"ESTUDIO QUE SIRVA COMO HERRAMIENTA BASE PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN MUNICIPAL HÍDRICO DE LARGO PLAZO"

INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

INFORME VIII

CHIHUAHUA, CHIHUAHUA

ELABORÓ:

DAVID HUMBERTO SÁNCHEZ NAVARRO

AGOSTO 2024

ESTUDIO PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN MUNICIPAL HÍDRICO DE LARGO PLAZO QUE INCLUYA POLÍTICAS Y ACCIONES EN MATERIA DE AGUA SUPERFICIAL, AGUA SUBTERRÁNEA, DRENAJE PLUVIAL Y NUEVAS FUENTES E INFRAESTRUCTURA PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL MUNICIPIO.

ÍNDICE

CAPITULO OCTAVO: INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

1.	**Introducción**	**12**
1.1.	Antecedentes	13
1.2.	Objetivo, Procedimiento y Estructura del Informe	15
1.3.	Metodología	16
2.	**Acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS)**	**17**
2.1.	Modelo Geológico Conceptual	17
2.1.1.	Geología regional	18
2.1.2.	Estructura geológica	20
2.1.3.	Estratigrafía	20
2.1.4.	Geología estructural	24
2.1.5.	Geología del subsuelo	25
2.1.6.	Geofísica	27
2.2.	Factores Externos que Impactan el ACHS	29
2.2.1	Cambio climático	29
2.2.2	Precipitación	30
2.2.3	Temperatura	38
2.2.4	Hidrografía	46
2.2.5	Vegetación	48
2.2.6	Edafología	49
2.3.	Hidrogeología	50
2.3.1	Parámetros hidráulicos del sistema	51
2.3.2	Censo de aprovechamientos	51
2.3.3	Rasgos indicadores de sistemas de flujo	53
3.	**Acuífero Tabalaopa-Aldama (ATA)**	**71**
3.1.	Modelo Geológico Conceptual	71
3.1.1.	Geología regional	72

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

3.1.2. Estructura geológica 74
3.1.3. Estratigrafía 74
3.1.4. Geología estructural 76
3.1.5. Geología del subsuelo 77
3.1.6. Geofísica 79
3.2. Factores Externos que Impactan el ATA 80
3.2.1. Cambio climático 80
3.2.2. Precipitación 81
3.2.3. Temperatura 81
3.2.4. Hidrografía 83
3.2.5. Vegetación 85
3.2.6. Edafología 86
3.3. Hidrogeología 88
3.3.1 Parámetros hidráulicos del sistema 89
3.3.2 Censo de aprovechamientos 89
3.3.3 Rasgos indicadores de sistemas de flujo 91
4. Acuífero El Sauz-Encinillas (ASE) 107
4.1. Modelo Geológico Conceptual 107
4.1.1. Geología regional 108
4.1.2. Estructura geológica 110
4.1.3. Estratigrafía 110
4.1.4. Geología estructural 112
4.1.5. Geología del subsuelo 113
4.1.6. Geofísica 115
4.2. Factores Externos que Impactan el ASE 116
4.2.1. Cambio climático 116
4.2.2. Precipitación 117
4.2.3. Temperatura 117
4.2.4. Hidrografía 118
4.2.5. Vegetación 120
4.2.6. Edafología 121

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

4.3. Hidrogeología 122

4.3.1 Parámetros hidráulicos del sistema 123

4.3.2 Censo de aprovechamientos 123

4.3.3 Rasgos indicadores de sistemas de flujo 125

5. Referencias 140

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa del Acuífero Chihuahua-Sacramento. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI (23) y CONAGUA (24). 19

Figura 2. Geología general del Acuífero Chihuahua-Sacramento. Fuente: CONAGUA (2023) (14). . 26

Figura 3. Sección transversal geológica del ACHS. Fuente: CONAGUA (2023) (14). 27

Figura 4. Imagen de la clasificación de las estaciones climatológicas de CONAGUA. Sección CONAGUA (2024) (47). 32

Figura 5. Distribución de la precipitación mensual acumulada para las estaciones JCAS, Potabilizadora, Prot. Civil 2019 y 2020. Fuente: Elaboración propia con información de la Red de la JCAS. 34

Figura 6. Distribución de la precipitación mensual acumulada para las estaciones JCAS, Potabilizadora, Prot. Civil 2021 y 2022. Fuente: Elaboración propia con información de la Red de la JCAS. 35

Figura 7. Distribución de la precipitación mensual acumulada para las estaciones JCAS, Potabilizadora, Prot. Civil 2021 y 2022. Fuente: Elaboración propia con información de la Red de la JCAS. 36

Figura 8. Precipitación anual acumulada para las estaciones JCAS, Potabilizadora, Prot. Civil 2019 al 2023. Fuente: Elaboración propia con información de la Red de la JCAS. 37

Figura 9. Hidrografía dentro del Acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS). Fuente: Elaboración propia. 47

Figura 10. Volúmenes autorizados por uso de forma anual en el ACHS. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA (53). 53

Figura 11. Topografía del acuífero Chihuahua-Sacramento. Fuente: CONAGUA (2023) (14). 55

Figura 12. Pozos que son parte de la red piezométrica del ACHS. Fuente: CONAGUA (2021) (56).. 56

Figura 13. Profundidad del nivel estático para el año 2023 del ACHS. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 61

Figura 14. Elevación del nivel estático para el año 2023 del ACHS. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 63

Figura 15. Evolución del nivel estático para el año 2023 del ACHS. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 65

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Figura 16. Relación de la profundidad de pozo contra la profundidad del nivel estático ACHS. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 66
Figura 17. Mapa del Acuífero Tabalaopa-Aldama. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI (23) y CONAGUA (24). 73
Figura 18. Geología general del Acuífero Tabalaopa-Aldama. Fuente: CONAGUA (2023) (63). 78
Figura 19. Hidrografía dentro del Acuífero Tabalaopa-Aldama (ATA). Fuente: Elaboración propia. 84
Figura 20. Volúmenes autorizados por uso de forma anual en el ATA. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA (53). 91
Figura 21. Topografía del acuífero Tabalaopa-Aldama. Fuente: CONAGUA (2023) (63). 93
Figura 22. Pozos que son parte de la red piezométrica del ATA. Fuente: CONAGUA (2021) (56). ... 94
Figura 23. Profundidad del nivel estático para el año 2023 del ATA. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 99
Figura 24. Elevación del nivel estático para el año 2023 del ATA. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 101
Figura 25. Evolución del nivel estático para el año 2023 del ATA. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 103
Figura 26. Relación de la profundidad de pozo contra la profundidad del nivel estático ATA. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 104
Figura 27. Mapa del Acuífero El Sauz - Encinillas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI (23) y CONAGUA (24). 109
Figura 28. Geología general del Acuífero El Sauz-Encinillas. Fuente: CONAGUA (2023) (76). 114
Figura 29. Hidrografía dentro del Acuífero El Sauz-Encinillas (ASE). Fuente: Elaboración propia. . 119
Figura 30. Volúmenes autorizados por uso de forma anual en el ASE. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA (53). 125
Figura 31. Topografía del acuífero El Sauz-Encinillas. Fuente: CONAGUA (2023) (76). 127
Figura 32. Pozos que son parte de la red piezométrica del ASE. Fuente: CONAGUA (2021) (56). . 128
Figura 33. Profundidad del nivel estático para el año 2023 del ASE. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 132
Figura 34. Elevación del nivel estático para el año 2023 del ASE. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 134

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Figura 35. Evolución del nivel estático para el año 2023 del ASE. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 136
Figura 36. Relación de la profundidad de pozo contra la profundidad del nivel estático ASE. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023). 137

Índice de Tablas

Tabla 1. Estaciones climatológicas utilizadas para el estudio 2015-JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH, precipitación mensual (26)..... 30

Tabla 2. Estimación de precipitación medial anual en el acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS), obtenida en el estudio 2015-JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH (26). 31

Tabla 3. Características de la estación climatológica Majalca. Fuente: elaboración propia con información de JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH (2015). 31

Tabla 4. Precipitación acumulada de cada año (mm). Fuente: elaboración propia. 33

Tabla 5. Variación mensual de precipitación en mm. Elaborada por el IMPLAN con datos proporcionados por CONAGUA (2019). 34

Tabla 6. Promedio multianual de los datos de temperatura. Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el IMPLAN del periodo 1960-2019, actualizado con datos de CONAGUA (2023). 39

Tabla 7. Estaciones climatológicas utilizadas para el estudio 2015-JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH, temperatura promedio mensual (26). 41

Tabla 8. Estimación de las temperaturas medias de las estaciones operadas por JCAS. Fuente elaboración propia con datos de la JCAS. 42

Tabla 9. Estimación de las temperaturas máximas medias de las estaciones operadas por JCAS. Fuente elaboración propia con datos de la JCAS. 43

Tabla 10. Periodos cálidos y fríos, Índice del Niño Oceánico (ONI). Fuente: NOAA (2024) (50)..... 44

Tabla 11. Resumen de unidades hidrogeológicas en el acuífero Chihuahua Sacramento. Fuente: Estudio de evaluación de fuentes, JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH,2015 (26). 50

Tabla 12. Resumen de aprovechamientos con folio 8 registrados en el ACHS. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA (53). 52

Tabla 13. Características de los aprovechamientos utilizados para el análisis piezométrico en el ACHS. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS 57

Tabla 14. Temperatura promedio mensual (C°) 2019-2023, estaciones observatorio CONAGUA y aeropuerto. Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA (2023)..... 82

Tabla 15. Resumen de unidades hidrogeológicas en el acuífero Tabalaopa-Aldama. Fuente: Estudio de evaluación de fuentes, JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH,2015 (26). 88

Tabla 16. Resumen de aprovechamientos con folio 8 registrados en el ATA. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA (53). 90
Tabla 17. Características de los aprovechamientos utilizados para el análisis piezométrico en el ATA. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS 95
Tabla 18. Resumen de los resultados del estudio geofísico en el ASE. Fuente: estudio evaluación de fuentes actuales y de fuentes alternas (26). 115
Tabla 19. Resumen de unidades hidrogeológicas en el acuífero El Sauz-Encinillas. Fuente: Estudio de evaluación de fuentes, JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH,2015 (26). 122
Tabla 20. Resumen de aprovechamientos con folio 8 registrados en el ASE. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA (53). 124
Tabla 21. Características de los aprovechamientos utilizados para el análisis piezométrico en el ASE. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS 129

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Acrónimos

Acrónimo	Significado
FAO	La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
UACH	Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH)
JCAS	Junta Central de Agua y Saneamiento
IMGE	Instituto Mexicano de Geología
SARH	Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos
CNA	Comisión Nacional del Agua
lps	litros por segundo
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
CONAZA	Comisión Nacional de las Zonas Áridas
COP	Conferencia de las Partes (países que se encuentran dentro del CMNUCC)
DBO5	Demanda Biológica de Oxigeno
DQO	Demanda Química de Oxigeno
ENSO	El Niño Oscilación del Sur
F	Fluoruros Totales

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

FIRCO	Fideicomiso de Riesgo Compartido
FONDEN	Fondo de Desastres Naturales
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICLEI	Gobiernos Locales por la Sustentabilidad
IMPI	Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial
IMPLAN	Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático
JCAS	Junta Central de Agua y Saneamiento
JMAS	Junta Municipal de Agua y Saneamiento de la Ciudad de Chihuahua
MSM	Monitor de Sequia en México
NADM	Monitor de Sequia de América del Norte
NO3	Nitratos
NOAA	Centro Nacional de Información Climática de la Administración Nacional Oceánica y atmosférica de los Estados Unidos de América
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PACMUN	Plan de Acción Climática Municipal de Chihuahua

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

PEH	Plan Estatal Hídrico
PNH	Plan Nacional Hídrico 2020-2024
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SDT	Solidos Disueltos totales
SE	Secretaría de Economía
SECTUR	Secretaría de Turismo
SEDATU	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
SEDENA	Secretaría de la Defensa Nacional
SEGOB	Secretaría de Gobernación
SEMAR	Secretaría de Marina
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía de México
SEP	Secretaría de Educación Pública
SER	Secretaría de Relaciones Exteriores
SSPC	Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana
SST	Solidos Suspendidos Totales

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

CAPITULO OCTAVO: INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

En este capítulo se aborda el análisis de los tres acuíferos que abastecen al municipio de Chihuahua es fundamental para comprender la situación hidrogeológica de la región y tomar decisiones informadas sobre su gestión y conservación. La integración del análisis de los tres acuíferos que abastecen al municipio de Chihuahua es esencial para desarrollar estrategias de gestión y conservación del agua subterránea que sean efectivas y sostenibles a largo plazo.

1. Introducción

La integración del análisis de los tres acuíferos que abastecen al municipio de Chihuahua no abarca la generación de datos, muestreos y análisis, ni modelos de simulación. Su objetivo es comprender la compleja dinámica hidrogeológica de la región y adoptar decisiones fundamentadas en cuanto a su gestión y conservación. Para ello, se utiliza toda la información pública existente y la proporcionada por instituciones como JCAS, UACH, JMAS, IMPLAN, gobierno municipal de Chihuahua y otras organizaciones.

En primer lugar, es necesario evaluar la situación actual de los acuíferos, analizando los datos existentes proporcionados por las diferentes instituciones sobre la cantidad y calidad del agua subterránea. Esto incluye los niveles de sobreexplotación, tasas de extracción y la presencia de contaminantes como metales pesados y sustancias orgánicas.

Además, es imperativo identificar y comprender los principales problemas y riesgos asociados con la explotación de estos acuíferos, tales como la contaminación derivada de actividades humanas y la disminución de los niveles de agua debido a la sobreexplotación.

Asimismo, se realiza una evaluación de la disponibilidad y sostenibilidad a largo plazo del recurso hídrico subterráneo, teniendo en cuenta factores como la recarga natural, las demandas actuales y futuras de agua, y los posibles impactos del cambio climático.

Por último, con base en este análisis integral, se deben proponer medidas y acciones concretas para gestionar y conservar de manera efectiva los acuíferos. Esto incluye programas de monitoreo continuo, promoción de prácticas de uso eficiente del agua, protección de áreas de recarga y exploración de opciones de recarga inducida.

1.1. Antecedentes

Los acuíferos Chihuahua-Sacramento, Tabalaopa-Aldama y El Sauz Encinillas en el estado de Chihuahua, México, han sido objeto de numerosos estudios hidrogeológicos debido a su importancia para el suministro de agua en la región [1] [2] [3] [4] [5]. Por ejemplo, los estudios en el acuífero Chihuahua-Sacramento, como los de Cruz-Martínez et al. (2017) [6] y Barrios et al. (2019) [7], se han centrado en caracterizar hidrogeológicamente el acuífero, evaluar su calidad y cantidad de agua subterránea, y proponer estrategias para su manejo sostenible.

En el caso del acuífero Tabalaopa-Aldama, investigaciones como las de Ramos-Leal et al. (2015) [8] y Morales-Garduño et al. (2020) [9] han buscado comprender su estructura hidrogeológica, evaluar su vulnerabilidad a la contaminación y proponer medidas de gestión. Otros estudios como los de López-Hernández et al. (2018) [10] y García-Benavides et al. (2021) [11], han buscado entender su dinámica hidrogeológica, evaluar la disponibilidad de agua y los impactos del cambio climático.

En el acuífero El Sauz-Encinillas, investigaciones como las de Sandoval-Silva et al. (2016) [12] y Serrano-Cisneros et al. (2019) [13] han abordado temas como la caracterización hidrogeológica, la vulnerabilidad a la contaminación y la gestión integrada de los recursos hídricos. Estos estudios son fundamentales para comprender la dinámica de estos acuíferos, evaluar su estado y proponer medidas para garantizar su uso sostenible y la conservación del agua subterránea en la región.

En relación con el acuífero Chihuahua-Sacramento, los estudios realizados a lo largo de los años proporcionan una perspectiva cronológica del desarrollo del conocimiento hidrogeológico en la región. Por ejemplo, en marzo de 1978 se llevó a cabo un estudio geohidrológico del Valle de Chihuahua, contratado por la UACH y la CNA [2], con el objetivo de cuantificar y planificar la explotación de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca de Chihuahua. Este estudio incluyó la detección de fuentes adicionales para garantizar el suministro de agua potable hasta el año 2000.

En diciembre de 1980, se realizó un estudio geofísico complementario del Valle de Chihuahua, también contratado por la UACH y la CNA [1], con el objetivo de determinar la geometría del acuífero aluvial y evaluar parámetros hidrogeológicos clave. En 1985, se llevó a cabo un análisis de la problemática de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Chihuahua [3], integrando información de diversos estudios relacionados con las aguas subterráneas en la región. Posteriormente, en 1996, se realizó una actualización de las mediciones piezométricas de los acuíferos reactivados, con el objetivo de obtener información actualizada sobre la posición de la superficie piezométrica y el ritmo de abatimiento [5].

En 1996, se diseñaron redes de monitoreo para los acuíferos de los valles de Juárez, Jiménez-Camargo y Chihuahua-Sacramento, con el fin de obtener información piezométrica actualizada y establecer una red de monitoreo adecuada. En 2001, se desarrolló un modelo de simulación hidrodinámica del acuífero Chihuahua-Sacramento para comprender mejor su comportamiento y evaluar diferentes escenarios de explotación y gestión del agua.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En mayo de 2004, se realizó un análisis comparativo entre un modelo de flujo radial de dos capas y métodos convencionales para la interpretación de pruebas de bombeo, con el objetivo de evaluar la validez y aplicabilidad del modelo numérico. En 2005, se llevó a cabo un monitoreo piezométrico de los acuíferos de Ascensión, Palomas-Guadalupe Victoria, Valle de Juárez y Chihuahua-Sacramento, junto con un análisis de la calidad del agua, para actualizar el conocimiento sobre los niveles de agua y la evolución de los acuíferos.

En noviembre de 2008, se realizó un diagnóstico y modelación de sectores en la red de distribución de agua potable de Chihuahua, con el objetivo de evaluar su funcionamiento y proponer mejoras en la eficiencia del sistema. Finalmente, en diciembre de 2009, se llevó a cabo una actualización geohidrológica del acuífero Chihuahua-Sacramento para determinar la disponibilidad de agua subterránea y elaborar un modelo hidrogeológico actualizado [(14)].

Los estudios realizados en los acuíferos Tabalaopa-Aldama y Chihuahua-Sacramento han abordado diversos aspectos relacionados con la hidrogeología y la calidad del agua subterránea en la región. En 1972, un estudio hidrogeológico [(15)] proporcionó información detallada sobre los recursos hidráulicos de la zona de estudio. La prospección geofísica de 1980 exploró las posibilidades hidrogeológicas para abastecer agua a la ciudad de Chihuahua [(16)].

En 1991, se construyó un modelo digital de flujo para analizar el funcionamiento del acuífero Tabalaopa-Aldama y diseñar una política de explotación óptima [(17)]. En 1996, se determinó la geometría de este mismo acuífero [(18)] mediante sondeos eléctricos verticales. La actualización de mediciones piezométricas en 2004 y el monitoreo piezométrico en 2005 [(19)] [(20)] proporcionaron información actualizada sobre la evolución de los niveles de agua subterránea y su calidad.

Finalmente, en el año 2009, se realizó un análisis de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Tabalaopa-Aldama [(21)], utilizando modelos hidrodinámicos y métodos de SIG para evaluar los riesgos de contaminación.

Los estudios realizados tienen como objetivo principal comprender la hidrogeología de los tres acuíferos que abastecen al municipio de Chihuahua. Los objetivos específicos varían según el estudio, pero en general incluyen:

I) Definir las posibilidades hidrogeológicas de diferentes materiales en el área.
II) Cuantificar la disponibilidad de agua subterránea y su distribución.
III) Prever el funcionamiento hidráulico del acuífero.
IV) Identificar áreas favorables para el emplazamiento de pozos de explotación.
V) Estimar la extracción de agua subterránea para diferentes usos.
VI) Actualizar el conocimiento de las condiciones hidrogeológicas del acuífero.
VII) Formar y calibrar modelos matemáticos que simulen el comportamiento del acuífero.
VIII) Establecer una red de monitoreo confiable para obtener información hidrogeológica-piezométrica.
IX) Determinar la recarga al acuífero y definir las condiciones de explotación.

X) Proporcionar una base de datos integral para respaldar la disponibilidad de agua subterránea.

Los alcances de estos estudios incluyen la realización de sondeos eléctricos verticales, pruebas de bombeo, análisis hidro geoquímicos, recopilación de datos piezométricos, elaboración de modelos hidrodinámicos, entre otros.

1.2. Objetivo, Procedimiento y Estructura del Informe

El propósito fundamental de este informe es desarrollar los estudios que servirán como herramienta base para la elaboración de un Plan que articule un conjunto de acciones clave para lograr una gestión sostenible del agua en el Municipio de Chihuahua.

El objetivo principal es realizar un análisis detallado de las aguas subterráneas en el municipio, centrándose en los acuíferos principales que actualmente proveen el suministro de agua. El procedimiento consiste en recopilar y analizar la información, así como estructurarla por acuífero. Esta información será fundamental para la elaboración de recomendaciones específicas para la gestión sostenible del agua en el municipio de Chihuahua.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

1.3. Metodología

La metodología se llevó a cabo de la siguiente manera: se inició con la recopilación y análisis de información existente, que incluyó estudios previos, información histórica, presentaciones en congresos, artículos y tesis relacionadas con los acuíferos. Esta información fue recabada de distintos organismos gubernamentales, académicos y particulares.

Es importante señalar que el análisis de información no incluyó la validación o verificación de los datos proporcionados. Por lo tanto, se hace referencia a la fuente de cada estudio, dato o información presentada en este documento, para cualquier duda o aclaración.

Para cada acuífero, se definió la situación actual, considerando información oficial, como el nivel de sobreexplotación, tasas de extracción y calidad del agua. Esta información se complementó con estudios y publicaciones de particulares o instituciones diferentes a la CONAGUA, que es la institución oficial y normativa.

2. Acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS)

El acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS) es el principal y más antiguo recurso de agua subterránea para el abastecimiento de agua potable en la ciudad de Chihuahua. Su importancia radica en su papel como fuente confiable y estable de agua, su sostenibilidad a largo plazo y su valor histórico y cultural para la región. Por lo tanto, su adecuada gestión y conservación son fundamentales para garantizar un suministro continuo de agua potable para la comunidad y para preservar este recurso vital para las generaciones futuras.

Este acuífero, identificado con la clave 0830, se localiza en la porción central del Estado de Chihuahua y cubre una superficie de 1,889 km^2. Comprende parcialmente a los municipios de Chihuahua y Riva Palacio del Estado de Chihuahua, con un 94.3% y un 5.7% de la superficie del acuífero, respectivamente [(14)]. Administrativamente, el acuífero corresponde a la Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo. Los límites del acuífero Chihuahua-Sacramento están definidos por los vértices de la poligonal publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF) [(22)].

2.1. Modelo Geológico Conceptual

El modelo geológico conceptual del Acuífero Chihuahua-Sacramento se basa en la comprensión de la geología regional y local, la estructura geológica, los depósitos aluviales, la litología y los procesos de recarga y descarga. Este modelo proporciona una base sólida para comprender la dinámica hidrogeológica del acuífero y es fundamental para su gestión y conservación a largo plazo. El entendimiento de la geología del subsuelo y sus características estructurales son las principales condicionantes para la determinación de las capacidades hidráulicas de los estratos de los acuíferos.

