Zapopan, Coordinación de Servicios Municipales de Zapotlanejo, Dirección de Agua Potable de Juanacatlán, Sistema Administrativo Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ixtlahuacán de los Membrillos (SAMAPA), Dirección General del Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de El Salto (SIMAPES), Dirección de Agua Potable y Alcantarillado de San Pedro Tlaquepaque, Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Tlajomulco de Zúñiga (SIAT), Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA), Secretaria de Gestión Integral del Agua (SEGIA) y Comisión Estatal del Agua Jalisco (CEA) y a todos aquellos que colaboraron y brindaron su apoyo al proyecto del “Estudio de Hidrología Subterránea en el Área Metropolitana de Guadalajara (2023)”. Valoramos su disposición en compartir su conocimiento, tiempo y recursos, lo cual fue fundamental para la ejecución exitosa de los muestreos en campo, lo cual fue importante para obtener información de los sistemas hidrogeológicos de la región, lo que permitió la creación de un estudio sólido que sentará bases para la gestión del recurso hídrico en el Área Metropolitana de Guadalajara.



Elaboración del estudio de hidrología subterránea  
en el Área Metropolitana de Guadalajara