2.1.1. Geología regional

El acuífero Chihuahua-Sacramento se localiza en el centro oriental del estado de Chihuahua, abarcando parte de los municipios Chihuahua, Aldama y Aquiles Serdán. Desde una perspectiva fisiográfica, forma parte de dos provincias geológicas: la Sierra Madre Occidental y la Sierra y Llanuras del Norte (Figura 1). Este acuífero se encuentra emplazado en depósitos aluviales Terciarios-Cuaternarios que llenaron una fosa tectónica, la cual está limitada por diversas sierras, con un espesor mayor en la región este y menor en el sur.

La litología predominante en la zona del acuífero incluye tobas terciarias riolíticas y derrames lávicos andesíticos en la sierra de Majalca y Nombre de Dios. Además, se presentan flujos máficos en el suroeste, y la unidad Riolita Mesteño, compuesta por derrames, domos y sills riolíticos, en los límites sureste, suroeste y noroeste del acuífero. También se encuentran rocas calcáreas cretácicas en el extremo sur del flanco occidental de la sierra Nombre de Dios y en el norte, en la localidad minera de estación Terrazas, así como en la parte sur de la sierra Majalca [14] [8].

En cuanto al modelo geológico conceptual del ACHS, se encuentra dentro de la región geológica de la Sierra Madre Occidental y las Sierras y Llanuras del Norte. Estas unidades fisiográficas influyen en la distribución de los depósitos aluviales y en la configuración de la cuenca hidrogeológica del acuífero.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

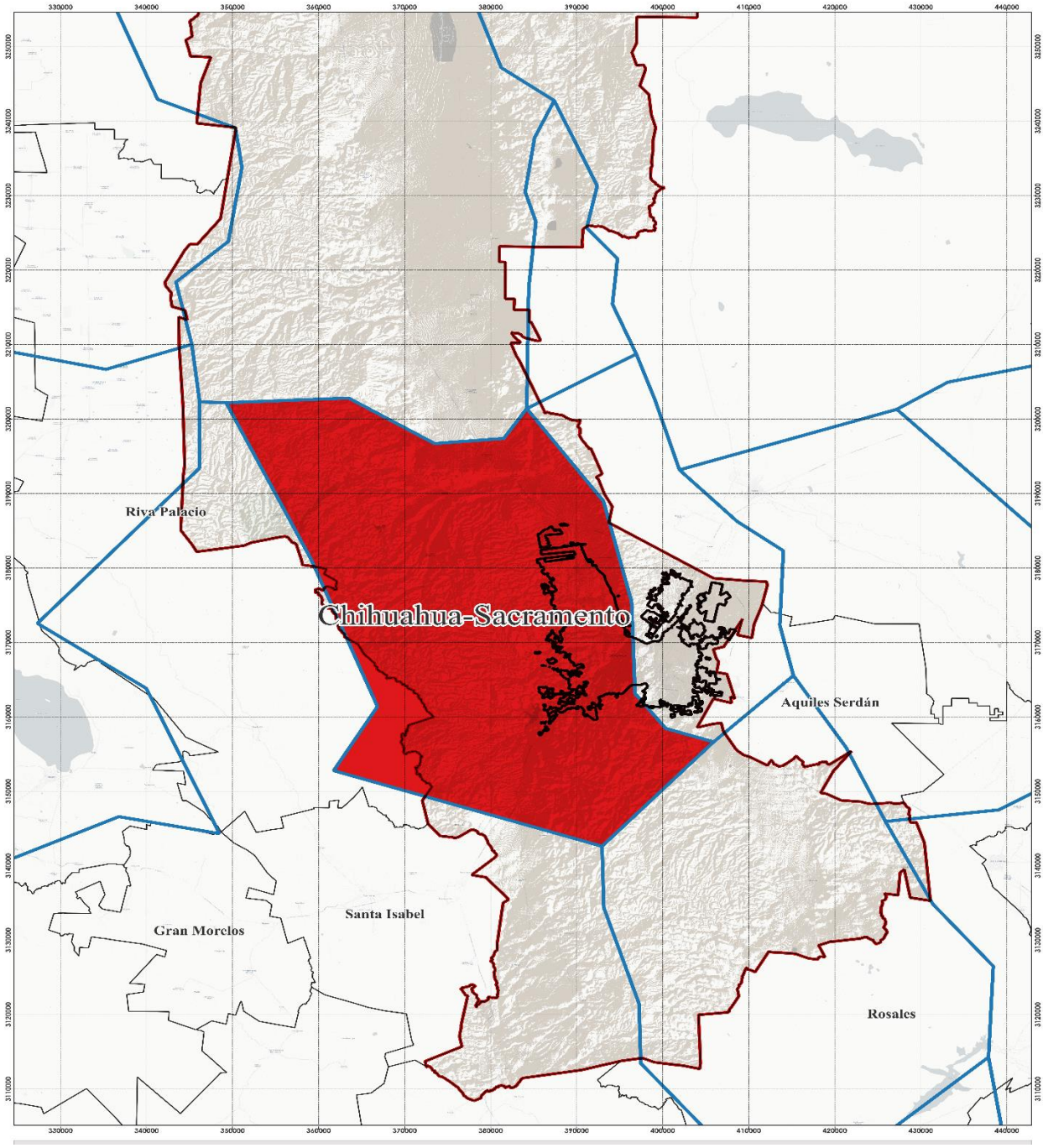


Figura 1. Mapa del acuífero Chihuahua-Sacramento. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI [23] *y CONAGUA* [24].

2.1.2. Estructura geológica

La estructura geológica aborda la estructura tridimensional de las rocas, considerando elementos como fallas, pliegues, fracturas y otras deformaciones que han afectado a las capas rocosas a lo largo del tiempo. La comprensión de la estructura geológica es crucial para entender cómo las fuerzas tectónicas, como la compresión, la tensión y el deslizamiento, han influido en el movimiento y la deformación de las rocas.

El acuífero en cuestión se encuentra ubicado en una fosa tectónica (Figura 1), la cual está delimitada por diversas formaciones geológicas, como la sierra La Carbonera al oeste y la Sierra Nombre de Dios al este [(25)]. Estas estructuras geológicas cumplen un papel fundamental al actuar como barreras naturales que confinan el agua subterránea en el acuífero, protegiéndola de posibles contaminaciones y contribuyendo a su almacenamiento y disponibilidad.

2.1.3. Estratigrafía

La estratigrafía se dedica al estudio de la disposición y la secuencia temporal de las capas de roca estratificadas, conocidas como estratos o formaciones. Su enfoque principal radica en interpretar la historia geológica de una región, utilizando la disposición y las relaciones entre los estratos para reconstruir eventos geológicos pasados, como la deposición, la erosión y la deformación.

El área comprendida dentro de este estudio se encuentra en gran parte dominada por rocas de origen volcánico, en donde la representatividad de los materiales sedimentarios ocurre en forma aislada, lo cual dificulta en cierta medida su interpretación y continuidad en el subsuelo [(26)].

El área de estudio abarcada por el ACHS está principalmente compuesta por rocas de origen volcánico, con una representación limitada de materiales sedimentarios, lo que dificulta su interpretación y continuidad en el subsuelo. La litología del acuífero incluye una variedad de formaciones geológicas, que van desde el Cretácico hasta sedimentos cuaternarios.

En el Cretácico, se encuentra la Formación Lutita-Arenisca (KiAr-Lu) Las Vigas, definida por Burrows en 1910 [(27)]. “Esta formación consiste en una alternancia de lutitas y areniscas calcáreas de color gris, verde y rojizo, con estratos de espesor medio. Se identifica en varias secciones geológicas, y se caracteriza por tener una potencia de hasta 970 m. Se cree que se depositó durante el Neocomiano (Valanginiano-Hauteriviano) en un ambiente litoral, con una transición de sistemas fluviales a sabkhas y sistemas marinos someros en la parte superior de la secuencia”. Esta estratigrafía se basa en información de Handschy (1986) y Burrows (1910) [(27)] [(28)].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

La Formación Las Vigas, definida por Burrows en 1910 [29] [30], consiste en una alternancia de areniscas calcáreas y lutitas de color gris, verde y rojizo, con estratos de espesor medio. "Esta formación se encuentra expuesta en la sierra de Chorreras, en el centro del estado de Chihuahua. Se caracteriza por una alternancia de lutitas de aproximadamente 10 cm de espesor promedio, intercaladas con estratos de calcarenitas de color gris verdoso en capas de unos 20 cm de espesor. Los espesores reportados alcanzan hasta 970 m en las localidades tipo. Aunque no se ha identificado su contacto inferior, se sabe que sobreyace concordantemente a la Formación Navarrete y descansa sobre la Formación Rara al norte de Ciudad Aldama. Su edad se ha asignado al Neocomiano (Valanginiano-Hauteriviano) debido a su posición estratigráfica y contenido faunístico". La Formación Las Vigas se interpreta como un ambiente de depósito de tipo litoral, con un cambio de un sistema fluvial en su base a una secuencia de sabkha y un sistema somero marino en su parte superior [30].

La Formación La Virgen, definida por Humphrey y Díaz en 1956 [31], consiste en una secuencia de yesos, anhidritas y calizas de edad Cretácico inferior. "Esta formación fue reportada por primera vez por Buckardt [32] en 1930 y se encuentra expuesta en la parte central de Coahuila, en la localidad del Potrero de la Virgen. En Chihuahua, fue definida por Zwanziger [33] en 1986 como parte de la paleogeografía del Cretácico inferior para ese estado y Coahuila. Aflora en varias sierras, como El Cuervo, Soldado, Chorreras, Amargosa y Ezoque, y se identifica en la porción centro y suroeste del acuífero. Está compuesta por wackstone a packstone de bioclastos en estratos medios subordinados, con evaporitas de color blanco y delgados horizontes de lutita gris. Su espesor varía según la región, siendo de aproximadamente ± 71 m en la Sierra del Cuervo, ± 424 m en las sierras El Soldado y 343 m en Chorreras". La Formación La Virgen se depositó en un ambiente marino que varió desde nerítico interno en facies de plataforma hasta zonas restringidas que permitieron el depósito de evaporitas.

La Formación Cupido, propuesta por Imlay en 1936 [34], "consiste en calizas que afloran en la Sierra de Parras, entre la Formación La Peña arriba y la Formación Taraises abajo. La localidad tipo se designó en la parte norte del Cañón El Mimbre, al sureste de Parras, Coahuila. En el área de estudio, esta formación aflora en las sierras de Magistral, El Cuervo, Azul y Chaconeña, y también en las sierras La Amargosa y de Roque. Se compone de wackstone y packstone fosilíferas de color gris, en estratos delgados a medios. El espesor varía según la región, siendo de 118 m en la Sierra del Cuervo, 306 m en la Sierra del Magistral y 85 m en La Amargosa. La Formación Cupido sobreyace a la Formación La Virgen y subyace a la Formación La Peña. Por su posición estratigráfica, se le asigna una edad Barremaniano y se correlaciona con la Formación Tamaulipas Inferior del Mar Mexicano. Su ambiente de depósito fue de plataforma de alta energía".

La Formación La Peña, nombrada por primera vez por Imlay R.W. (1936) [35], "consiste en un cuerpo dividido en dos miembros: uno inferior de calizas y otro superior de lutitas y calizas. Su localidad tipo se encuentra en el flanco norte de la Sierra de Taraises, en la hacienda La Peña, al extremo sur del

estado de Chihuahua. Aflora en varias regiones, como la sierra del Cuervo, sierra Magistral, y sierra Azul, y también en áreas fuera del acuífero, como las sierras El Soldado, Roque, La Amargosa y Chorreras. Dentro del ACHS, se presentan pequeños afloramientos en áreas como La Cruz y La Boquilla, en la Mesa Las Palomas (Caldera de Majalca), en la porción central del acuífero. La unidad aflora principalmente en la porción suroeste del acuífero y aparece identificada en varias secciones geológicas. La formación La Peña se divide en tres partes: un miembro calcáreo (Mudstone arcilloso) intermedio que separa dos miembros arcillosos (lutitas), y contiene amonitas. Su espesor varía según la región, siendo de aproximadamente 210 m en las sierras de Magistral y 130 m en la Sierra El Cuervo. El contacto inferior es abrupto, nítido y concordante con la Formación Cupido, mientras que subyace de manera clara y concordante a las calizas de la Formación Tamaulipas Superior. Por su fauna y posición estratigráfica, se estima una edad del Aptiano tardío y se correlaciona con la Formación Otates de la cuenca de Tampico-Misantla y con la Formación Uvas del área de Delicias Acatita, Coahuila". El depósito de esta formación sugiere un ambiente nerítico con escasa circulación de aguas marinas.

La Formación Benavides, definida por Amsbury (1958) [(36)], "consiste en una secuencia de lutitas calcáreas grises con intercalaciones de calizas, limolitas y areniscas de estratificación delgada. Se distribuye principalmente al noreste del estado de Chihuahua. Esta formación está compuesta principalmente por lutita calcárea de color gris claro con intercalaciones de caliza arcillosa de color gris claro a gris amarillento en estratos delgados, ocasionalmente con horizontes de arenisca calcárea de grano fino y color gris. El espesor promedio en la parte centro-este del estado es de 200 m, y aflora en varias regiones como la Sierra Cuchillo Parado y la sierra El Pegüis. Además, ha sido reportada en superficie en diversas sierras con espesores variables, y en el subsuelo a través de varios pozos exploratorios. El contacto inferior con la Formación Finlay del Grupo Aurora es concordante y bien definido, mientras que el contacto superior con la caliza masiva de la Formación Loma de Plata también es concordante y claro. Se estima una edad del Albiano medio a la parte baja del Albiano tardío basada en su posición estratigráfica y fauna asociada. Estas rocas fueron depositadas en un ambiente de plataforma poco profunda y de poca energía, con el desarrollo ocasional de bancos arrecifales".

La Formación Aurora, definida por Burrows (1910) [(27)], "comprende una secuencia de calizas que afloran en varias regiones, como la sierra de Cuchillo Parado en Chihuahua. Presente en áreas como las sierras Magistral, La Calera, Sierra Azul y Chaconeña, esta unidad forma parte de las porciones norte y noreste del acuífero. Consiste en mudstone a wackstone con nódulos de pedernal, con espesores que varían de una localidad a otra, siendo alrededor de 576 m en la Sierra Azul. Se estima que abarca desde el Albiano inferior hasta la parte media del Albiano medio y se correlaciona con otras formaciones regionales como la Tamaulipas Superior. Su ambiente de depósito se interpreta como una plataforma abierta cercana a áreas arrecifales".

La Formación Tamaulipas Superior, [(27)] se compone de mudstone a wackstone de bioclastos en estratos medios, con intercalaciones de lutita. Aflora en varias regiones del área de estudio y fuera

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

de ella, como la sierra del Cuervo y el área Papalote. Con un espesor de 1,349 m en la Sierra El Cuervo, se asigna una edad del Albiano inferior y se considera que se depositó en un ambiente de aguas profundas, con ambientes someros.

La Formación Glen Rose, nombrada por Hill (1983), "consiste en wackestone a packstone de bioclastos, con intercalaciones de mudstone arcilloso. Afectada por intrusiones ígneas en algunos afloramientos, esta formación se correlaciona con el Albiano medio y se depositó en un ambiente nerítico interno, en una plataforma somera con facies arrecifales".

La Formación Walnut, definida por Hill (1891), "se compone de lutitas y calizas con coquinas, sobreyaciendo la Formación Glen Rose y siendo sobreyacida por la Formación Edwards. Presente en la Sierra El Cuervo, se considera del Albiano medio y se interpreta su depósito en una plataforma inestable nerítica interna y media".

Por último, **la Formación Finlay,** se compone de calizas masivas con esporádicas capas delgadas de arenisca café. Presente principalmente en el sector nordeste del acuífero, se le asigna una edad del Albiano inferior-medio y se correlaciona con otras formaciones regionales como la Paila de Coahuila. Se estima que se depositó en ambientes someros con alta energía sobre una plataforma somera durante una etapa regresiva.

La secuencia estratigráfica del acuífero Chihuahua-Sacramento, que se compone de las siguientes formaciones [37] [38]:

En resumen, la estratigrafía del área de estudio del acuífero Chihuahua-Sacramento revela una predominancia de rocas de origen volcánico con una representación limitada de materiales sedimentarios, lo que dificulta su interpretación y continuidad en el subsuelo. Se identifican varias formaciones geológicas desde el Cretácico hasta sedimentos cuaternarios, con destacadas como la Formación Lutita-Arenisca Las Vigas, Formación La Virgen, Formación Cupido, Formación La Peña, Formación Benavides, Formación Aurora, Formación Tamaulipas Superior, Formación Glen Rose, Formación Walnut y Formación Finlay, cada una con características y ambientes de depósito únicos que contribuyen a comprender la evolución geológica de la región.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

2.1.4. Geología estructural

La descripción del acuífero revela una configuración irregular, con un macizo montañoso en su centro, ubicado en una zona de transición entre las provincias fisiográficas de Cuencas y Sierras y la Sierra Madre Occidental [(39) (40)]. Las estructuras geológicas presentes son el resultado de dos episodios tectónicos durante el Terciario inferior y medio. Se encuentran rocas ígneas extrusivas y sedimentarias detríticas y calizas, acompañadas de materiales coluviales y aluviales. Las deformaciones fueron causadas por los efectos compresivos de la Orogenia Laramídica y la Orogenia del Terciario Medio, generando pliegues anticlinales y fallas relacionadas principalmente con esfuerzos tensionantes.

Las principales direcciones de las estructuras varían en las porciones norte y sur del acuífero (Figura 2), con ejes de estructuras anticlinales tendiendo hacia el NO-SE. Las calderas presentes en el área se manifiestan en la forma circular de las fallas y fracturas cartografiadas. Las estructuras no afectadas por las calderas muestran direcciones principales de NNO-SSE y N-S en ambas porciones del acuífero. Los pliegues anticlinales son asimétricos y de poca amplitud, enmascarados por la cubierta de rocas volcánicas. Estos alineamientos estructurales tienen una relevancia significativa en la prospección de agua, ya que influyen tanto en la capacidad hidráulica de almacenamiento de los estratos como en la conductividad hidráulica secundaria [(41) (42)].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

2.1.5. Geología del subsuelo

El acuífero Chihuahua-Sacramento, situado en el centro del estado de Chihuahua, exhibe una geología estructural que influye en su composición y distribución [41] [40]. Está compuesto principalmente por materiales de relleno, como gravas, arenas, arcillas y rocas ígneas extrusivas, así como sedimentarias detríticas y calizas. La región se ubica en el límite de las provincias fisiográficas Sierras y Llanos del Norte y Sierra Madre Occidental. La geología del subsuelo refleja una serie de eventos geodinámicos a lo largo del tiempo, incluyendo la Orogenia Laramide durante el Terciario inferior y la orogenia del Terciario medio, que moldearon el paisaje regional. Además, la actividad volcánica en la Sierra Madre Occidental dejó una serie de rocas volcánicas que cubren parte del acuífero. La sedimentación posterior incluye depósitos continentales y aluviales, así como sedimentos no consolidados durante el Pleistoceno y Holoceno.

El acuífero Chihuahua-Sacramento se encuentra en sedimentos clásticos de relleno de fosa tectónica ("Fosa Chihuahua"), que se desarrolla con un rumbo NNO-SSE y representa la continuidad hacia el sur de la fosa tectónica del Sauz-Encinillas (Figura 2). Está limitado por el bloque tectónico Mogote-La Haciendita al oeste y el bloque Sacramento al este. Se estima que el espesor del relleno aluvial en la zona de Sacramento-Ejido Ocampo, que constituye el límite norte del acuífero, es de alrededor de 300 m. Este espesor disminuye hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, principalmente hacia el oeste y al sur de la cuenca, hacia el río Chuvíscar.

En términos de permeabilidad, se observan grandes espesores de sedimentos de grano grueso como arena y gravas, así como conglomerados parcialmente consolidados con permeabilidad media a alta. Se espera encontrar zonas con una mayor concentración de sedimentos finos como limos y arcillas en este tipo de ambiente sedimentario. A mayor profundidad, las rocas calizas cretácicas del basamento regional presentan buena permeabilidad, mientras que las ignimbritas de composición riolítica compactas y la secuencia volcánica predominantemente andesítica muestran baja permeabilidad en el subsuelo, pero pueden constituir zonas de recarga en superficie cuando presentan fracturamiento [14].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

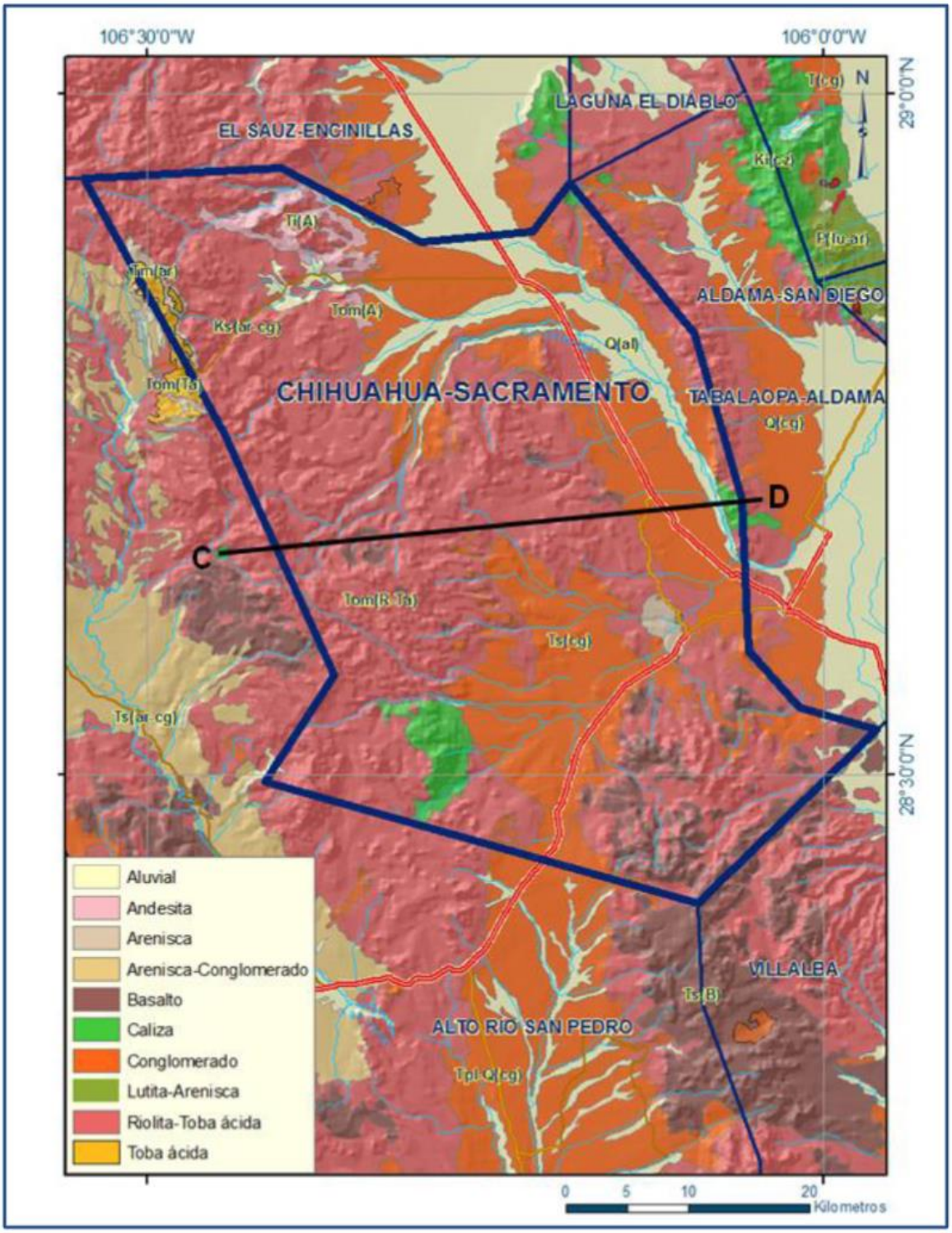


Figura 2. Geología general del acuífero Chihuahua-Sacramento. Fuente: CONAGUA (2023) [14].

La sección marcada en planta se interpretó en la Figura 3, donde indica la zona urbana como la principal porción de explotación o denominado acuífero del valle.

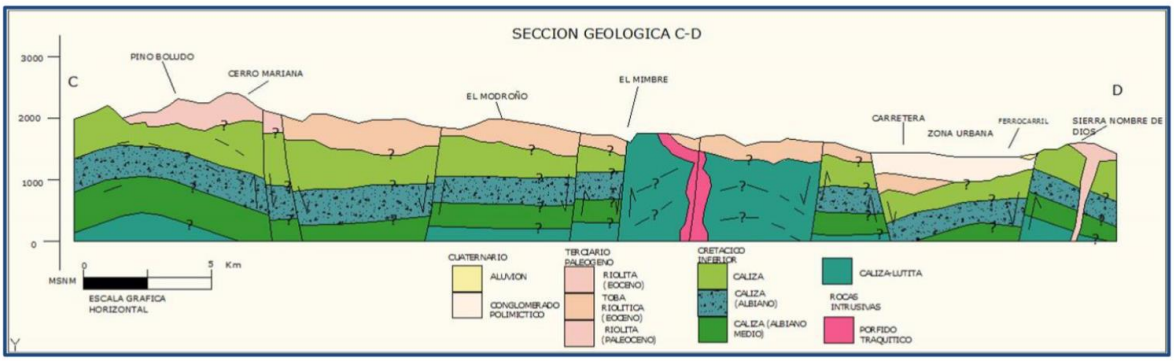


Figura 3. Sección transversal geológica del ACHS. Fuente: CONAGUA (2023) [14].

2.1.6. Geofísica

En México, el uso de la geofísica para la prospección de perforaciones de pozos de agua tuvo un inicio relevante en la década de 1960, cuando se iniciaron investigaciones y proyectos piloto para aplicar técnicas geofísicas en la exploración de recursos hídricos en diversas regiones del país. En el estado de Chihuahua, específicamente, el uso de la geofísica para la prospección de pozos de agua se intensificó principalmente a partir de la década de 1980 [43] [44] [45]. Esto se debió al desarrollo de nuevas tecnologías y a la creciente necesidad de buscar fuentes de agua subterránea en regiones áridas y semiáridas como Chihuahua.

Los primeros estudios geofísicos en el ACHS se realizaron en la década de 1950 por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Estos estudios utilizaron métodos geofísicos como la resistividad eléctrica y la sísmica de refracción para determinar la profundidad del basamento rocoso y la estratigrafía del acuífero. Las profundidades de penetración variaron entre 100 y 500 m.

En la década de 1960, se llevaron a cabo estudios más detallados por parte de la CONAGUA y el Instituto Mexicano de Geología (IMGE). Estos estudios incluyeron la perforación de pozos exploratorios y la realización de estudios geoeléctricos y gravimétricos. Las profundidades de penetración de los pozos exploratorios alcanzaron hasta 1000 m.

Durante la década de 1970, se intensificaron los estudios geofísicos en el acuífero debido a la creciente preocupación por la sobreexplotación de este. Se realizaron estudios geoeléctricos, magnéticos y gravimétricos para determinar la extensión del acuífero, la profundidad del basamento

rocoso y la calidad del agua. Las profundidades de penetración de los métodos geofísicos variaron entre 500 y 1000 m.

En la década de 1980, se publicaron dos estudios importantes sobre el acuífero: "Estudio Geofísico del Valle de Chihuahua" (CONAGUA, 1980) [(43)] y "Estudio de Prospección Geofísica de los Valles El Sauz y Tabalaopa" (CONAGUA, 1980) [(44)]. Estos estudios integraron la información geofísica y geológica disponible para caracterizar el acuífero.

Desde la década de 1990 hasta la actualidad, se han realizado diversos estudios para comprender mejor el funcionamiento del acuífero y desarrollar estrategias para su manejo sostenible. Estos estudios incluyen la modelación numérica del flujo del agua subterránea, la evaluación de la recarga del acuífero y la identificación de zonas de riesgo de contaminación.

La Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) [(45)] ha sido una de las instituciones líderes en estudios geofísicos, gracias a su maestría en este campo. Los estudios realizados sobre la interpretación de las unidades geoeléctricas en el ACHS han revelado descubrimientos significativos. Estos estudios se basan en la recopilación de información geofísica previa, incluidas secciones geoeléctricas reinterpretadas y perfiles redibujados, así como datos de campo.

La ubicación de estas unidades se ha centrado principalmente en las partes norte y sur del acuífero, influenciada por la presencia de sierras en el oeste y la Caldera de Majalca en el centro. Los perfiles geoeléctricos, obtenidos mayormente con el arreglo de Schlumberger, han proporcionado una visión detallada de la distribución y características de las unidades geoeléctricas.

Los hallazgos sugieren la existencia de cinco unidades geoeléctricas características, con diferentes resistividades aparentes y posibles permeabilidades, que van desde material fino arcilloso hasta rocas cristalinas inalteradas. Estos resultados tienen importantes implicaciones para la explotación de agua en la región, ya que proporcionan información sobre la distribución y la naturaleza de los materiales acuíferos.

Estos estudios se han complementado con datos geológicos y cortes litológicos de pozos, proporcionados por las Juntas de Agua y Saneamiento, lo que ha permitido una interpretación más detallada de las unidades geológicas y su relación con la explotación de agua en el acuífero.

Sin embargo, la aplicación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV´s) en este acuífero está disminuyendo debido a limitaciones en zonas urbanizadas y con desniveles topográficos importantes en las márgenes de la mancha urbana, lo cual ha llevado a un mayor uso de los Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM´s). Es importante mencionar que esta geofísica se ha realizado de forma puntual para el emplazamiento de aprovechamientos específicos, y no se ha sistematizado la información para generar un conocimiento más amplio.

2.2. Factores Externos que Impactan el ACHS

El acuífero Chihuahua-Sacramento es influenciado por una serie de factores externos que inciden en su hidrología y disponibilidad hídrica. Entre los más relevantes se encuentran:

Cambio climático: Variaciones en los patrones de precipitación y temperatura afectan la recarga y evaporación del acuífero, alterando su nivel y disponibilidad de agua.

Actividades humanas: La extracción excesiva de agua para uso agrícola, industrial y doméstico puede reducir el nivel del acuífero y provocar su sobreexplotación.

Contaminación: La contaminación del agua subterránea por actividades industriales, agrícolas y urbanas puede afectar la calidad del agua en el acuífero, haciéndola inadecuada para su uso.

Deforestación: La deforestación y cambios en el uso del suelo pueden impactar la infiltración del agua en el suelo, disminuyendo la recarga del acuífero.

Urbanización: El crecimiento urbano puede incrementar la impermeabilización del suelo, reduciendo la recarga natural del acuífero y aumentando el escurrimiento superficial.

Infraestructura hidráulica: La construcción de presas, canales y otros proyectos de infraestructura hidráulica puede alterar el flujo natural del agua subterránea, afectando la recarga y descarga del acuífero.

Estos factores externos interactúan de manera compleja y tienen un impacto significativo en la disponibilidad y calidad del agua en el acuífero Chihuahua-Sacramento.

2.2.1 Cambio climático

En el informe **1.Integración del análisis del medio natural**, se abordó de forma general la condición de los principales parámetros que son indicadores del clima y de lo que se ha denominado variabilidad o cambio climático, además de esto en el informe **5. Integración del análisis de riesgos y resiliencia hídrica**, se realizó el análisis de causas y consecuencias del cambio climático en el Municipio de Chihuahua.

En la superficie del ACHS, predomina un clima mayormente seco, clasificado principalmente como semiárido-templado en las áreas del sur, centro y noroeste, mientras que en la franja noreste se cataloga como árido-templado. En una pequeña porción al noroeste, se observa un clima semiseco-templado. Estos climas se caracterizan por presentar lluvias principalmente en verano, con un porcentaje de precipitación invernal que oscila entre el 5 y el 10.2%.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

De acuerdo con el área del acuífero Chihuahua-Sacramento, en el estudio de Evaluación de fuentes por la JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH, en el 2015 (26); se identifican tipos diferentes de climas según la clasificación de Köppen modificada por García [46], que van desde climas secos semicálidos hasta semifríos subhúmedos. Cada uno de estos climas presenta características específicas en términos de temperatura, precipitación y régimen pluviométrico, lo que influye en la disponibilidad y gestión del agua en el acuífero

2.2.2 Precipitación

Dado que el alcance de este informe se centra en el análisis del agua subterránea, se utilizarán los resultados y conclusiones de informes anteriores, así como los análisis presentados en este estudio. El informe del 2015 de estudio de evaluación de las fuentes actuales y de fuentes alternas, analizó en específico datos de estaciones que proporcionen información relevante sobre este acuífero.

En el estudio realizado en 2015, se utilizaron estaciones climatológicas para estimar la precipitación media anual del acuífero Chihuahua-Sacramento [26] (Tabla 1).

Tabla 1. Estaciones climatológicas utilizadas para el estudio 2015-JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH, precipitación mensual [26].

No.	ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1	SAN ANTONIO, CHIHUAHUA	7.9	5.4	6.1	6.5	13.0	43.7	93.7	67.1	62.8	19.1	7.7	7.1	340.3
2	CHIHUAHUA (EL LÉON)	9.7	5.8	5.1	8.7	17.2	36.5	95.4	96.5	73.9	25.7	7.9	9.9	392.4
3	PRESA EL REJÓN	8.3	4.8	5.3	8.7	16.0	37.9	97.8	92.7	70.6	25.8	6.5	8.9	383.3
4	PRESA CHIHUAHUA	8.2	5.4	4.4	6.6	16.5	39.3	98.0	102.9	76.4	24.5	7.3	8.7	398.1
5	LA MESA, ALDAMA	7.2	4.2	4.9	6.9	17.8	28.2	64.0	54.5	51.2	18.8	6.8	8.2	272.8
6	LOS POZOS	8.0	5.0	4.9	7.8	16.6	37.7	74.9	41.0	53.6	20.1	9.0	7.0	285.6
7	MAJALCA	15.4	9.5	8.1	10.9	16.9	61.1	158.1	146.3	111.9	30.3	9.6	10.2	588.2

Este estudio concluyó que las precipitaciones más altas en el acuífero Chihuahua-Sacramento se registran entre mayo y octubre, mientras que las más bajas se observan de noviembre a abril. La precipitación media anual se calculó utilizando el método de los polígonos de Thiessen, y se obtuvo una altura promedio de precipitación anual de 441.2 mm (Tabla 2).

Tabla 2. Estimación de precipitación medial anual en el acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS), obtenida en el estudio 2015-JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH [26].

No.	ESTACION	ELEVACIÓN (msnm)	ALTURA DE PRECIPITACION (mm)	AREA (km^2)	VOLUMEN PRECIPITACIÓN (hm^3)	PRECIPITACIÓN MEDIA (mm)
1	SAN ANTONIO, CHIHUAHUA	1557.00	340.29	4.15	1.41	0.75
2	CHIHUAHUA (EL LÉON)	1433.36	392.35	248.81	97.62	51.68
3	PRESA EL REJÓN	1479.61	383.27	197.13	75.55	39.99
4	PRESA CHIHUAHUA	1533.55	398.15	700.38	278.86	147.61
5	LA MESA, ALDAMA	1311.00	272.79	2.87	0.78	0.41
6	LOS POZOS	1574.62	285.56	176.97	50.54	26.75
7	MAJALCA	2120	588.20	558.78	328.68	173.99
			SUMA	1889.1		441.2

La Figura 4 muestra las estaciones climatológicas y su estado de vigencia actual. Se observa que, de todas las estaciones, solo la estación Majalca está activa en la actualidad (Tabla 3).

Tabla 3. Características de la estación climatológica Majalca. Fuente: elaboración propia con información de JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH (2015).

NOMBRE	Latitud N	Longitud W	Altitud (m)	Instalación en sitio
CUMBRES DE MAJALCA	28°48'11.9"	106°29'09.6"	2088.841	06 dic 2012

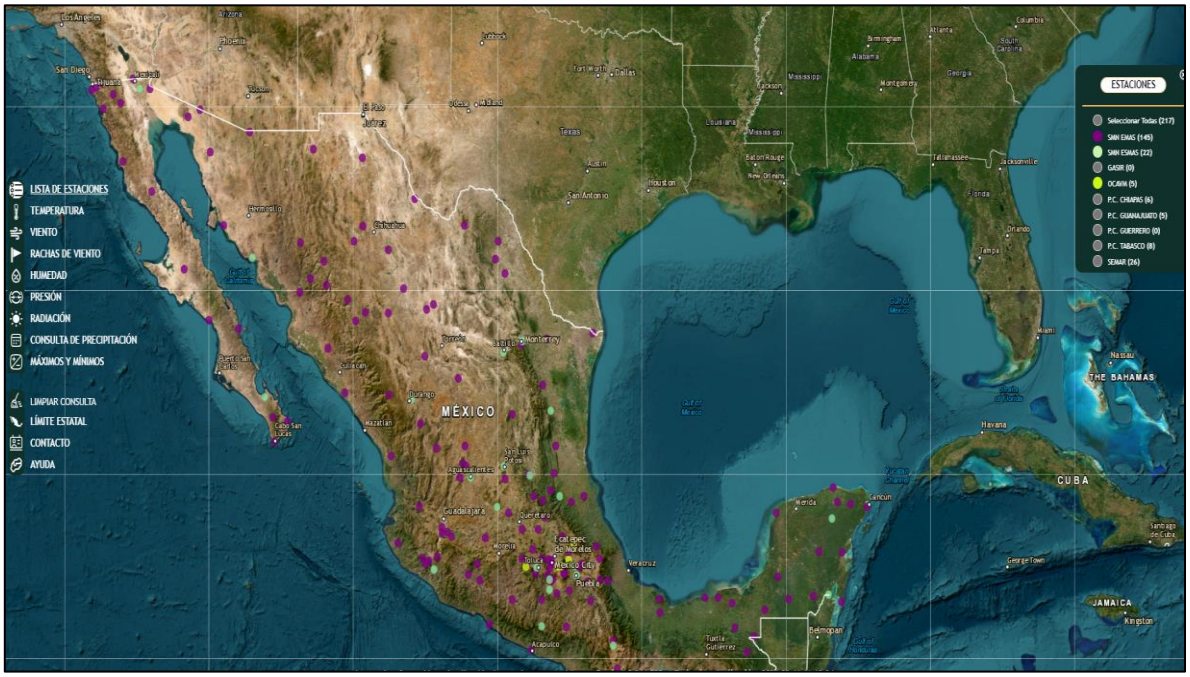


Figura 4. Imagen de la clasificación de las estaciones climatológicas de CONAGUA. Sección CONAGUA (2024) [47].

Este sistema de consulta tiene limitantes como lo son el periodo de consulta establecido. Algo que, desde la década del 2000, se impulso es la ubicación de un radar, a incluir en el estado de Chihuahua, por la importancia de las cuencas Conchos y Bravo, y que la cobertura de Red de Radares Meteorológicos de la CONAGUA no cubre. La información oficial estadística de las estaciones que se utilizaron para el estudio del 2015, la mayoría han dejado de operar. Es por ello por lo que de acuerdo con el **Informe 9. Análisis de aguas superficiales** se decidió seleccionar la información de la red de estaciones climatológicas convencionales de CONAGUA y realizar un manejo de datos en una hoja de cálculo para actualizar la precipitación acumulada anual de registro para lo zona del ACHS (Tabla 4).

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Tabla 4. Precipitación acumulada de cada año (mm). Fuente: elaboración propia.

Promedio	395.98	304.23	411.12	361.66	411.57
Año	Chihuahua	La Mesa	Majalca	El Rejón	P. Chihuahua
1960	309.84	-	218.10	-	-
1961	297.94	151.10	272.40	-	21.50
1962	381.99	178.00	326.80	-	380.50
1963	485.29	210.10	343.10	-	553.50
1964	278.54	243.20	119.30	-	297.50
1965	250.04	196.90	188.00	-	381.00
1966	486.89	168.00	219.50	-	523.00
1967	453.06	235.90	428.30	-	414.00
1968	426.81	277.20	677.80	-	676.50
1969	357.93	475.50	392.60	324.50	292.00
1970	277.20	230.40	440.60	252.20	315.50
1971	315.35	296.10	636.00	308.00	431.50
1972	525.76	351.90	911.60	533.20	510.00
1973	411.35	488.60	383.00	385.10	475.50
1974	451.80	305.50	212.00	479.00	573.00
1975	317.02	293.30	154.00	259.80	294.00
1976	480.17	211.70	178.00	578.50	602.00
1977	344.14	407.40	300.30	339.00	356.50
1978	506.40	235.10	294.00	636.00	623.50
1979	361.26	448.70	327.20	351.50	473.00
1980	471.45	295.10	424.00	441.00	447.00
1981	660.08	414.90	222.00	614.50	565.00
1982	214.47	552.20	306.60	276.00	245.50
1983	361.84	353.60	394.30	166.50	309.50
1984	444.17	408.40	510.50	404.10	492.30
1985	469.47	556.70	423.20	353.00	434.00
1986	668.90	425.50	574.70	727.90	752.60
1987	639.20	467.00	431.70	76.80	569.10
1988	292.30	209.10	390.40	-	356.80
1989	251.45	530.30	310.60	-	328.50
1990	510.47	272.90	536.50	-	905.40
1991	499.24	464.30	414.50	-	686.00
1992	500.24	195.30	340.20	299.50	412.90
1993	266.51	166.60	356.80	-	235.00
1994	170.30	221.20	222.20	154.81	183.10
1995	352.24	149.40	296.40	338.83	273.90
1996	517.95	269.00	390.50	526.19	421.00
1997	493.73	229.80	317.70	433.47	274.90
1998	344.09	203.10	268.10	274.88	199.40
1999	397.41	143.60	338.10	409.57	268.40
2000	504.11	216.80	383.50	452.29	144.50
2001	269.21	216.80	276.90	78.99	326.20
2002	495.20	215.00	518.00	316.70	392.70
2003	354.82	331.20	427.60	315.93	593.70
2004	640.15	281.50	615.10	665.62	708.20
2005	431.90	299.80	723.50	455.18	386.90
2006	330.87	277.00	499.50	334.81	257.00
2007	298.00	254.20	501.00	278.70	499.60
2008	488.90	404.50	341.50	484.98	338.60
2009	316.23	341.00	308.40	304.25	419.50
2010	488.12	186.10	418.90	410.36	184.80
2011	180.38	359.60	311.30	118.12	183.92
2012	344.78	146.00	417.80	342.91	-
2013	563.70	280.00	673.50	542.08	-
2014	399.16	501.20	894.50	144.21	-
2015	372.33	296.50	824.00	337.62	-
2016	563.39	290.30	754.00	534.07	-
2017	362.75	491.60	718.00	366.65	-
2018	293.11	314.40	695.50	285.81	-
2019	395.17	270.10	225.51	392.55	-
2020	162.83	434.97	587.00	162.53	-
2021	410.56	284.12	294.15	412.16	-
2022	401.31	236.96	0.00	370.98	-

Dado el tiempo de ejecución de este estudio de análisis, se analizó también las estaciones que tengan disponibilidad de datos en la red como las que opera la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS), del periodo 2019 a 2023.

En la Tabla 5 se puede observar la variación mensual de la precipitación para las estaciones mencionadas en la Tabla 4 de 1960 al 2018.

Tabla 5. Variación mensual de precipitación en mm. Elaborada por el IMPLAN con datos proporcionados por CONAGUA (2019).

Variable	Mes												Total anual / promedio
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Precipitacion (mm)	8.6	5.2	5.2	8.0	16.2	37.6	102.5	100.1	79.0	25.7	9.5	9.7	407.5

En la Figura 5 se puede observar la variación mensual de la precipitación para las estaciones JCAS, potabilizadora y Prot. Civil del año 2019 y 2020.

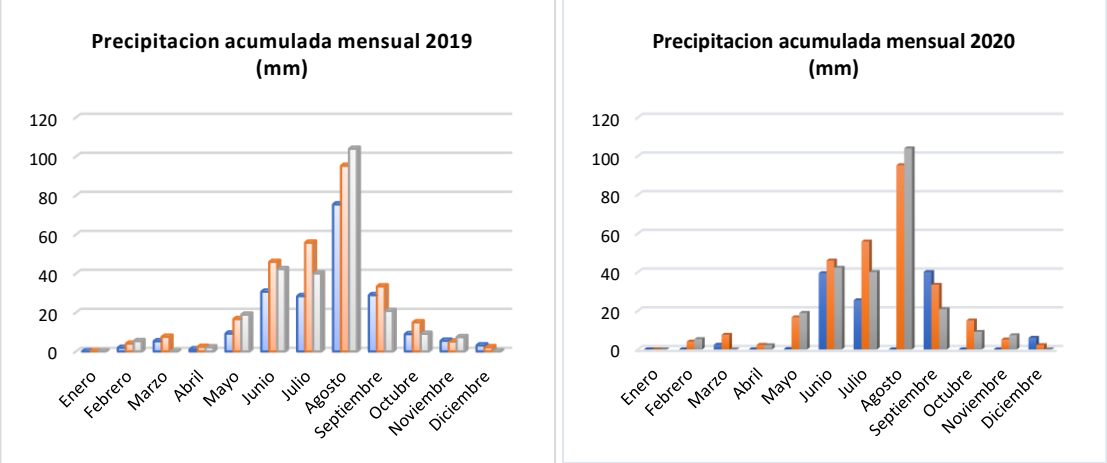


Figura 5. Distribución de la precipitación mensual acumulada para las estaciones JCAS, Potabilizadora, Prot. Civil 2019 y 2020. Fuente: Elaboración propia con información de la Red de la JCAS.

En 2019, los meses más lluviosos fueron de junio a septiembre, destacando agosto, que representó el 38% del total de lluvia acumulada en el año. En 2020, se repitió este patrón, siendo agosto el mes

más lluvioso, con un 42% del total. Sin embargo, la estación de la JCAS no registró datos, lo que sugiere un posible problema en su funcionamiento.

En los años 2021 y 2022, se mantuvo el patrón de lluvias entre junio y septiembre. Sin embargo, se observa un valor atípico en el mes de agosto, con una representatividad del acumulado anual superior al 53% (Figura 6).

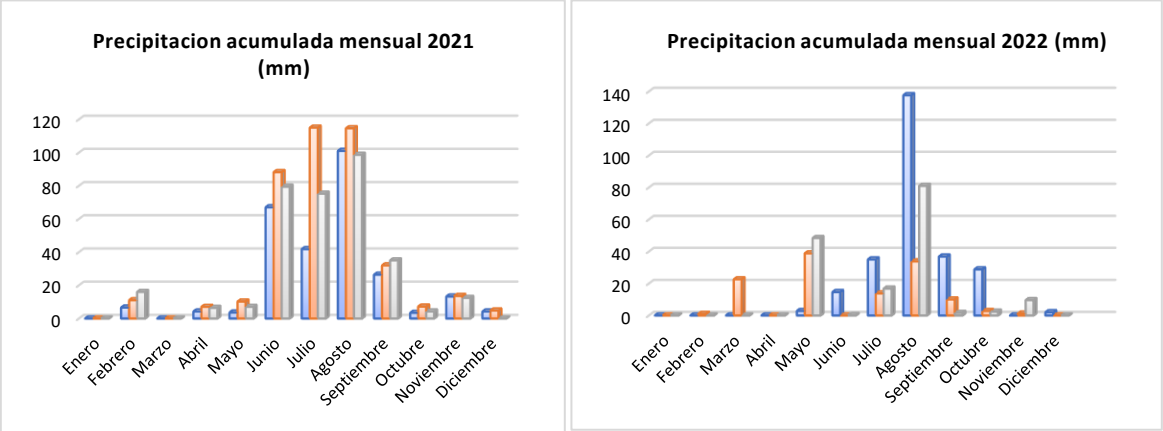


Figura 6. Distribución de la precipitación mensual acumulada para las estaciones JCAS, Potabilizadora, Prot. Civil 2021 y 2022. Fuente: Elaboración propia con información de la Red de la JCAS.

En 2023, se registraron precipitaciones significativas únicamente en el mes de agosto. Sin embargo, los valores acumulados de ese mes fueron un 50% inferiores en comparación con años anteriores. La Figura 7 representa las precipitaciones acumuladas de estas estaciones para el periodo de 2019 a 2023.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

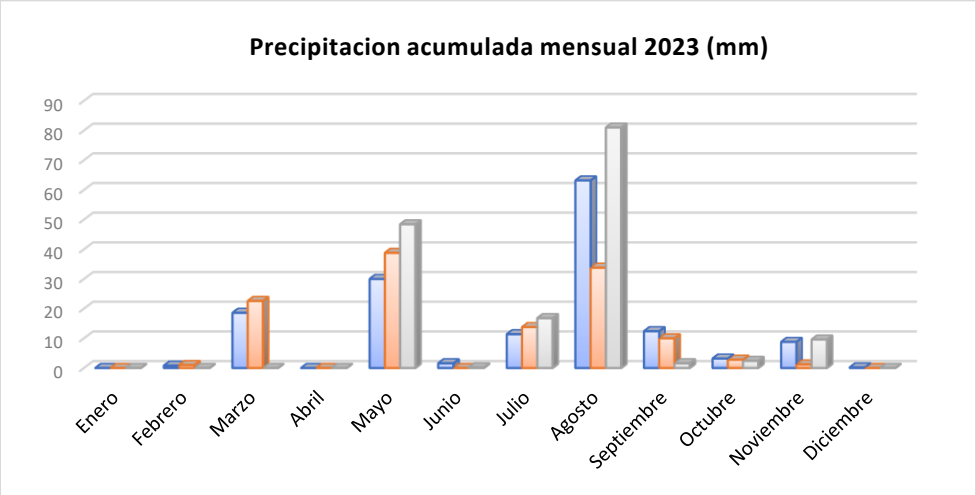


Figura 7. Distribución de la precipitación mensual acumulada para las estaciones JCAS, Potabilizadora, Prot. Civil 2021 y 2022. Fuente: Elaboración propia con información de la Red de la JCAS.

Al realizar el análisis del periodo de las tres estaciones, obtenemos un valor acumulado promedio anual de 230 mm (Figura 8). Esto representa una disminución de 200 mm en comparación con el promedio histórico referenciado a la Tabla 4. Es importante considerar el tipo de tormenta que se presenta en este periodo, ya que no solo la cantidad de precipitación influye en la recarga hacia el acuífero, sino también el tipo de tormenta puede favorecer o no la infiltración, y por ende, la posibilidad de recarga en el acuífero.

Por ejemplo, en la estación JCAS, los días con mayor acumulación de precipitación fueron el 3 y 25 de agosto, con 11.8 mm y 26.8 mm respectivamente. El día 3, la lluvia se registró de 7:30 a 10 de la mañana, con una tasa máxima de lluvia en 15 minutos de 3 mm. En cambio, el día 25, la lluvia comenzó a las 4 a.m. y terminó a las 3 p.m. , con una mayor tasa de precipitación en 15 minutos de 8 mm.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

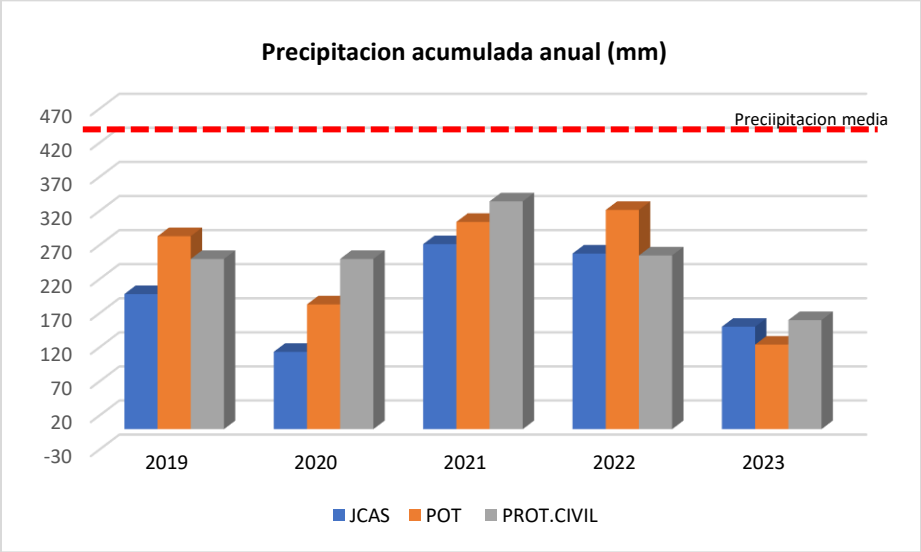


Figura 8. Precipitación anual acumulada para las estaciones JCAS, Potabilizadora, Prot. Civil 2019 al 2023. Fuente: Elaboración propia con información de la Red de la JCAS.

La tasa de precipitación que favorece la infiltración en 15 minutos en zonas áridas depende de varios factores, como:

1. Tipo de suelo:

- Suelos arenosos: Permiten una infiltración rápida, incluso con tasas de precipitación bajas (de 2 a 5 mm en 15 minutos).
- Suelos arcillosos: Tienen una infiltración más lenta, requiriendo tasas de precipitación más altas (de 5 a 10 mm en 15 minutos) para evitar la escorrentía.

2. Pendiente del terreno:

- Terrenos planos: Favorecen la infiltración al permitir que el agua se disperse y tenga más tiempo para penetrar en el suelo.
- Terrenos con pendiente: Favorecen la escorrentía al concentrar el agua y reducir el tiempo de infiltración.

3. Cobertura vegetal:

- Vegetación densa: Reduce la velocidad del agua y aumenta la infiltración al permitir que el agua se filtre a través de la hojarasca y las raíces.
- Suelo desnudo: Aumenta la escorrentía al reducir la capacidad del suelo para absorber el agua.

4. Antecedentes de humedad del suelo:

- Suelo seco: Favorece la infiltración al tener mayor capacidad de absorción.
- Suelo saturado: Reduce la infiltración al tener menor capacidad de absorción.

5. Intensidad de la lluvia:

- Precipitación ligera: Favorece la infiltración al permitir que el agua penetre en el suelo de manera gradual.
- Precipitación intensa: Puede superar la capacidad de infiltración del suelo, lo que genera escorrentía.

En general, se considera que una tasa de precipitación de 5 a 10 mm en 15 min es favorable para la infiltración en zonas áridas, siempre y cuando se consideren los demás factores mencionados [48] [49]. Sin embargo, la totalidad de los volúmenes acumulados de lluvia no garantiza la recarga del acuífero. Por lo tanto, los balances de disponibilidad hídrica pueden no reflejar la realidad, ya que tienden a sobreestimar el volumen de recarga al incluir el diferimiento en el periodo de tiempo. Es necesario estimar el tiempo que tarda en llegar desde la superficie el agua precipitada hasta la profundidad del nivel estático para una evaluación precisa.

2.2.3 Temperatura

Se realizó un análisis de la temperatura en función del **Informe 5. Análisis de riesgo y resiliencia hídrica** utilizando información histórica proporcionada por el IMPLAN. Este análisis se basó en los datos recopilados por el IMPLAN para la ciudad de Chihuahua entre 1980 y 2019. Los registros se extrajeron de la base de datos desarrollada por la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) para el Estudio de Evaluación de las Fuentes Actuales de Abastecimiento a la Ciudad de Chihuahua. Este estudio abarcó una evaluación de la viabilidad de fuentes alternas y un anteproyecto de la infraestructura hidráulica requerida. Para abordar la ausencia de datos, el IMPLAN aplicó la metodología de correlación lineal en el análisis de datos faltantes.

Las estaciones meteorológicas clave en este análisis se basaron principalmente en la información recopilada por la estación Observatorio de CONAGUA, identificada con el número 08040. Los datos de esta estación se correlacionaron con los de la estación Presa Rejón (08114) y la estación Presa Chihuahua (08185).

La temperatura promedio anual, según los datos recopilados de la estación climatológica Observatorio durante el periodo de 1960 a 2023, se establece en 18.5°C. Asimismo, se destaca una temperatura máxima promedio de 38.9°C y una temperatura mínima promedio de -5.4°C para el mismo intervalo temporal, como se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6. Promedio multianual de los datos de temperatura. Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el IMPLAN del periodo 1960-2019, actualizado con datos de CONAGUA (2023).

Año	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura media (°C)
1960	38.2	-8.1	16.7
1961	36.1	-6.2	17.4
1962	37.8	-14.5	17.8
1963	36.8	-8.7	17.9
1964	36.8	-10.0	17.5
1965	36.8	-9.5	17.3
1966	36.2	-10.8	17.0
1967	37.2	-9.2	17.6
1968	37.2	-7.8	17.2
1969	39.0	-7.8	18.0
1970	38.9	-6.7	17.8
1971	35.1	-8.9	17.9
1972	36.1	-7.2	18.0
1973	37.7	-8.2	16.9
1974	36.4	-7.7	17.7
1975	36.8	-7.8	17.1
1976	35.7	-6.5	16.3
1977	35.8	-6.3	17.7
1978	38.3	-10.3	17.2
1979	38.8	-6.2	17.1
1980	38.8	-4.8	17.8
1981	38.9	-2.8	17.6
1982	39.0	-4.4	18.5
1983	37.6	-7.6	17.7
1984	36.3	-5.3	17.7
1985	39.0	-8.0	17.9
1986	35.7	-6.3	17.1
1987	38.0	-8.3	16.3
1988	38.2	-7.5	17.2
1989	40.3	-7.7	18.3
1990	38.3	-6.6	16.9

Año	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura media (°C)
1991	38.8	-5.7	17.2
1992	39.8	-5.5	16.5
1993	36.6	-6.3	17.4
1994	40.1	-6.2	18.3
1995	37.3	-3.7	18.1
1996	38.0	-8.4	18.1
1997	37.4	-10.7	17.4
1998	40.3	-6.5	18.7
1999	37.9	-6.0	18.8
2000	37.9	-6.2	18.8
2001	38.2	-6.2	18.8
2002	39.8	-5.8	19.0
2003	40.8	-4.2	19.4
2004	39.7	-5.1	18.4
2005	40.2	-2.7	19.4
2006	38.7	-6.5	19.4
2007	38.9	-7.6	18.4
2008	38.7	-5.9	18.6
2009	38.3	-5.2	18.6
2010	40.0	-10.3	18.0
2011	39.7	-19.3	19.3
2012	38.9	-4.3	19.3
2013	37.7	-7.1	19.3
2014	37.8	0.3	18.2
2015	39.7	4.2	19.1
2016	38.3	1.0	19.1
2017	40.3	0.4	19.6
2018	39.3	2.3	19.4
2019	37.9	3.6	19.4
2020	40.0	-5.5	20.7
2021	41.0	-5.2	20.3
2022	41.0	-7.4	19.7
2023	42.0	-5.6	21.1

Este parámetro fue revisado y comparado, al igual que el de precipitación, en los resultados y conclusiones de estudios anteriores. En el estudio de 2015, las estaciones climatológicas utilizadas para la estimación de la precipitación media anual del acuífero Chihuahua-Sacramento fueron las que se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7. Estaciones climatológicas utilizadas para el estudio 2015-JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH, temperatura promedio mensual [26].

No.	ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1	SAN ANTONIO, CHIHUAHUA	6.4	8.3	11.7	15.0	18.3	21.5	21.8	20.9	19.2	14.7	10.3	7.3	14.6
2	CHIHUAHUA (EL LÉON)	9.4	11.9	15.4	19.4	23.3	26.4	25.6	24.4	22.5	18.6	13.5	10.4	18.4
3	PRESA EL REJÓN	9.0	11.3	14.1	18.0	22.0	25.4	24.5	23.1	21.3	17.6	12.7	9.5	17.4
4	PRESA CHIHUAHUA	8.7	11.1	14.2	18.3	22.3	25.5	24.5	23.5	21.7	18.1	13.3	9.8	17.6
5	LA MESA, ALDAMA	8.2	10.3	12.8	16.0	19.1	21.8	21.0	19.5	18.7	15.5	10.8	7.7	15.1
6	LOS POZOS	8.4	10.9	14.5	20.7	23.5	26.4	27.1	26.1	23.8	17.8	13.2	9.3	18.5
7	MAJALCA	5.1	6.3	9.0	12.3	15.4	18.8	18.5	17.9	16.0	12.0	8.5	5.4	12.1

En las siguientes tablas se resume el comportamiento de las temperaturas medias en los últimos 5 años. En la Tabla 8, que se refiere al promedio, se observa que, durante más de 8 meses, la temperatura media estuvo por encima de los 16.1°C con base en los registros históricos. Solo el año 2020 se encuentra fuera de este patrón, con menos de 8 meses por encima de la temperatura media histórica estimada.

Tabla 8. Estimación de las temperaturas medias de las estaciones operadas por JCAS. Fuente elaboración propia con datos de la JCAS.

Temperatura media °C					
Año	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
Enero	11	11	10	28	13
Febrero	15	21	15	30	13
Marzo	18	19	18	33	18
Abril	23	23	22	36	22
Mayo	26	27	26	40	24
Junio	29	29	29	40	30
Julio	28	29	26	39	31
Agosto	27	30	25	37	28
Septiembre	25	24	25	34	28
Octubre	21	22	22	32	22
Noviembre	16	18	17	32	16
Diciembre	13	10	16	29	12

En cuanto a las medias máximas mensuales podemos observar que son 5 meses al año que presentan temperaturas máximas medias por encima de los 36°C, esto es relevante ya que coincide cuando el organismo operador estadísticamente presenta mayor demanda por parte de los usuarios. Se destaca de la Tabla 9 que, en el 2022, la temporada de calor se adelantó un mes y que en el 2023 se prolongó un mes más, siendo esto resentido por las olas de calor que se tuvieron en el 2023 y que impactaron en el suministro de energía eléctrica y en el agua potable.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Tabla 9. Estimación de las temperaturas máximas medias de las estaciones operadas por JCAS. Fuente elaboración propia con datos de la JCAS.

Temperatura media máxima °C					
Año	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
Enero	29	29	28	28	30
Febrero	30	28	32	30	32
Marzo	34	35	33	33	33
Abril	35	35	35	36	34
Mayo	38	38	38	40	36
Junio	41	41	42	40	41
Julio	39	41	36	39	40
Agosto	39	40	37	37	41
Septiembre	37	37	37	34	39
Octubre	35	35	36	32	36
Noviembre	32	32	32	32	32
Diciembre	24	21	24	29	24

Efectos de los fenómenos de La Niña y El Niño en el municipio de Chihuahua:

Los fenómenos climáticos de La Niña y El Niño ejercen una influencia significativa en el clima del municipio de Chihuahua, en el norte de México. Estos fenómenos, parte del ciclo climático conocido como El Niño-Southern Oscillation (ENSO), pueden tener impactos profundos en las condiciones meteorológicas locales y regionales.

La Niña:

La Niña se caracteriza por una disminución de las lluvias en el norte de México, lo que incluye al municipio de Chihuahua. Esta reducción de las precipitaciones puede llevar a sequías, afectando la agricultura, la ganadería y el suministro de agua potable. Además, La Niña puede ocasionar un descenso de las temperaturas durante el invierno, aumentando la demanda de energía para calefacción. También se relaciona con un incremento en la frecuencia e intensidad de las heladas, lo que puede dañar los cultivos y la vegetación en general.

El Niño:

Por otro lado, El Niño está asociado con un aumento de las lluvias en el norte de México, incluyendo Chihuahua. Esto puede provocar inundaciones, deslizamientos de tierra y otros daños a la infraestructura. Además, El Niño puede ocasionar un aumento de las temperaturas durante el verano, lo que puede generar olas de calor y aumentar la demanda de energía para aire

acondicionado. A su vez, este fenómeno puede disminuir la frecuencia e intensidad de las heladas, beneficiando a los cultivos y la vegetación.

Es importante destacar que los efectos de La Niña y El Niño pueden variar de un año a otro en el municipio de Chihuahua, dependiendo de la intensidad de estos fenómenos. Por ello, es crucial monitorear y analizar estos eventos climáticos, para comprender y prever sus impactos en la región. La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) utiliza estos períodos para estudiar y supervisar los fenómenos climáticos globales, como parte de sus esfuerzos por comprender y predecir el clima mundial.

Los períodos cálidos (representados en rojo) y fríos (en azul) de la Tabla 10 se identifican en función de un umbral de +/- 0,5°C para el Índice del Niño Oceánico (ONI), utilizando períodos base centrados de 30 años actualizados cada 5 años. El ONI es un indicador de la fase cálida (El Niño) o fría (La Niña) del fenómeno climático conocido como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Otros índices pueden corroborar si las características consistentes con un fenómeno acoplado océano-atmósfera acompañaron a estos períodos.

Tabla 10. Periodos cálidos y fríos, Índice del Niño Oceánico (ONI). Fuente: NOAA (2024) [50].

AÑO	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2
2021	-1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1	-1
2022	-1	-0.9	-1	-1.1	-1	-0.9	-0.8	-0.9	-1	-1	-0.9	-0.8
2023	-0.7	-0.4	-0.1	0.2	0.5	0.8	1.1	1.3	1.6	1.8	1.9	2

Las siglas corresponden a los meses del año y representan los siguientes períodos estacionales:

DJF: Diciembre, enero, febrero

JFM: Enero, febrero, marzo

FMA: Febrero, marzo, abril

MAM: Marzo, abril, mayo

AMJ: Abril, mayo, junio

MJJ: Mayo, junio, julio

JJA: Junio, julio, agosto

JAS: Julio, agosto, septiembre

ASO: Agosto, septiembre, octubre

SON: Septiembre, octubre, noviembre

OND: Octubre, noviembre, diciembre

NDJ: Noviembre, diciembre, enero

La temporada comprendida entre mayo y septiembre (MJJ, JJA y JAS) es crucial para el municipio de Chihuahua, ya que coincide con el período de lluvias y mayor demanda de agua debido al calor. En este contexto, se analiza la vinculación de estos meses con los datos de las estaciones meteorológicas locales.

Año 2019: Durante los meses de mayo, junio y julio (MJJ) del 2019, se registró un período cálido, con una magnitud mayor en el 2023, alcanzando un índice cálido de 0.8, es decir, casi un 60% más que en 2019. En cuanto a la acumulación de lluvia, en 2019 se tuvo un 45% menos que la precipitación acumulada anual histórica hasta 2015, mientras que en 2023 esta disminución fue del 68%. En ambos casos, la temperatura media mensual para este período fue de 39°C. El año 2019 presentó períodos cálidos durante los primeros 7 meses, siendo los últimos meses casi normales o neutrales en cuanto al comportamiento de los fenómenos de El Niño y La Niña.

Años 2020, 2021 y 2022 - La Niña: Durante estos años se produjo un evento de La Niña débil, asociado con una disminución de las lluvias en el municipio de Chihuahua. Curiosamente, los períodos fríos fueron más pronunciados en julio del 2021 y continuaron en los años siguientes.

Año 2023 - Año Atípico: Según datos de la Oficina de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA), el 2023 fue el año más cálido registrado hasta entonces. Se registró una anomalía en la temperatura superficial terrestre y marina global de +1,18°C, lo que indica que la temperatura media del planeta fue 1,18 grados más alta que la temperatura media del siglo XX. Es importante destacar que los diez años más cálidos desde 1850 todos han ocurrido en los últimos diez años, lo que evidencia los impactos directos del cambio climático en nuestro planeta.

2.2.4 Hidrografía

Este apartado será abordado con mayor detalle en el **Informe 9. Análisis de Aguas Superficiales**. El acuífero Chihuahua-Sacramento (Figura 9) se encuentra en la región hidrológica 24, conocida como "Río Bravo-Conchos", dentro de las cuencas del Río Conchos – Presa El Granero y Río San Pedro [(14)].

El río Chuvíscar, nacido en la serranía La Mesa Montosa, es la corriente principal del acuífero, con una dirección hacia el noreste que atraviesa la Sierra Azul y una serie de rancherías. Debido a su alta pendiente, escasa infiltración y vegetación boscosa, este río experimenta importantes crecidas, las cuales son controladas por la presa Chihuahua. Continuando su trayectoria hacia el noreste, el río Chuvíscar atraviesa la ciudad de Chihuahua, donde se une al río Sacramento y luego fluye hacia Aldama, donde cambia su dirección hacia el sureste y desemboca finalmente en el río Conchos.

Sus afluentes principales son el río El Rejón y el río Sacramento. El río Sacramento, originado en la sierra alta al noreste de Chihuahua, fluye hacia el noreste hasta la presa San Marcos, donde gran parte de su caudal es retenido. Aguas abajo, continúa hacia la localidad de Sacramento y luego hacia Chihuahua, donde recibe aportes de aguas residuales antes de desembocar en el río Chuvíscar. Sus principales afluentes son arroyos intermitentes. Por otro lado, el río El Rejón, de régimen intermitente, tiene su origen en la Mesa Montosa y fluye hacia el este, atravesando una zona accidentada y cubierta de vegetación. Controlado por la presa El Rejón, las crecidas de este río son importantes y drenan un área de hasta 178 km² hasta la estación hidrométrica El Rejón.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

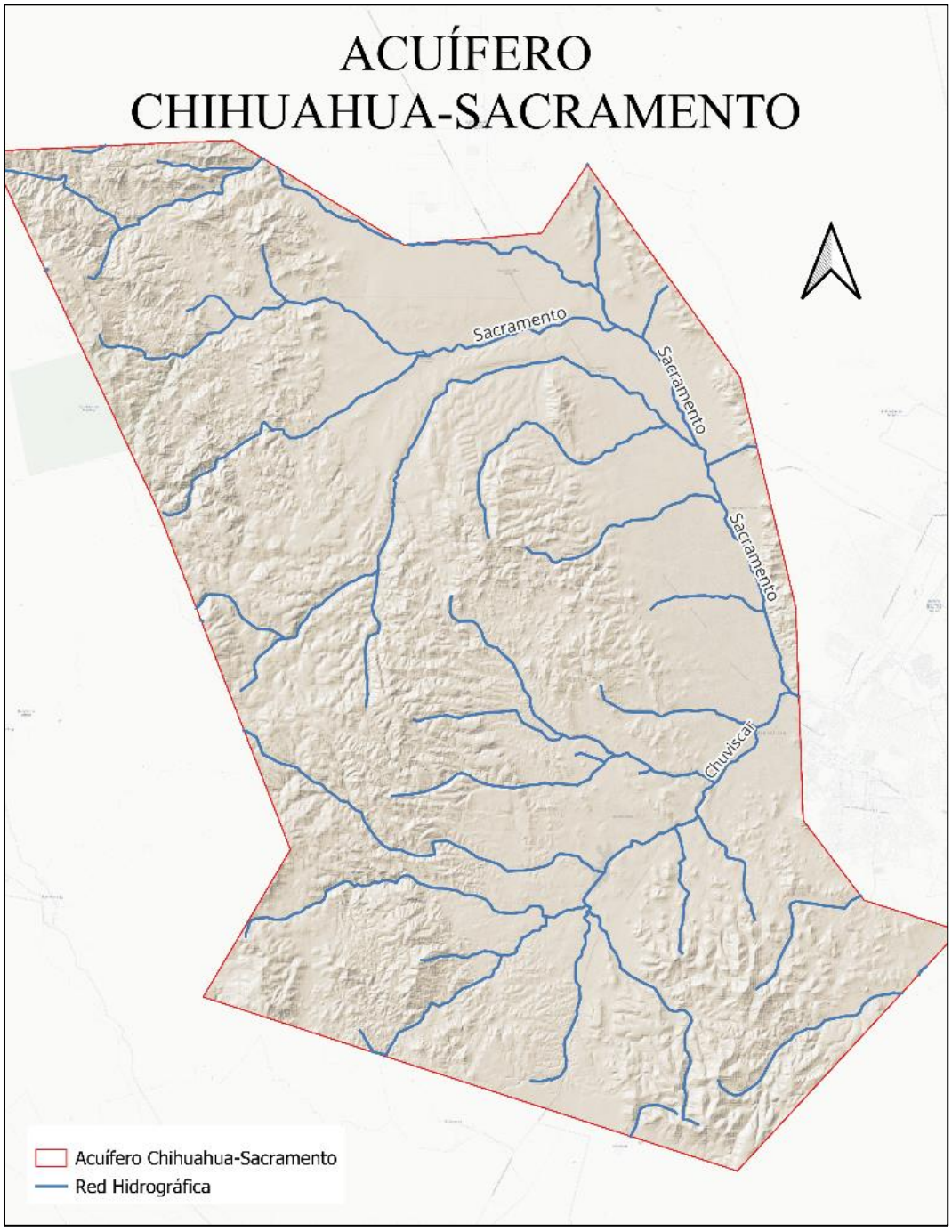


Figura 9. Hidrografía dentro del Acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS). Fuente: Elaboración propia.

2.2.5 Vegetación

El acuífero Chihuahua-Sacramento alberga una variedad de vegetación que refleja la diversidad de climas y condiciones del suelo en la región. Los principales tipos de vegetación presentes:

1) Bosques: Se encuentran principalmente entre altitudes de 300 y 4200 msnm.

- Los bosques de pino, encino, pino-encino y encino-pino son comunes.
- El bosque de pino, dominado por el género Pinus, es especialmente importante para la industria maderera y la biodiversidad.
- Los bosques de encino coexisten con diversas especies de pino y se ubican entre 1200 y 2800 msnm.
- Los bosques de pino-encino y encino-pino son fases de transición entre los dos tipos principales de bosques.

Ocupan aproximadamente el 7.19% de la cobertura total del área.

2) Bosques secundarios: Presentan signos de alteración debido a actividades humanas como la tala. Pueden ser de pino, encino, pino-encino o encino-pino.

Representan el 26.26% de la superficie total y se encuentran principalmente en la franja noroeste a oeste del área de estudio.

3) Matorrales:

- Vegetación arbustiva predominante en climas áridos y semiáridos. Incluye matorral submontano, desértico rosetófilo y desértico micrófilo.

Ocupan el 29.72% del área de cobertura total, con mayor presencia hacia el este del acuífero.

4) Matorrales secundarios: Conformados por arbustos o árboles bajos y son más susceptibles a la alteración humana. Incluyen matorral submontano, desértico rosetófilo y desértico micrófilo.

Representan el 4.70% de la superficie y se encuentran principalmente al noreste de la porción central del área de estudio.

5) Pastizales naturales: Dominados por gramíneas y otras hierbas. Prevalecen en zonas semiáridas y de clima fresco, entre los matorrales y los bosques. Incluyen especies como Bouteloua gracilis, Bouteloua curtipendula y Bouteloua hirsuckii.

Cubren el 18.94% del área total, con mayor abundancia en el extremo noroeste y en una semifranja que atraviesa la sección central norte hasta el extremo sur.

Estas descripciones se basan en datos obtenidos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [51] para la distribución de la vegetación en diferentes años dentro del acuífero Chihuahua-Sacramento.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

2.2.6 Edafología

En el **Informe 1. Análisis del Medio Natural** se describen las características físicas del municipio de Chihuahua. Dentro del ACHS se identifican seis unidades principales de suelos y tres subunidades. Las unidades de suelos comprenden el Castañozem, Feozem, Fluvisol, Litosol, Regosol y Xerosol, mientras que las subunidades son el Calcárico, Lúvico y Háplico [(14)].

La distribución y características de estos suelos son diversas:

Castañozem: Presente en una pequeña porción al sureste del acuífero, son suelos alcalinos propios de zonas áridas o semiáridas. Son adecuados para la agricultura debido a su alta fertilidad natural y baja tendencia a la erosión.

Feozem: Distribuido en varias partes del acuífero, es uno de los suelos más comunes. Se caracteriza por su capa superficial rica en materia orgánica y nutrientes. Se utiliza principalmente para la agricultura de riego y temporal, así como para el pastoreo.

Fluvisol: Presente en la porción norte y noroeste del acuífero, en los cauces de los ríos. Son suelos arrastrados por el agua, con capas alternadas de arena y gravas. Algunas subunidades son importantes en la agricultura debido a su disponibilidad de nutrientes.

Litosol: Se encuentra principalmente en la porción poniente del acuífero. Son suelos poco profundos limitados por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su uso depende de la vegetación que los recubra y su susceptibilidad a la erosión.

Regosol: Estos suelos poco desarrollados se encuentran en diversas condiciones climáticas, vegetativas y de relieve. Son poco profundos y su productividad está condicionada a su pedregosidad y profundidad.

Xerosol: Característico de zonas áridas y semiáridas, se encuentra presente en la franja central del acuífero, cerca de los márgenes de algunos ríos. Su rendimiento agrícola depende de la disponibilidad de agua y presenta baja susceptibilidad a la erosión.

Las subunidades de suelos agregan información adicional sobre la composición y características específicas de ciertos tipos de suelos dentro del acuífero [(52)].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

2.3. Hidrogeología

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten clasificar al acuífero Chihuahua-Sacramento como un acuífero tipo libre a semiconfinado, heterogéneo y anisótropo que se desarrolla en forma conjunta tanto en el medio granular como en el fracturado, conformando una sola unidad hidrogeológica. Su espesor varía de 350 a 750 m en sus extremos sureste y noroeste, respectivamente [(14)]. Localmente, se presentan condiciones de confinamiento que provocan artesianismo.

El medio poroso se depositó en el valle que representa la fosa tectónica y tiene un espesor que varía de 150 m en su porción sur a 460 m en su extremo norte. Por otro lado, el medio fracturado está representado por rocas volcánicas de composición félsica que presentan espesores que varían de 250 a 550 m en las zonas de recarga; mientras que en el valle se estima que las rocas que forman parte del acuífero tienen un espesor de 200 a 350 m [(14)].

A mayor profundidad, las rocas calizas presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y constituyen otra unidad que no ha sido aún explorada, pero se tiene evidencia de ellas en los trabajos mineros, principalmente en acuíferos vecinos. Las formaciones calcáreas Benigno y Chihuahua llegan a tener mayores espesores que las rocas volcánicas, sin embargo, su limitada extensión disminuye su potencial acuífero. Según el estudio elaborado en el 2015 [(26)] se podría clasificar el sistema del ACHS como se observa en la Tabla 11.

Tabla 11. Resumen de unidades hidrogeológicas en el acuífero Chihuahua Sacramento. Fuente: Estudio de evaluación de fuentes, JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH,2015 [(26)].

Chihuahua-Sacramento				
UNIDAD HIDROESTRATIGRÁFICA	**MEDIO POROSO**	**FORMACIONES GEOLÓGICAS**	**GRADO DE PERMEABILIDAD**	***RANGO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/d)**
UH 1	Fracturado	KiCz y KaCz	Media a alta	$1x10^{-2}$
UH 2	Fracturado	KsA-R, Ks-A, KiCz-Lu, TpaA, ToA, TeR y TeA	Media a baja	$1x10^{-4}$ a $1x10^{-7}$
UH 3	Fracturado	ToTR-lg, ToR y TeTR	Baja	$1x10^{-7}$
UH 4	Fracturado	TpaBsP, ToB y TeB	Media	10 a $1x10^{-3}$
UH 5	Granular	Qal, QCgp, Qhoal y Qholm-Ar	Media a elevada	2.78 a 302.4
*Valores de referencia tomados de MODFLOW y Anderson (1992).				

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

2.3.1 Parámetros hidráulicos del sistema

El estudio de las pruebas de bombeo y aforo en el Acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS) revela una variabilidad significativa en los parámetros hidráulicos, como la transmisividad y la conductividad hidráulica. A pesar de la falta de pozos de observación, se recopiló la estimación del rendimiento específico realizada por diferentes estudios, especialmente el de 2015 [(26)] mediante modelos numéricos, lo que proporciona información valiosa para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

Los métodos tradicionales y aproximados han sido utilizados para calcular los parámetros del pozo, junto con enfoques más avanzados como el método del flujo radial de dos capas, en estudios previos, y ofrecen herramientas poderosas para comprender mejor la dinámica del acuífero y guiar decisiones de gestión informadas.

En cuanto a los parámetros hidráulicos encontrados en los distintos estudios, se observa que los valores de transmisividad en el ACHS oscilan ampliamente, desde 5 hasta 1200 m²/día, con una media de 433 m²/día. La conductividad hidráulica varía entre 0.04 y 8.8 m/día. Aunque ninguna prueba contó con un pozo de observación, se estima que el rendimiento específico (Sy) fluctúa entre 0.10 y 0.16, con un promedio de 0.13. Este valor se obtuvo mediante la interpretación de pruebas de bombeo utilizando un modelo numérico de dos capas, y se correlaciona con acuíferos vecinos de características geológicas similares.

2.3.2 Censo de aprovechamientos

En el acuífero Chihuahua-Sacramento se han llevado a cabo tres censos de aprovechamientos. El primero fue realizado en 1986 por Ariel Consultores, S.A. para la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) [(15)], el segundo en 2009 por la Universidad Autónoma de Chihuahua, también para CONAGUA, y una actualización del censo de 2009 en 2011, también realizada por la UACH por encargo de la JCAS. Hasta la fecha, no se ha publicado un censo oficial más reciente, por lo que se utilizará la información disponible en las plataformas de CONAGUA.

Según el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) [(53)] hasta el 31 de diciembre de 2023, se tienen registrados 356 aprovechamientos de agua subterránea en el acuífero Chihuahua-Sacramento, con un volumen autorizado de 151,918,276.8 m^3 anuales. De estos, 50 corresponden a aprovechamientos identificados como folios 8 (Tabla 12); estos son los aprovechamientos que no cuentan con una asignación o título de concesión, ya que se encuentran en lo que anteriormente se denominaba "zona de libre alumbramiento".

Tabla 12. Resumen de aprovechamientos con folio 8 registrados en el ACHS. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA [(53)].

FOLIOS 8		
Uso	**No. Aprovechamientos**	**Volumen (m^3/año)**
AGRICOLA	32	2,209,534
INDUSTRIAL	6	2,006,137
PUBLICO URBANO	2	116,000
DOMESTICO	2	4,720
SERVICIOS	1	4,000
OTROS	7	282,968.8
Total	**50**	**4,623,359.8**

En cuanto al volumen autorizado para la extracción de agua del acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS) destinado al uso público urbano, específicamente otorgado al organismo operador, este representa el 85% del total del volumen de agua subterránea, como se indica en la Figura 10. El uso agrícola e industrial tiene porcentajes similares (7 y 6% respectivamente). Este dato es relevante, ya que la gestión de este acuífero y la política pública del organismo operador son determinantes para garantizar su sostenibilidad.

En la publicación de disponibilidad de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 2015, la extracción del organismo operador representaba el 78% del total, con un volumen autorizado de 101,738,018 m^3 por año. Se observa un incremento del 50% en la extracción, lo que podría deberse a una actualización en el REPDA.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

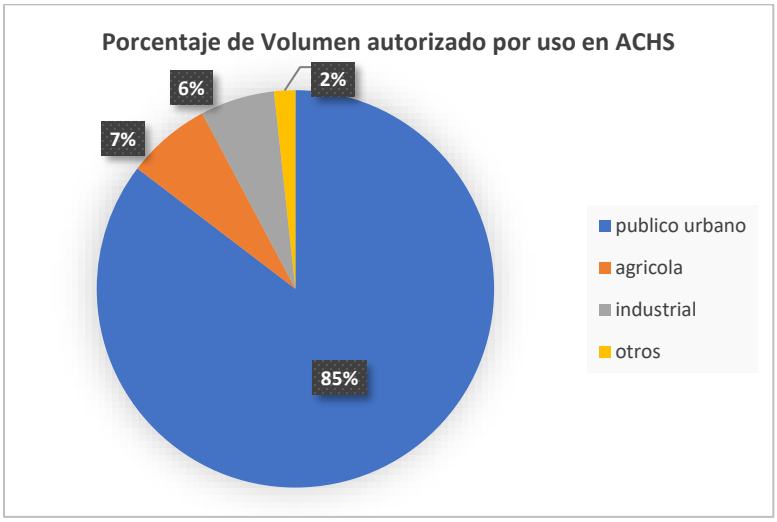


Figura 10. Volúmenes autorizados por uso de forma anual en el ACHS. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA [53].

Dado que no se dispone de un censo actualizado, y considerando que el uso más importante del agua subterránea es el público urbano, se estima que el 48% del agua subterránea extraída y suministrada a la ciudad proviene del Acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS). Sin embargo, este porcentaje solo representa el 49% del volumen autorizado que el organismo operador tiene para utilizar del ACHS.

Otro uso significativo, debido a su ubicación en la zona de influencia de la mancha urbana, es el industrial, con un volumen autorizado de extracción en el ACHS de 9,184,670 m^3. Sería importante integrar o estructurar la información de los aprovechamientos de este uso para proporcionar certidumbre a la actividad económica industrial, que es uno de los principales contribuyentes al Producto Interno Bruto (PIB) del municipio a través de las maquiladoras.

2.3.3 Rasgos indicadores de sistemas de flujo

En el acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS), los rasgos indicadores de sistemas de flujo pueden ser identificados a través de diversos métodos y observaciones de campo. Estos indicadores son clave para comprender la dinámica del agua subterránea y pueden incluir:

Topografía: La topografía del área puede revelar áreas donde el agua subterránea puede fluir hacia abajo (zonas de recarga) o hacia arriba (zonas de descarga). Por ejemplo, las áreas de mayor elevación pueden indicar potenciales áreas de recarga, mientras que las áreas más bajas pueden indicar zonas de descarga.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Piezometría: La medición de la presión del agua subterránea en diferentes profundidades a lo largo de un área puede ayudar a identificar patrones de flujo. Las diferencias en los niveles piezométricos pueden indicar áreas de recarga y descarga.

Hidro geoquímica: El análisis de la calidad química del agua subterránea puede revelar la dirección del flujo y las áreas de recarga y descarga. Por ejemplo, la presencia de ciertos minerales o contaminantes puede indicar la influencia de fuentes de agua superficiales o actividades humanas.

Características del suelo: Las propiedades del suelo, como la permeabilidad y la textura, pueden influir en la velocidad y la dirección del flujo de agua subterránea. La observación de estas características puede proporcionar información sobre cómo el agua se mueve a través del subsuelo.

Topografía

En el contexto del ACHS, la topografía desempeña un papel crucial en el movimiento y la distribución del agua subterránea. Las características topográficas pueden influir en la recarga, el flujo y la descarga del agua subterránea dentro del acuífero. Las áreas de mayor elevación tienden a actuar como zonas de recarga, donde el agua de lluvia se infiltra en el suelo y recarga el acuífero. Por otro lado, las áreas de menor elevación suelen ser zonas de descarga, donde el agua subterránea emerge a la superficie en forma de manantiales o alimenta arroyos y ríos.

La topografía también puede influir en la dirección del flujo subterráneo, con el agua moviéndose desde áreas elevadas hacia áreas más bajas. Además, las características topográficas, como los cauces de los ríos y la geometría del terreno, pueden crear barreras o facilitar el movimiento del agua subterránea, afectando así la distribución espacial de los recursos hídricos subterráneos [(54)] [(55)].

En la zona de estudio (Figura 11), las elevaciones más altas se encuentran en el límite occidental de la cuenca hidrológica del valle, alcanzando altitudes de aproximadamente 2200 metros sobre el nivel del mar (msnm). Por otro lado, las elevaciones más bajas se localizan en el norte del valle, con altitudes cercanas a los 1600 msnm, y hacia el sureste, donde los valores descienden hasta los 1500 msnm.

La topografía de la región indica que las partes más elevadas, como los cerros y sierras del suroeste (Sierra Azul, Sierra El Tambor, C. La Mariana, C. La Tinaja, C. La Escondida, C. El Carrizalillo), son áreas de recarga del acuífero. En contraste, las zonas más bajas, influenciadas por los cauces de ríos y arroyos como el río Sacramento y el río Chuvíscar, representan áreas de descarga del acuífero.

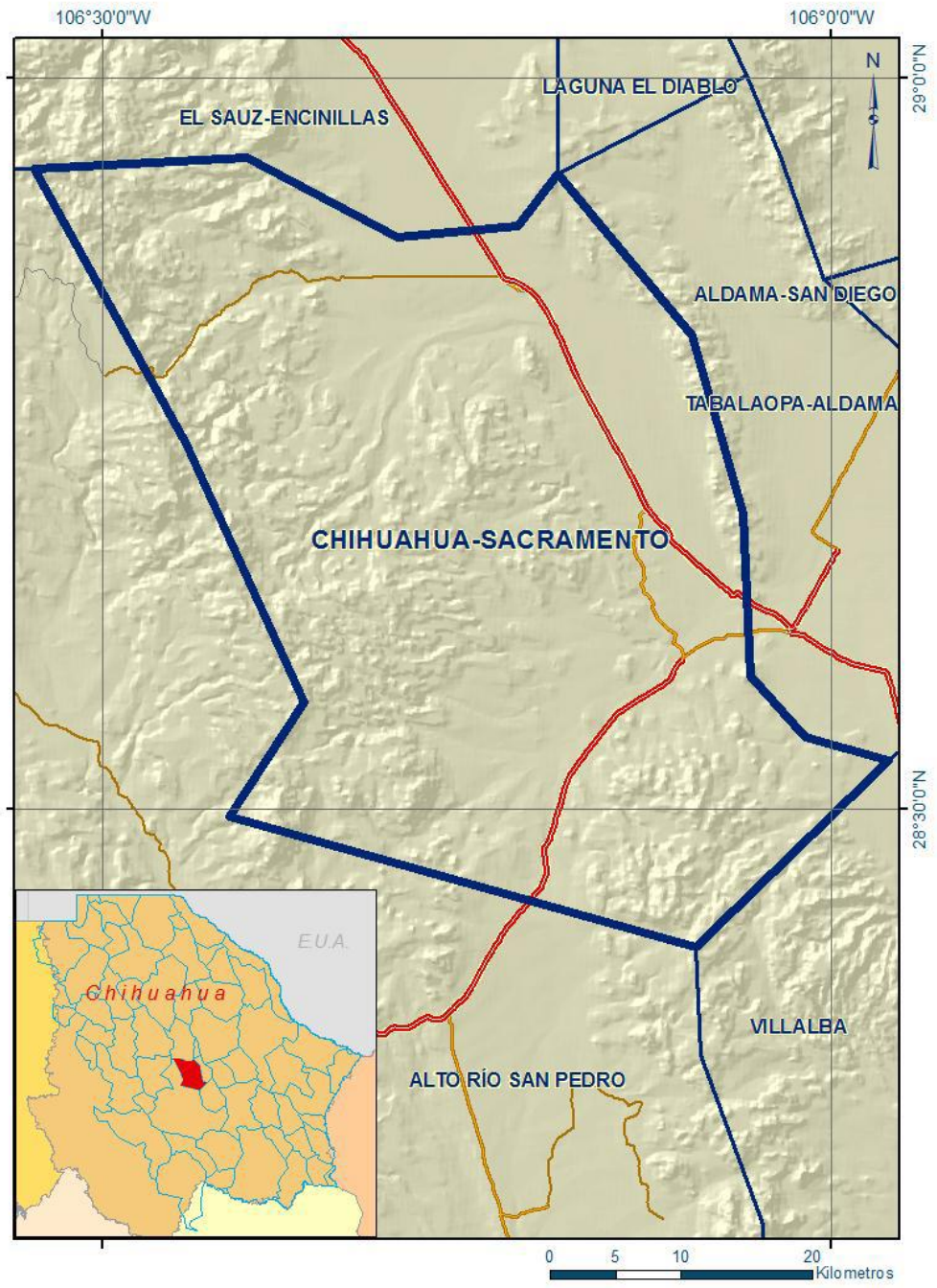


Figura 11. Topografía del acuífero Chihuahua-Sacramento. Fuente: CONAGUA (2023) (14).

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Piezometría

La definición de áreas de recarga y descarga, y por ende las trayectorias de flujo de agua subterránea, puede lograrse mediante diversos indicadores, entre ellos las trayectorias piezométricas. Estas trayectorias definen las direcciones del flujo subterráneo ascendente en áreas de descarga y descendente en áreas de recarga. La construcción de una red de piezómetros para obtener esta información puede resultar costosa desde el punto de vista económico. La CONAGUA, tiene una red de pozos para realizar mapas de piezometría, en el ACHS se cuenta con 12 pozos como se muestra en la Figura 12.

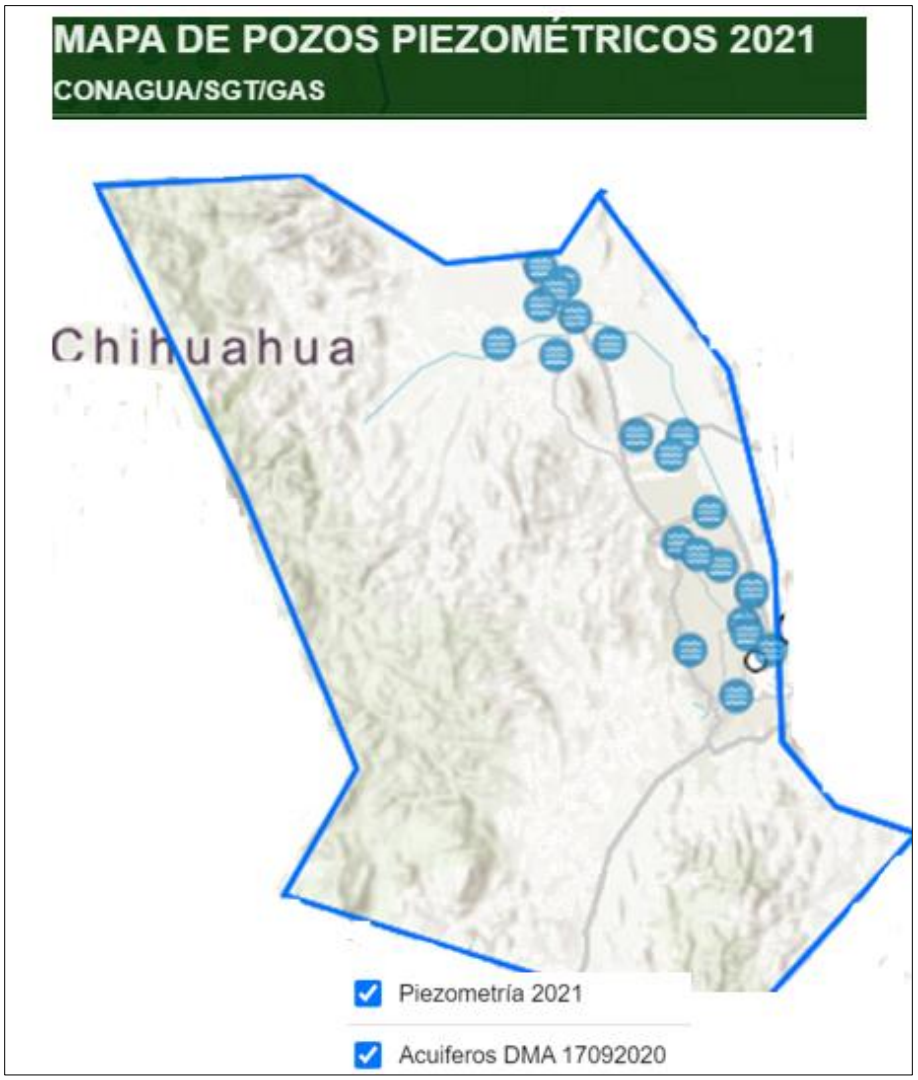


Figura 12. Pozos que son parte de la red piezométrica del ACHS. Fuente: CONAGUA (2021) [56].

También se tomó en cuenta la información del estudio realizado en 2021 sobre el monitoreo piezométrico de los tres acuíferos que abastecen al municipio de Chihuahua. De los 49 pozos utilizados, el 76% son operados por el organismo operador. Para el análisis del 2023, se consideraron 89 pozos para la realización de las equipotenciales de profundidad y de elevación del nivel estático. En la Tabla 13 se presentan las características geográficas, como las coordenadas y la profundidad de perforación de los pozos considerados en este análisis.

Tabla 13. Características de los aprovechamientos utilizados para el análisis piezométrico en el ACHS. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS

X COORD UTM	Y COORD UTM	PROFUNDIDAD (m)
388647.6287	3178386.644	300
388836.7282	3178925.646	300
394550.6013	3170472.745	500
387661.6958	3178220.670	500
387197.6798	3178578.516	500
382506.9738	3178825.616	500
386671.9657	3178587.625	500
386743.745	3161669.547	350
394807.517	3170210.958	700
393890.3871	3165005.866	300
395959.9548	3164162.709	300
390846.543	3171568.692	500
374278.2583	3159405.327	350
389045.843	3167421.775	500
388948.6806	3168491.365	500
390773.5311	3167912.749	500
393030.5216	3171628.802	350
389409.7832	3171382.766	500
388072.6356	3162208.036	245
394638.5819	3170564.904	300
390171.6996	3167356.969	400
389652.7299	3167356.933	400
386210.5029	3180644.270	500
385009.8595	3180559.735	500
390087.5548	3171515.795	500
389644.7419	3164754.897	300
389178.6305	3179302.521	450

X COORD UTM	*Y COORD UTM*	*PROFUNDIDAD (m)*
392845.5871	3168633.809	450
385787.2974	3180199.020	450
394587.6116	3175977.619	300
374145.2267	3159747.194	350
374081.3176	3159818.985	350
394637.4109	3168479.004	350
389106.7317	3169316.002	350
388607.7444	3168896.912	350
390648.6500	3170178.685	350
389391.7601	3169337.000	500
390101.5803	3169400.784	500
386637.7348	3162170.129	300
392299.1088	3162660.254	400
387499.7375	3175947.566	400
388029.7079	3175493.685	400
388083.8505	3175931.783	500
389954.6725	3170637.976	350
392321.5532	3167723.862	350
392472.7135	3174990.757	500
386039.9042	3184574.486	500
386665.1726	3190174.18	500
386707.4526	3190922.36	500
386052.4195	3190347.022	500
384464.5391	3190660.092	500
385000.8864	3190220.433	500
386362.6736	3190697.649	500
385839.6226	3190728.955	450
385619.8034	3184018.405	500
385136.4547	3183048.96	500
386123.8942	3183626.537	500
385339.0172	3184886.424	500
385195.9406	3185472.368	500
385160.8736	3186970.518	500
385137.7658	3187922.497	500
385665.1632	3189940.832	350
390186.1752	3180965.563	350
389015.2167	3180543.601	350

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

X COORD UTM	*Y COORD UTM*	*PROFUNDIDAD (m)*
388039.1678	3180173.126	450
387170.1153	3179876.796	450
387306.0159	3180855.53	450
388480.4539	3180844.208	450
388457.1697	3181499.131	450
389000.2959	3181424.369	300
393019.8003	3175164.552	300
392747.1545	3175941.476	300
392427.8774	3176894.899	300
391773.0191	3179160.213	300
393232.5452	3169140.896	500
389428.7770	3181158.961	350
376304.2009	3156894.220	350
395755.0395	3168598.558	350
393382.4380	3174400.665	350
388918.6138	3174396.793	350
388547.8634	3173941.708	350
389865.6062	3180512.740	350
392391.4619	3168296.947	350
392446.9539	3168277.968	350
394061.5603	3172765.930	300
394958.5502	3171456.775	300

De la Tabla 13 se destaca que solo un pozo tiene una profundidad de perforación de 700 m. Existen pozos antiguos o ubicados en zonas de fracturamiento con profundidades de perforación de 245 m. En promedio, las profundidades de perforación de los pozos son de 400 m.

El análisis del comportamiento de las cargas hidráulicas se realizó utilizando datos de profundidad del nivel del agua subterránea y las elevaciones de los brocales en m sobre el nivel del mar (msnm) para construir configuraciones que representan la profundidad, elevación y evolución del nivel del agua en el período de 2019 a 2023. Esto se llevó a cabo utilizando el software ArcGIS y se comparó con los resultados obtenidos en el estudio realizado en 2021.

En la configuración de la profundidad del nivel del agua para el año 2023 (Figura 13) se observan variaciones significativas. Se registran profundidades máximas de alrededor de 170 a 190 m en la porción poniente del acuífero. Las profundidades mayores siguen un patrón paralelo bordeando el límite de la zona serrana (oeste) con el valle. Por otro lado, las profundidades mínimas van de 9 a 33

m en la porción sur del acuífero, siguiendo la dirección de flujo desde la sierra azul hacia la junta de los ríos Chuviscar y Sacramento.

Además, se encuentran profundidades que oscilan en el valle, en la parte norte desde la colindancia con el Acuífero El Sauz-Encinillas (ASE) hasta el centro de la mancha urbana, de 150 a 90 m. En las colindancias o márgenes del río Sacramento, oscilan de 40 a 60 m. En términos generales, presentan el mismo patrón que en 2021. En promedio aritmético, las profundidades del nivel estático son alrededor de 100 m.

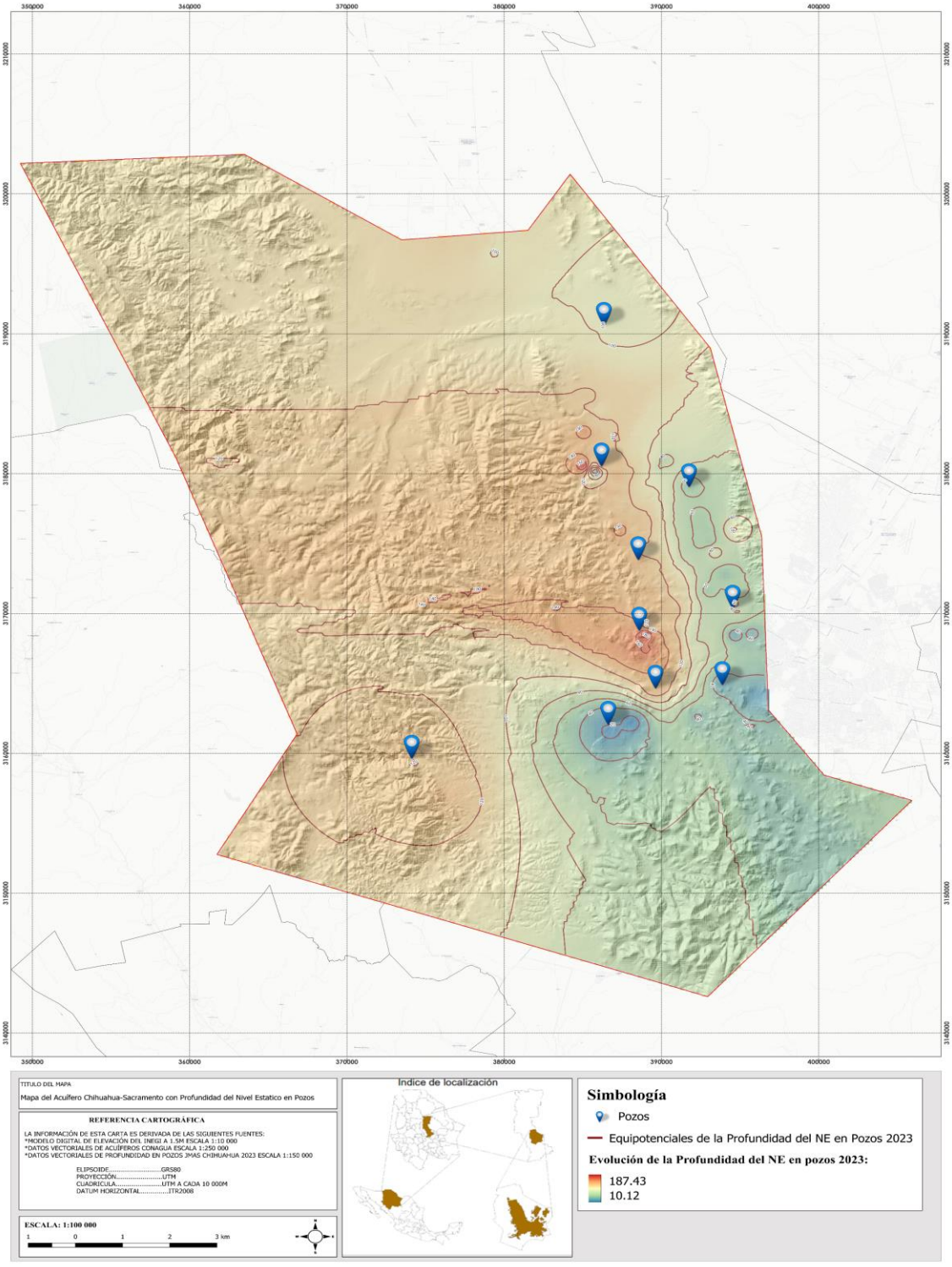


Figura 13. Profundidad del nivel estático para el año 2023 del ACHS. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

Asimismo, se puede observar que, al entrar en funcionamiento, el nivel desciende en promedio 27 m, con un caudal promedio de explotación que nos da un caudal específico de 1.04 l/m. Para el año 2019, y para el 2023, el descenso operativo promedio es de 37 m, con un caudal específico de 1.43 l/m. Esto puede atribuirse a las variaciones en las eficiencias de los equipos de bombeo, que en promedio aumentaron del 52% en 2019 al 58% para 2023.

Las mediciones piezométricas recopiladas durante el año 2023 se han utilizado para elaborar la configuración de la elevación del nivel del agua en msnm (Figura 14). Se destaca que la dirección preferencial del flujo mantiene una trayectoria paralela al río Sacramento de Noroeste a Sureste, y de forma transversal desde la sierra la Carbonera hasta el río Sacramento, y desde la sierra Azul hacia la confluencia de los ríos.

Es decir, que la dirección del flujo del agua subterránea se desplaza desde las sierras, como la de El Mogote en el extremo occidental del acuífero, hacia la sierra Nombre de Dios en el lado oriental, en dirección al centro del valle. Sin embargo, se identifican varios conos de abatimiento en el flanco oriental de la sierra El Mogote, los cuales interceptan parte del flujo de agua subterránea.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

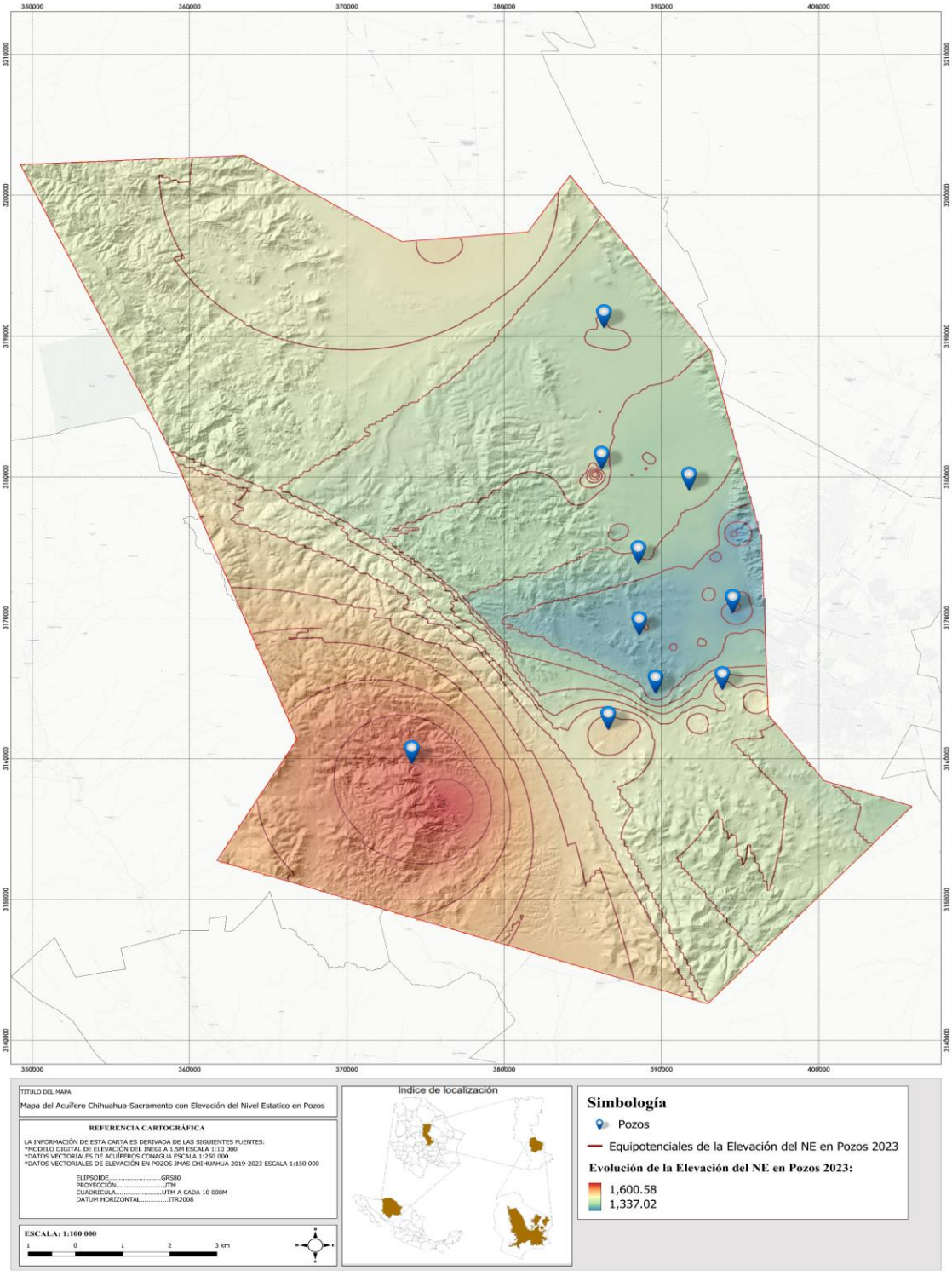


Figura 14. Elevación del nivel estático para el año 2023 del ACHS. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

La configuración de la evolución del nivel del agua durante el periodo de 2019 a 2023 ofrece una comparación del comportamiento hidráulico (Figura 15). Esta representación proporciona una visión detallada de las fluctuaciones en el nivel del agua subterránea en el tiempo para el acuífero Chihuahua-Sacramento.

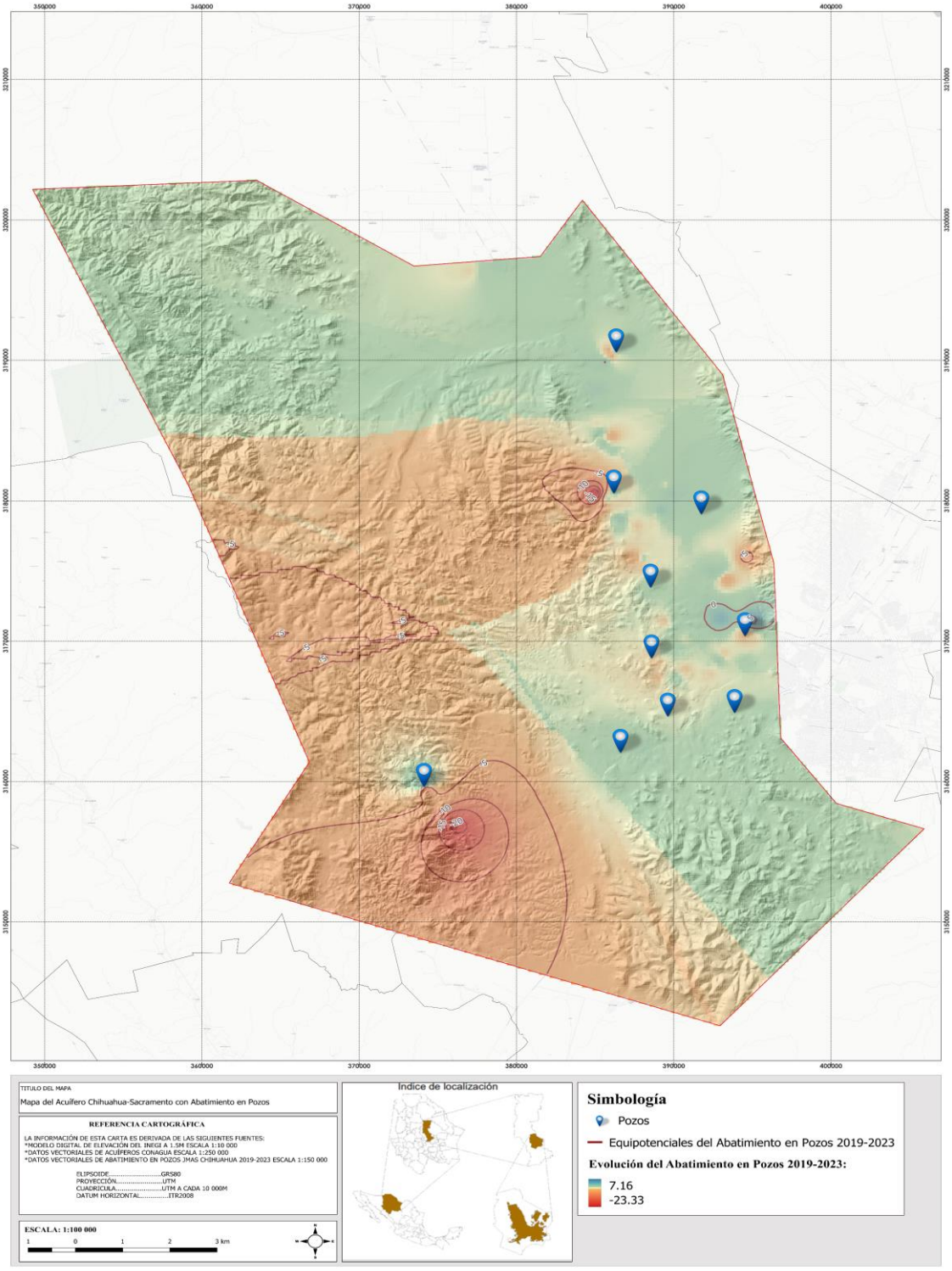


Figura 15. Evolución del nivel estático para el año 2023 del ACHS. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

En la configuración se pueden identificar tanto recuperaciones (valores positivos) como abatimientos (valores negativos). Los abatimientos más significativos se observan en la porción centro-noroeste del acuífero, con un valor máximo de -23.6 m. El descenso promedio de la superficie freática en este periodo fue de -2.13 m.

Por otro lado, se registran algunas recuperaciones menores en la porción centro-sur del acuífero, particularmente en la zona urbana de la ciudad de Chihuahua, con valores que oscilan entre 1 y 4.4 m. En términos generales, el acuífero experimenta una tasa anual de abatimiento promedio de –1 a -0.55 m en este periodo.

La Figura 16 relaciona la profundidad del pozo con la profundidad al nivel estático, con el objetivo de identificar las zonas de tránsito, flujo local y regional. Se verifica que la zona de descarga, o sistema de flujo local, corresponde a la porción ribereña del río Sacramento, mientras que la zona de recarga, es decir, el sistema de flujo local, intermedio y regional corresponde a las proximidades de las elevaciones que bordean el valle de la ciudad de Chihuahua, que se extiende hasta la zona norte del acuífero, al norte del ejido Ocampo.

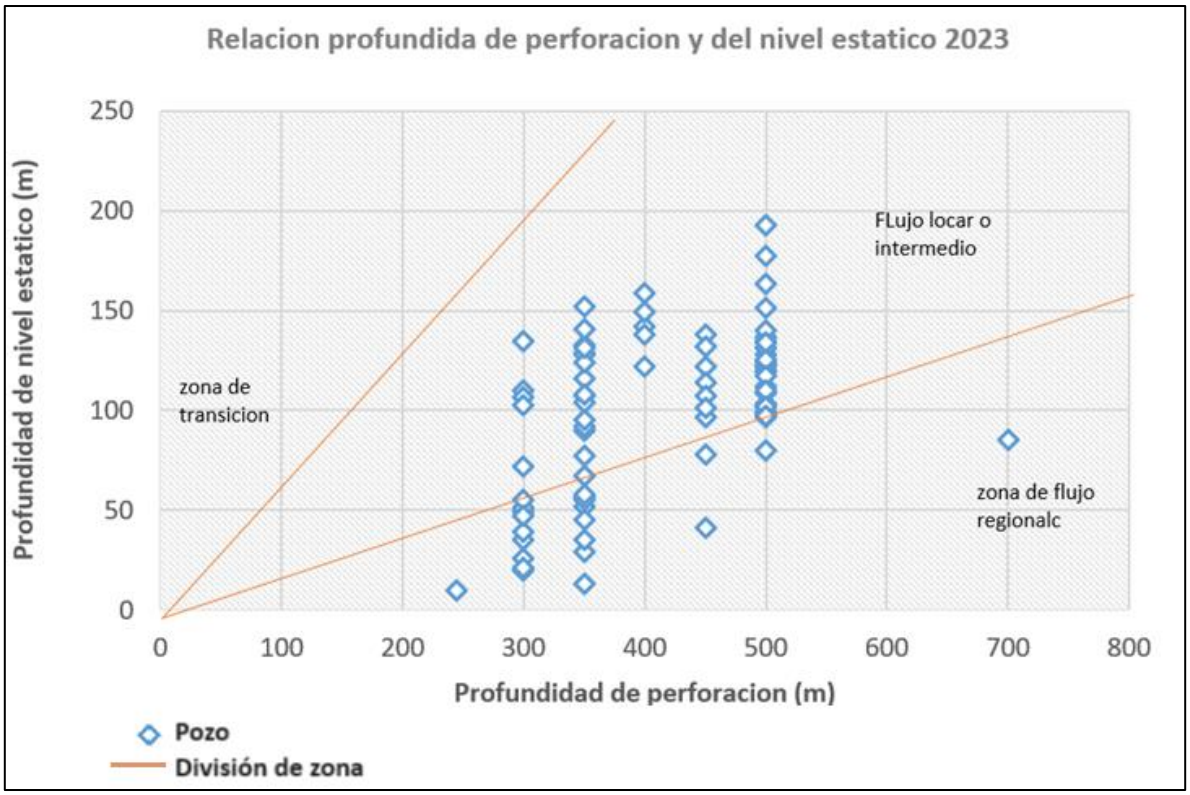


Figura 16. Relación de la profundidad de pozo contra la profundidad del nivel estático ACHS. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

La relación entre la profundidad del pozo y la profundidad del nivel estático se fundamenta en principios hidrogeológicos clave que explican el comportamiento del agua subterránea en un acuífero. Cuando se analiza esta relación, se consideran los siguientes principios fundamentales [57] [58] [59]:

- **Equilibrio del agua en el pozo con el acuífero:** El agua en un pozo se encuentra en equilibrio hidráulico con el agua del acuífero, lo que significa que la presión del agua en el pozo es igual a la presión hidrostática del agua en el acuífero a la profundidad del pozo.
- **Profundidad al nivel estático:** La profundidad al nivel estático se refiere a la profundidad a la que el agua se eleva en un pozo sin la intervención de una bomba. Esta profundidad es un indicador importante de la capacidad de un pozo para extraer agua del acuífero.
- **Zonas de flujo y tránsito del agua:** En función de esta relación, se identifican tres zonas principales en el acuífero:

  Zona de tránsito: Esta zona se encuentra en la parte superior del acuífero y se caracteriza por un movimiento vertical del agua hacia el pozo. Aquí, el agua se desplaza hacia el pozo debido a diferencias de presión y gravedad.

  Zona de flujo local: Alrededor del pozo, se encuentra la zona de flujo local, donde el agua se mueve de forma radial hacia el pozo. Esta zona es crucial para la captación de agua por parte del pozo.

  Zona de flujo regional: En la parte inferior del acuífero, está la zona de flujo regional, donde el agua se desplaza horizontalmente hacia el pozo. Esta zona es importante para comprender el movimiento del agua a gran escala en el acuífero.

En relación con los caudales de extracción en el acuífero durante el periodo 2019-2023, se registraron caudales promedio de 25 litros por segundo (lps), con caudales máximos de 70 lps y mínimos de 5 lps. Estos datos son fundamentales para comprender la dinámica de extracción y la disponibilidad de agua en el acuífero durante este periodo.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Hidro geoquímica.

La hidro geoquímica del acuífero Chihuahua-Sacramento ha sido objeto de diversos estudios que han investigado la composición química y las características del agua subterránea en esta región. Estos estudios han revelado la presencia de diferentes elementos y compuestos químicos en el agua subterránea, así como su distribución y posibles fuentes de contaminación como se analizó en el **Informe 5. Análisis de riesgo y resiliencia hídrica**.

Según informes de la CONAGUA, se han realizado análisis hidro geoquímicos en varios puntos del acuífero Chihuahua-Sacramento para evaluar la calidad del agua y su idoneidad para diversos usos, como el abastecimiento humano, la agricultura y la industria. Estos análisis han permitido identificar la presencia de minerales disueltos, metales pesados y otros contaminantes en algunas áreas del acuífero, lo que puede afectar su calidad y potencialmente representar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente, lo cual puede revisarse a detalle el **Informe 5. Análisis de riesgo y resiliencia hídrica** y en el **Informe 4. Análisis urbano y rural**.

Además, instituciones académicas como la Universidad Autónoma de Chihuahua han llevado a cabo estudios que han profundizado en la comprensión de la hidro geoquímica del acuífero Chihuahua-Sacramento. Estas investigaciones han explorado la relación entre la geología local, las actividades humanas y la calidad del agua subterránea, brindando información crucial para la gestión y protección de este recurso. Uno de los estudios más completos al respecto fue el realizado en 2015, auspiciado por la JMAS [(26).]

Por otro lado, en el año 2022, la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS) junto con la JMAS Chihuahua, JMAS Juárez y la Universidad Autónoma de Chihuahua llevaron a cabo un informe ejecutivo final como parte del convenio para el levantamiento del inventario estatal de fuentes de suministro de agua potable [(60).] Aunque este informe se ha mencionado en informes anteriores de este estudio, cabe destacar que su alcance no abarca el análisis de todos los parámetros de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 [(61)]. Se centra específicamente en la comparación de las concentraciones de fluoruros y arsénico en los aprovechamientos para abasto de agua potable, agrupados por municipio. Debido a estas limitaciones en el muestreo y análisis de la información, no se aborda en la integración de este capítulo para los tres acuíferos que aborda.

Balance hídrico

Dada la complejidad de la integración y análisis de datos e información sin generar estimaciones de caudales de explotación y censos de aprovechamientos dentro de los acuíferos, este tema es un área de actualización urgente. Por esta razón, en todos los capítulos donde se menciona la disponibilidad según lo establece la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 [(62)], se utilizan los datos oficiales publicados en la plataforma de la CONAGUA para el año 2023 [(53)], abarcando los tres acuíferos considerados.

En la publicación del 2023 de CONAGUA [(14)], referente a la actualización de disponibilidad media anual para el ACHS. Se resalta que utiliza datos del censo de 2009, los cuales son los siguientes:

- Se cuenta con un total de 602 aprovechamientos de aguas subterráneas, de los cuales 331 están activos y los 271 restantes están inactivos. Entre estas obras, se cuentan 527 pozos y 75 norias.
- El volumen total de extracción estimado asciende a 67.2 hm^3 anuales, de los cuales el 78 % (52.4 hm^3) se destina al abastecimiento de agua potable, para la ciudad de Chihuahua. Además, se asigna un 15% (10 hm^3) para uso agrícola y el 7% restante (4.8 hm^3) para otros fines menores. Es importante señalar que, en años anteriores, el uso público urbano manejaba caudales más elevados, con una concesión en torno a los 80 hm^3.
- Por otro lado, el volumen de extracción de aguas subterráneas reportado por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) [(53)] es de 122,498,960 m^3 anuales, según datos actualizados hasta el 30 de diciembre de 2022.
- La recarga total media anual del acuífero estimada de 56.6 hm^3/año, considerando tanto la recarga natural como la inducida.
- La Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea (DMA) se calcula restando la descarga natural comprometida (DNC) y el volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) al volumen de recarga total media anual (R).
- Para este acuífero, el cálculo resulta en un valor negativo de -65.898960 hm^3/año, lo que indica un déficit en la disponibilidad de agua subterránea para nuevas concesiones.

En cuanto al análisis del realizado en el REPDA con actualización al 31 de diciembre del 2023, se tiene [(53)]:

- Se tiene 356 aprovechamientos de aguas subterráneas, con un volumen total autorizado de 151,918,276.80 m^3/año; es decir 29,419,316.80 m^3 adicionales.
- De estos aprovechamientos 113 están registrados para la actividad agrícola con un volumen anual autorizado de 10,428,080.00 m^3, que en comparación a la publicación de disponibilidad del 2023 muestra valores similares.
- 71 aprovechamientos están registrados para uso público urbano con un volumen anual autorizado de 130,344,975.00 m^3, que, en comparación a la publicación de disponibilidad del 2023, se duplico el volumen que se reporta en la publicación.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

- Aunque en la publicación no se detalle el uso industrial es importante mencionar que en este acuífero por representar casi lo mismo que el agrícola con un volumen de acuerdo con el REPDA de 9,184,670.00 m^3, se tienen 42 aprovechamientos, es decir con menos de la mitad de los aprovechamientos que el agrícola pueden extraer volúmenes similares.

3. Acuífero Tabalaopa-Aldama (ATA)

El acuífero Tabalaopa-Aldama, designado con la clave 0835 por la Comisión Nacional del Agua, está situado en la región central del estado de Chihuahua. Sus coordenadas abarcan los paralelos 28°32’30” y 29°0’0” de latitud norte, y los meridianos 106°10’0” y 105°52’0” de longitud oeste, ocupando una superficie de 728 km^2. Limita al norte con los acuíferos Laguna El Diablo y Laguna de Hormigas, al este con Aldama-San Diego, al oeste con el acuífero Chihuahua-Sacramento, y al sur con el Acuífero Villalba, todos ubicados en el estado de Chihuahua [(63)].

El acuífero Tabalaopa-Aldama (ATA) desempeña un papel crucial en el municipio de Chihuahua, siendo una fuente vital de agua subterránea para satisfacer las necesidades domésticas, industriales y agrícolas de la región. Su relevancia se extiende a la sustentabilidad ambiental al mantener los ecosistemas locales y la agricultura, además de asegurar la disponibilidad de agua para la ciudad y las comunidades circundantes. Por tanto, la conservación y el manejo sostenible de este acuífero son esenciales para garantizar un suministro continuo de agua y fomentar el desarrollo económico y social de la zona. El ATA abarca parcialmente los municipios de Aldama, Aquiles Serdán y Chihuahua, ocupando una extensión de 728 km^2 en total.

3.1. Modelo Geológico Conceptual

El modelo geológico conceptual del acuífero Tabalaopa-Aldama se fundamenta en el análisis de la geología regional y local, la estructura geológica, los depósitos aluviales, la litología y los procesos de recarga y descarga. Este modelo proporciona una sólida base para comprender la dinámica hidrogeológica del acuífero, siendo esencial para su adecuada gestión y conservación a largo plazo. El conocimiento de la geología del subsuelo y sus características estructurales son factores determinantes para comprender las capacidades hidráulicas de los estratos acuíferos.

3.1.1. Geología regional

El ATA, situado en la región centro-este del estado de Chihuahua, abarca parcialmente los municipios de Chihuahua, Aldama y Aquiles Serdán, y forma parte de la provincia fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte, específicamente de la subprovincia del Bolsón de Mapimí (Figura 17) [63]. Esta área se caracteriza por la presencia predominante de llanuras aluviales y bajadas, intercaladas con pequeñas sierras escarpadas y plegadas, así como lomeríos asociados a rocas volcánicas y calizas.

Dentro del acuífero Tabalaopa-Aldama se observan llanuras Inter montañas divididas por serranías de rocas volcánicas, con bloques de fallas escalonadas originados por fallas normales que conforman los pilares tectónicos de las sierras Nombre de Dios y El Cuervo. Estas sierras presentan una variación en la composición litológica, siendo predominantemente ígneas en el oeste y cretácicas plegadas en el este y sur [64].

La secuencia estratigráfica del área abarca desde el Precámbrico hasta el Cuaternario, con una variedad de rocas sedimentarias y volcánicas, incluyendo conglomerados, aluviones, yesos, calizas y rocas ígneas del Terciario. El acuífero está compuesto principalmente por depósitos aluviales y fluviales del Cuaternario, con una secuencia granular no consolidada intercalada con rocas volcánicas. Esta configuración puede dividirse en dos medios, granular y fracturado [63].

Estructuralmente, la zona presenta numerosas fallas normales con orientación noroeste-sureste, que afectan toda la secuencia estratigráfica y causan fracturamiento en las rocas volcánicas debido al evento distensivo de cuencas y sierras. Además, se observan pliegues anticlinales y sinclinales en rocas cretácicas al noreste del acuífero, resultado del evento compresivo de la Orogenia Laramide.

El acuífero Tabalaopa-Aldama se encuentra dentro de las provincias fisiográficas Sierras Marginales y Cuencas y Sierras, y forma parte de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental. Esta área presenta una topografía suave, con cordilleras y valles alargados orientados generalmente de norte a noroeste [65] [66].

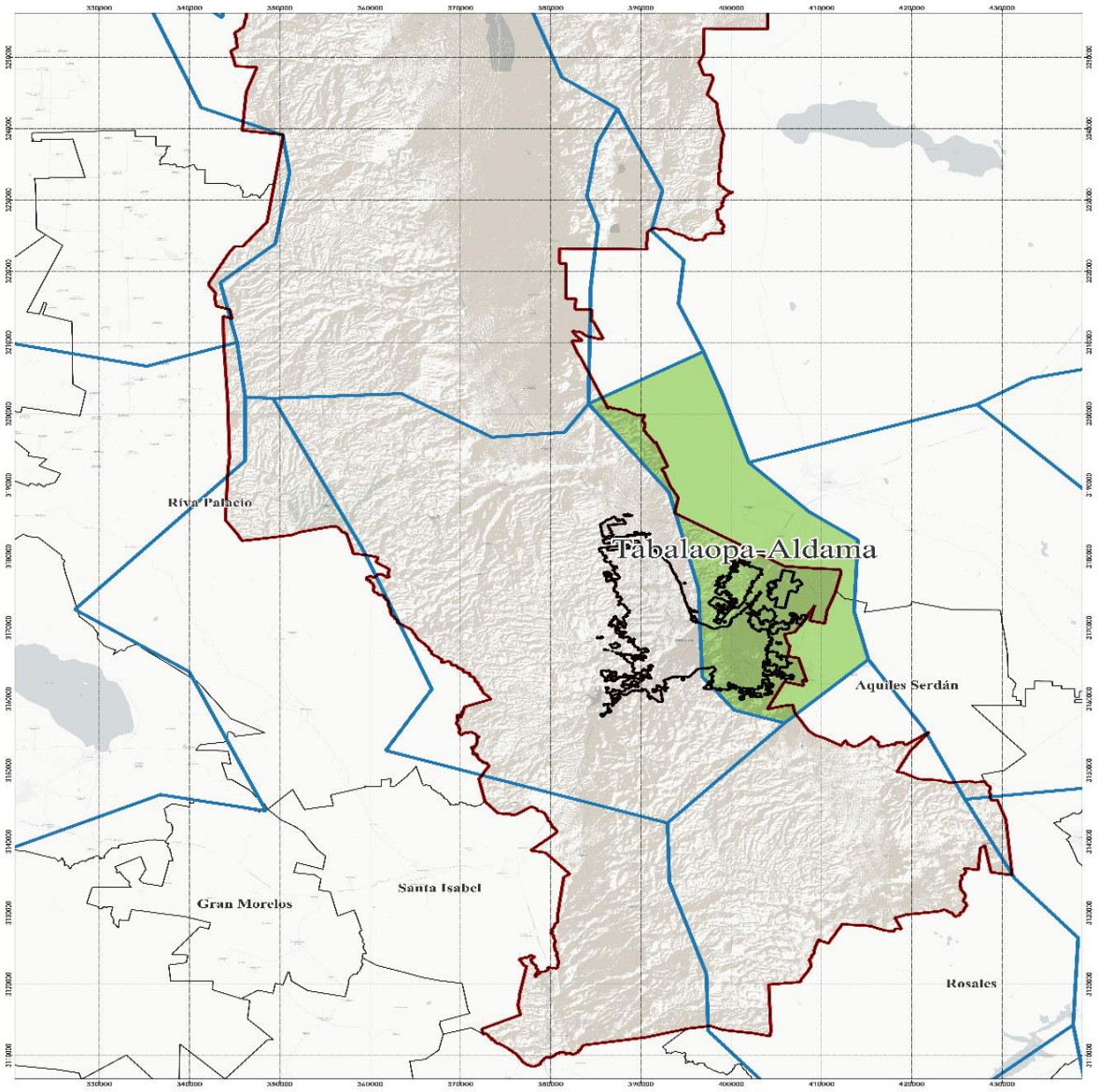


Figura 17. Mapa del Acuífero Tabalaopa-Aldama. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI [23] y CONAGUA [24].

3.1.2. Estructura geológica

El control estructural en el acuífero Tabalaopa-Aldama revela un fracturamiento abierto en las rocas volcánicas, resultado del evento distensivo de Cuencas y Sierras. Además, las rocas sedimentarias muestran zonas de disolución junto con el fracturamiento causado por eventos tectónicos. Las minas Santo Domingo y San Antonio presentan un sistema de fallas de rumbo noreste 20°, con las estructuras principales Oriente y Poniente actuando como conductos para la infiltración de agua en la mina. Se observan pliegues debidos al evento compresivo Laramide, como los anticlinales La Nopalera y Santo Domingo. Las fallas normales y laterales, principalmente en rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno y Cretácico, reflejan la deformación frágil en el área, con tres sistemas de fallamiento principales [67,68].

3.1.3. Estratigrafía

La zona de estudio presenta una diversidad de unidades geológicas que abarcan diferentes períodos geológicos y características litológicas. Estas unidades incluyen [67,68]:

La formación Rara, consiste en metalutitas y metareniscas del Triásico, caracterizadas por fracturas de cuarzo y plegamiento. Esta formación exhibe una estructura geológica compleja que refleja procesos tectónicos y metamórficos ocurridos durante el Triásico [69].

El Grupo Cuchillo, engloba las formaciones Virgen y La Peña. La Formación Virgen está compuesta principalmente por yesos, anhidritas y calizas del Cretácico Inferior, mientras que la Formación La Peña está constituida por calizas arcillosas. Ambas formaciones presentan baja permeabilidad, lo que afecta su capacidad de flujo hidrogeológico.

El Grupo Aurora, incluye la Formación Finlay, caracterizada por calizas y dolomías con alta permeabilidad secundaria. Esta formación exhibe una mayor capacidad de flujo hidrogeológico en comparación con las formaciones del Grupo Cuchillo debido a su composición litológica.

La Riolita, es una brecha alterada con fracturamiento y alteración epitermal. Esta unidad geológica muestra signos de procesos volcánicos y metamórficos, lo que indica una historia geológica compleja y dinámica.

La Andesita, es una formación de composición andesítica del Paleoceno. Presenta fracturamiento regular y permeabilidad, lo que la diferencia de las formaciones más antiguas como la Formación Rara.

Toba Riolítica, son intercalaciones de tobas y sedimentos volcanoclásticos del Paleógeno, con variada composición litológica y amplia distribución en la región. Estas unidades reflejan la actividad volcánica pasada y su influencia en la geología regional.

Los Conglomerados Polimíctico y Limo-Arena, son depósitos aluviales del Holoceno. El Conglomerado Polimíctico se destaca como la unidad granular más importante geohidrológicamente en esta zona, debido a su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea.

Estas unidades geológicas presentes en la zona de estudio proporcionan una visión detallada de la evolución geológica y las características hidrogeológicas del área, lo que es fundamental para la gestión y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales [70) (71)].

La secuencia estratigráfica del acuífero Tabalaopa-Aldama comprende varias formaciones geológicas que abarcan desde el Precámbrico hasta el Cuaternario. Estas formaciones son [70) (67) (71)]:

Rocas del Precámbrico: Constituyen el basamento del acuífero y están compuestas por rocas gnéisicas, anfibolitas, graníticas y metamórficas. Han sido sometidas a fases compresivas y distensivas que han dado lugar a bloques emergidos y hundidos, con movimientos horizontales ocasionales de cabalgamiento.

Formaciones del Cretácico Inferior: Entre estas formaciones se incluyen los yesos, anhidritas y calizas, distribuidos principalmente en el sector nordeste, norte y sur del acuífero. Estas rocas cretácicas muestran pliegues anticlinales y sinclinales generados por el evento compresivo de la Orogenia Laramide.

Depósitos Aluviales y Fluviales del Cuaternario: Compuestos por conglomerados, aluviones, boleos, gravas, arenas y ocasionalmente intercalados con lentes arcillosos. Estos depósitos se encuentran distribuidos en todo el acuífero y constituyen la principal fuente de agua subterránea.

Cada una de estas formaciones contribuye de manera significativa a la configuración hidrogeológica del ATA, influyendo en su capacidad de almacenamiento y recarga de agua subterránea.

3.1.4. Geología estructural

El control estructural en la zona del ATA se encuentra claramente definido, mostrando una combinación de fracturamiento abierto en rocas volcánicas y zonas de disolución en rocas sedimentarias [(39).] Este fenómeno es resultado del evento distensivo de Cuencas y Sierras, que afectó tanto a las rocas preexistentes como a las sedimentarias, creando una compleja red de estructuras.

En la región, destacan obras mineras como las minas Santo Domingo y San Antonio, donde se encuentran sistemas de fallas de rumbo noreste 20°, como la falla Oriente y Poniente, que actúan como conductos de infiltración hacia el interior de las minas. Además, existen fallas de rumbo NO 30° que contribuyen al flujo hídrico hacia las fallas con orientación NE 20°.

La deformación en la zona presenta dos tipos principales: la dúctil-frágil, representada por pliegues anticlinales y sinclinales formados durante el evento compresivo Laramide, y la frágil, manifestada por grandes fallas normales y laterales que afectan principalmente a las rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno y del Cretácico. Estos sistemas de fallamiento, con orientaciones variadas, como NO 30 a 55° y NE 12° a 80° suroeste, influyen significativamente en la hidrogeología del acuífero [(40)].

El acuífero Tabalaopa-Aldama, ubicado en el centro-este del estado de Chihuahua (Figura 17), se caracteriza por su forma irregular alargada, típica de la Provincia Fisiográfica de Cuencas y Sierras. Geomorfológicamente, presenta un valle central flanqueado por bloques elevados y se encuentra en la sub-provincia del Bolsón de Mapimí. El valle tiene grandes espesores sedimentarios debido a las bajadas presentes en los límites con las sierras, con sedimentos que van desde coluviones hasta aluviones [(41) (42) (40)].

El acuífero mismo está compuesto por un sistema granular no consolidado de origen aluvial, mientras que el basamento del valle está formado por rocas volcánicas, principalmente tobas e ignimbritas. Las fallas predominantes son normales, reflejando condiciones distensivas, y la densidad de fracturamiento varía entre rocas ígneas y sedimentarias [(41) (42) (40)].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

3.1.5. Geología del subsuelo

El ATA se caracteriza por ser un sistema complejo y heterogéneo, compuesto por diferentes unidades geológicas y estructurales (Figura 18) que influyen en su comportamiento hidrogeológico [41] [42] [40].

Composición del acuífero: El acuífero está alojado en un sistema granular no consolidado de origen aluvial, compuesto por depósitos de arenas intercaladas con limos y arcillas. Estos depósitos tienen espesores variables que oscilan entre 50 y 800 m. Además, debajo de este paquete aluvial, se encuentra una secuencia volcanoclástica compuesta por riolitas, tobas y piroclastos, cuyas permeabilidades varían de baja a media, lo que sugiere la presencia de dos medios acuíferos: uno granular y otro fracturado.

Estructura geológica: El basamento del acuífero está constituido por rocas gnéisicas, anfibolíticas, graníticas y metamórficas del Precámbrico. Estas rocas han experimentado fases compresivas y distensivas que han dado lugar a grandes bloques emergidos y/o hundidos, así como a fallas normales de orientación noroeste–sureste que afectan a toda la secuencia estratigráfica.

Geomorfología: La zona donde se encuentra el acuífero se caracteriza por una etapa de madurez geomorfológica, con un avanzado grado de denudación de las estructuras y un drenaje bien integrado. Se observa un drenaje dendrítico-paralelo predominante, aunque también se encuentran otros tipos de drenaje como el radial y el dendrítico rectangular. Las zonas bajas del acuífero se consideran zonas de recarga difusa, especialmente en áreas con abanicos aluviales y pendientes suaves.

Provincia fisiográfica: Según la clasificación de Provincias Fisiográficas propuesta por E. Raisz, el área del acuífero se ubica entre las provincias Sierras Marginales y Cuencas y Sierras. Esta ubicación implica la presencia de serranías de rocas volcánicas y cuencas con un espesor promedio de relleno de 1200 m, así como la presencia de fallas normales que afectan a toda la secuencia estratigráfica.

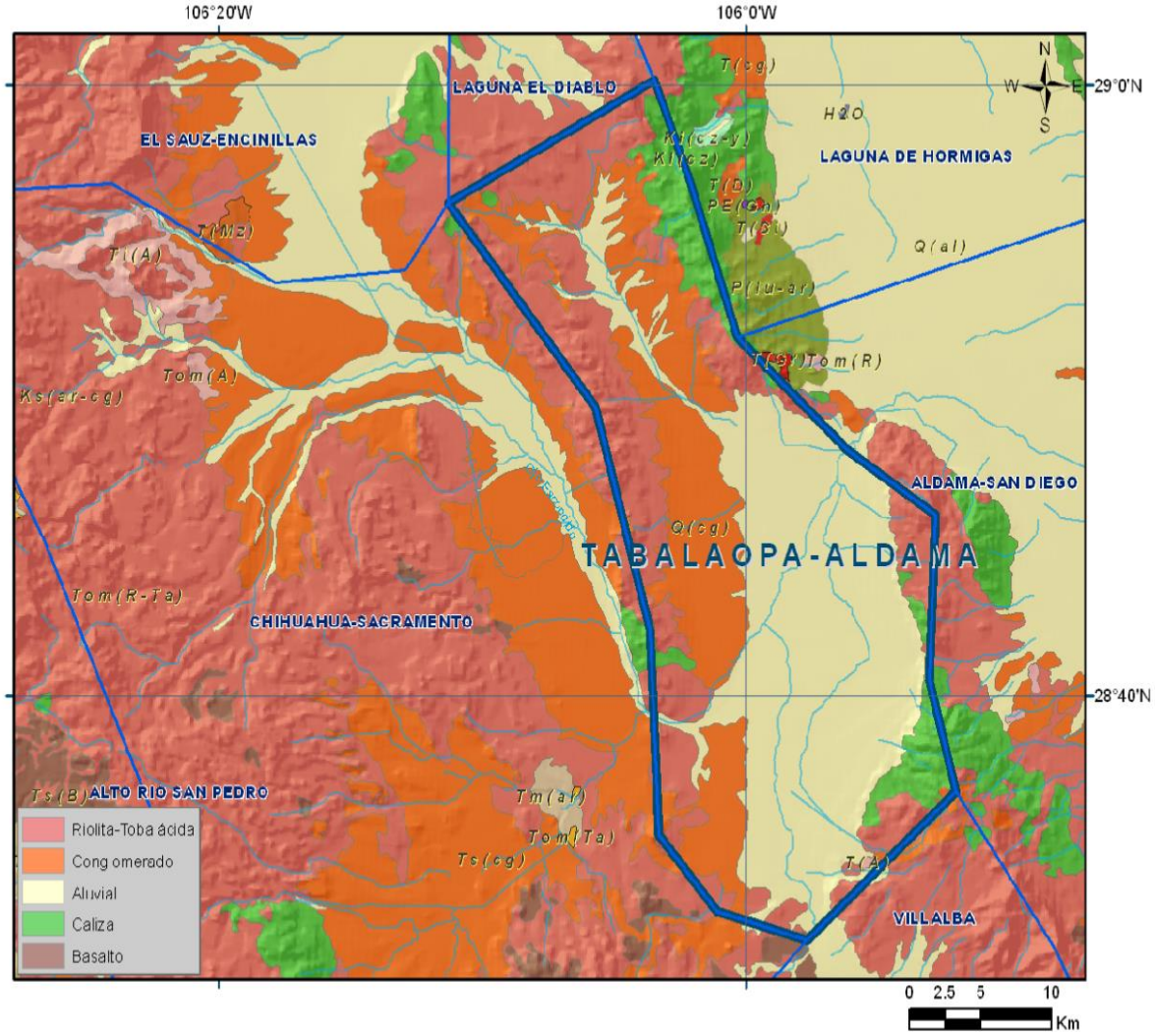


Figura 18. Geología general del acuífero Tabalaopa-Aldama. Fuente: CONAGUA (2023) [63].

3.1.6. Geofísica

La integración de los ensayos geofísicos realizados de manera individual por distintas instituciones podría proporcionar un conocimiento más completo y detallado de la estructura geológica de la región. Actualmente, no existe una consolidación de estos datos en una base estructurada, lo que limita la capacidad de generar modelos conceptuales precisos de las unidades geoeléctricas.

Sería beneficioso establecer un registro centralizado en alguna institución para todos los ensayos geofísicos realizados, lo que permitiría una mejor comprensión y análisis de la geología subterránea. Esta propuesta facilitaría la generación continua de modelos conceptuales mejorados de las unidades geoeléctricas a medida que se llevan a cabo más ensayos en la región.

Con los análisis que se tuvieron acceso, fue posible definir la estructura de los terrenos permeables e impermeables en los Valles de Tabalaopa y Aldama mediante prospección geofísica hasta una profundidad de 1000 m. Los resultados revelan la presencia de tres valles con espesores considerables de materiales de relleno: Tabalaopa, Aldama y Las Ánimas, siendo este último el que contiene una mayor proporción de sedimentos arcillosos en comparación con los otros dos [(63)].

Se destaca que el Valle de Tabalaopa muestra una relación geohidrológica limitada con los valles de Aldama y Las Ánimas, principalmente debido al cauce poco profundo del Río Chuviscar entre las sierras de La Gloria y La Cruz. Sin embargo, el Valle de Aldama presenta posibilidades de albergar agua en algunas estructuras profundas, lo que sugiere la importancia de un análisis detallado de su geología subyacente [(63)].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

3.2. Factores Externos que Impactan el ATA

El ATA es un sistema de almacenamiento de agua subterránea de gran importancia para la región, ya que abastece de agua a diversas actividades como la agricultura, la industria y el consumo humano, los principales factores externos que lo impactan son:

Cambio climático: puede afectar la disponibilidad de agua en la región, lo que impacta negativamente en el acuífero. La disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura podrían reducir la recarga del acuífero y aumentar la evaporación.

Deforestación: La tala de árboles en las zonas de recarga del acuífero puede reducir la infiltración de agua y aumentar la erosión del suelo, lo que a su vez puede afectar la calidad del agua.

Expansión urbana: El crecimiento de las ciudades y pueblos en la zona del acuífero puede aumentar la demanda de agua y la generación de aguas residuales, lo que puede impactar negativamente en la calidad y cantidad del agua del acuífero.

Contaminación: El uso de pesticidas, fertilizantes y otros productos químicos en la agricultura, así como la descarga de aguas residuales sin tratamiento, pueden contaminar el agua del acuífero.

3.2.1. Cambio climático

En el informe **1.Integración del análisis del medio natural**, se abordó de forma breve y general para la condición de los principales parámetros que son indicadores del clima y de lo que se ha denominado variabilidad o cambio climático, además de esto en el informe **5. Integración del análisis de riesgos y resiliencia hídrica**, se realizó el análisis de causas y consecuencias del cambio climático en el Municipio de Chihuahua.

De acuerdo con el área del acuífero Tablaopa-Aldama, en el estudio de Evaluación de fuentes por la JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH, en el 2015 [(26)]; se identifican tipos diferentes de climas según la clasificación de Köppen modificada por García [(46),] que van desde climas secos semicálidos hasta seco templado. Cada uno de estos climas presenta características específicas en términos de temperatura, precipitación y régimen pluviométrico, lo que influye en la disponibilidad y gestión del agua en el acuífero. A continuación, se describe cada uno de ellos:

BS0hw(w) - Seco semicálido: Este tipo de clima se encuentra en el centro del acuífero y se caracteriza por ser estepario y extremadamente seco. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 18 y 22°C, con la temperatura del mes más frío menor a 18°C. El régimen de lluvias de verano es al menos diez veces mayor que la cantidad de lluvia en el mes más seco del año, y la precipitación invernal representa menos del 5% de la lluvia anual.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

BS0kw(w) - Seco templado: Este clima predomina en el área del acuífero, abarcando tanto la zona norte como la sur. Es un clima estepario más seco, con lluvias en verano y sequía durante el invierno, caracterizado por temperaturas medias anuales entre 12 y 18°C. La temperatura del mes más frío varía entre -3 y 18°C, mientras que la del mes más cálido supera los 18°C. El régimen de lluvias de verano es al menos diez veces mayor que la cantidad de lluvia en el mes más seco del año, y la precipitación invernal representa menos del 5% de la lluvia anual.

3.2.2. Precipitación

En este contexto, se podría considerar una situación similar a la del ACHS (sección 2.2.2). Sin embargo, para este acuífero, existen dos puntos de observación importantes: una estación operada por la CONAGUA y ubicada en la potabilizadora, y otra en el aeropuerto internacional de la ciudad de Chihuahua.

3.2.3. Temperatura

En este aspecto, presenta un comportamiento similar al del ACHS (sección 2.2.3). Para el análisis, se consideraron las dos estaciones mencionadas anteriormente. Es importante destacar que estas estaciones siempre han mostrado un diferencial menor en comparación con las consideradas en el ACHS (Tabla 14). Sin embargo, al comparar con la temperatura promedio de 16.1°C, se observa que solo los meses de enero y febrero presentan temperaturas promedio inferiores a las históricas.

Tabla 14. Temperatura promedio mensual (C°) 2019-2023, estaciones observatorio CONAGUA y aeropuerto. Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA (2023).

Temperatura media °C					
Año	**2023**	**2022**	**2021**	**2020**	**2019**
Enero	12	12	11	11	11
Febrero	13	13	15	15	15
Marzo	23	18	18	18	19
Abril	25	25	23	23	22
Mayo	31	29	27	27	27
Junio	31	30	30	30	29
Julio	29	29	27	27	29
Agosto	28	26	26	26	29
Septiembre	22	23	25	25	25
Octubre	16	20	22	22	20
Noviembre	13	18	16	16	16
Diciembre	11	17	16	16	12

3.2.4. Hidrografía

Este apartado será abordado con mayor detalle en el **Informe 9. Análisis de Aguas Superficiales**. El acuífero Tabalaopa-Aldama (Figura 19) se encuentra en la Región Hidrológica 24, Bravo-Conchos, ubicada en la Mesa del Norte que abarca los estados de Chihuahua, Durango y Coahuila [(63)]. Esta región hidrológica es de gran importancia debido a la presencia del Río Conchos, que es la corriente más destacada en el estado.

La zona del acuífero se encuentra dentro de la Cuenca Río Conchos-Presa El Granero, específicamente en la Subcuenca Río Chuvíscar [(63)]. En esta región, las corrientes superficiales son efímeras y estacionales; durante los períodos de estiaje, los arroyos pueden no tener flujo, excepto el Río Chuvíscar, que experimenta un flujo casi continúo debido a la descarga de aguas tratadas provenientes de plantas de tratamiento.

El área urbana ha generado una importante infraestructura hidráulica, como la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Sur y otras instalaciones más pequeñas, como las del fraccionamiento Camino Real. Además, existe una red de alcantarillado y agua potable que cubre gran parte de la zona urbana. La Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) gestiona una serie de pozos y sistemas de rebombeo, mientras que actualmente se están construyendo nuevas obras, como un colector de aguas negras en la capital y una fuente alternativa de suministro de agua potable en Aquiles Serdán.

En cuanto a la hidrología superficial, el Río Chuvíscar, que se origina en la Sierra El Tambor a unos 2300 msnm, fluye hacia el noreste. Este río recibe la descarga de la presa Chihuahua antes de atravesar la ciudad de Chihuahua, donde se utiliza como canal para las aguas residuales urbanas. Luego, se une al Río Conchos aguas abajo de la población de Juan Aldama. Otros arroyos importantes en la zona son El Mimbre, Los Nogales y Santa Eulalia, que también contribuyen al sistema hidrológico. Las aguas de estos ríos son aprovechadas para riego agrícola antes de unirse al Río Conchos.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

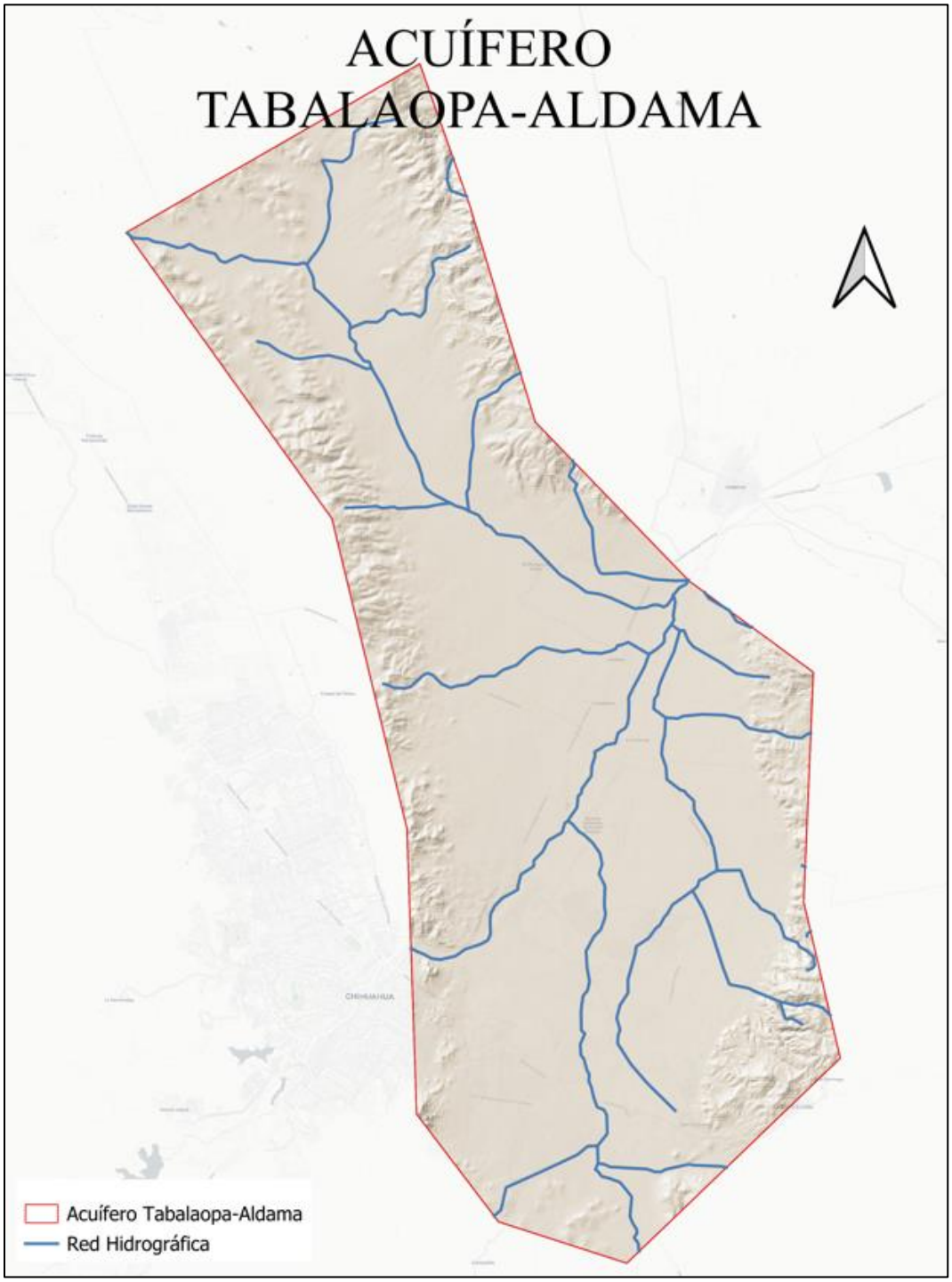


Figura 19. Hidrografía dentro del Acuífero Tabalaopa-Aldama (ATA). Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. Vegetación

La vegetación en la zona del acuífero Tabalaopa-Aldama suele ser arbustiva, con ramificaciones desde la base del tallo y una altura generalmente inferior a los 4 m. Los matorrales están compuestos principalmente por elementos caducifolios, subcaducifolios, inermes, subinermes o espinosos. Su densidad puede variar, aumentando su dominio en condiciones climáticas más cálidas [(23)] [(72)].

Estas formaciones vegetales son características de regiones áridas y semiáridas, con ligeras variaciones estructurales debido a las características del suelo y a las influencias antropogénicas. Pueden encontrarse hasta altitudes de aproximadamente 3000 m.

Algunos grupos vegetativos se distribuyen según las condiciones edáficas del suelo, como suelos delgados pedregosos, arenosos, profundos, con contenido de sales, entre otros.

Las comunidades de matorral arbustivo suelen tener una altura baja o muy baja, mientras que las variedades arbóreas pueden alcanzar entre 10 y 15 m.

El matorral submontano se desarrolla en una franja de transición ecológica cercana a los bosques, a altitudes de 1500 a 1700 msnm. La vegetación arbustiva superior alcanza alturas de entre 2.5 y 5 m e incluye especies como barreta (Helietta parvifolia) y huajillo (Acacia berlandieri), mientras que el estrato inferior cuenta con especies como Agave lechuguilla y candelilla (Euphorbia antisyphilitica), así como gramíneas amacolladas de los géneros Bouteloua, Tridens y Aristida [(51)].

Por otro lado, el matorral desértico micrófilo se desarrolla sobre terrenos aluviales y puede estar formado por asociaciones de especies sin espinas o con espinas. Durante la época de estiaje, este tipo de vegetación puede prácticamente desaparecer, pero germina rápidamente durante la temporada de lluvias. Especies como el matorral Larrea tridentata y Flourensia cernua son representativas en esta zona.

Los pastizales inducidos y cultivados han aumentado su presencia debido a la introducción de pastos para la ganadería. Especies como Bouteloua eriopoda y Bouteloua scorpioides son comunes en estos pastizales.

Por último, los pastizales naturales están dominados por gramíneas o graminoides y su presencia se ve afectada por el clima, el suelo y las actividades humanas. Las especies más comunes son del género Bouteloua, siendo la Bouteloua gracilis la más predominante en condiciones no perturbadas por el sobrepastoreo. también es importante resumir el rubro de vegetación del ATA en los siguientes criterios [(51)]:

Diversidad florística: La vegetación en la zona del ATA presenta una amplia diversidad florística, con más de 500 especies de plantas registradas. Entre las familias más representativas se encuentran las Asteraceae, Fabaceae, Cactaceae y Poaceae.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Importancia ecológica: La vegetación del acuífero juega un papel fundamental en la regulación del clima, la protección del suelo y la conservación de la biodiversidad.

La vegetación del acuífero ha experimentado una degradación significativa en las últimas décadas, principalmente debido a la expansión de la agricultura y la ganadería. Se han implementado diversos programas de conservación para proteger la vegetación del acuífero, como el Programa Nacional de Reforestación y el Programa de Pago por Servicios Ambientales [(73)].

3.2.6. Edafología

En el **Informe 1: Análisis del Medio Natural** se describen las características físicas del municipio de Chihuahua. Dentro del acuífero Tabalaopa-Aldama se encuentran cinco unidades de suelos y cinco subunidades, las cuales se describen a continuación [(52) (73) (74) (63)]:

Castañozem*:* Esta unidad se encuentra principalmente al sur del acuífero, y una pequeña porción en la parte central. Son suelos alcalinos característicos de zonas áridas y semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos como sierras o llanuras. Generalmente tienen más de 70 cm de profundidad y son caracterizados por presentar una capa superior de color pardo o rojizo obscuro, rica en nutrientes y materia orgánica, puede presentar en el subsuelo caliche ligeramente sementado o suelto.

Fluvisol: Se distribuye en el centro del acuífero a lo largo del cauce del río Chuvíscar, además se observa una pequeña porción hacia el norte del acuífero. Son suelos acarreados por el agua por lo que siempre se encuentran cercanos a los cauces; son muy poco desarrollados, de mediana profundidad y estructura débil o suelta.

Litosol: Se presenta en forma abundante en el acuífero, principalmente en los extremos occidental y oriental. Es el suelo más comúnmente encontrado, ocupan 22 de cada 100 ha de suelo, puede presentarse en cualquier tipo de clima y no tiene una vegetación estrictamente definida, en todas las sierras de México, barrancas, lomeríos y en algunos terrenos planos, su profundidad es menor a 10 cm, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido.

Regosol: Esta unidad se distribuye principalmente en la franja central hacia el norte del acuífero, se encuentra en menor proporción hacia el suroeste. Suelos ubicados en diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Son poco desarrollados y presentan capas muy diferentes entre sí, son de color claro y pobres en materia orgánica con mucha similitud a la roca que los genera. Son poco profundos, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la pedregosidad y profundidad que presentan.

Xerosol: Característico de zonas áridas y semiáridas, su símbolo es X, su vegetación natural es de matorral y pastizal, es uno de los suelos más frecuentemente encontrados en el

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua | Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820 | https://implanchihuahua.org/

territorio. Es uno de los suelos más abundantes dentro del acuífero, se localiza en la parte central del acuífero, a los costados del río Chuvíscar. Tienen una capa superficial de color claro debido al bajo contenido de material orgánico, puede existir un subsuelo rico en arcillas subyaciendo esta capa, generalmente presentan aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza.

Háplico: Suelos que no presentan características de otras subunidades existentes en ciertos tipos de suelo. Unidades de suelo: Castañozem, Chernozem, Feozem, Xerosol y Yermosol.

Lúvico: Suelos con acumulación de arcilla en el subsuelo. Son generalmente de color rojizo o pardo oscuro. La arcilla es de alta actividad lo que representa buenas posibilidades de fertilidad para la agricultura en general. Unidades de suelo: Chernozem, Castañozem, Feozem, Xerosol, Yermosol y Arenosol.

Calcárico: Suelos ricos en nutrientes y cal, su símbolo es c. Unidades de suelo: Feozem, Fluvisol, Gleysol y Regosol.

Eútrieo: Suelos con pH ligeramente ácidos con tendencia a alcalinos, con buen grado de fertilidad, se observa en las siguientes unidades: Cambisol, Fluvisol, Gleysol, Histosol, Nitrosdol, Planosol y Regosol.

Cálcico: Son suelos ricos en cal, con una capa característica color blanco en forma de caliche o polvo blanco; dependiendo de la unidad de suelo en la que se manifiesta, el espesor de la capa puede ser superior a 15 cm. Apropiados para la agricultura ya que presentan gran productividad, las unidades de suelo en las que se presentan son: Cambisol, Castañozem, Chernozem, Luvisol, Xerosol y Yermosol.

3.3. Hidrogeología

El acuífero Tabalaopa-Aldama se caracteriza por ser de tipo libre y poseer una permeabilidad que varía de media a baja. Está alojado en sedimentos aluviales depositados en el centro del valle, compuestos por arenas intercaladas con arcillas y limos estratificados, con un espesor de hasta 800 m [(63)]. La principal fuente de recarga es el agua de lluvia, tanto la que se infiltra en las zonas altas como la que se precipita directamente en el valle y los retornos de riego agrícola. La litología, estratigrafía y estructura geológica influyen en la naturaleza, distribución y movimiento del agua subterránea [(63)], Según el estudio elaborado en el 2015 [(26)] se podría clasificar el sistema del ATA como se observa en la Tabla 15.

Tabla 15. Resumen de unidades hidrogeológicas en el acuífero Tabalaopa-Aldama. Fuente: Estudio de evaluación de fuentes, JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH,2015 [(26)].

Tabalaopa-Aldama				
UNIDAD HIDROESTRATIGRÁFICA	**MEDIO POROSO**	**FORMACIONES GEOLÓGICAS**	**GRADO DE PERMEABILIDAD**	***RANGO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/d)**
UH 1	Fracturado	KiCz y KaCz	Media a alta	$1x10^{-2}$
UH 2	Fracturado	KiCz-Lu, PpiMLu-Mar, TpaA y TpaR	Media a baja	$1x10^{-4}$ a $1x10^{-7}$
UH 3	Fracturado	ToTR-lg y TeTR	Baja	$1x10^{-7}$
UH 4	Fracturado y Granular	KmTpaCgo, TmCgp y QpthoCgp	Media	10 a $1x10^{-3}$
UH 5	Granular	QCgp, Qhoal y Qholm-Ar	Media a elevada	2.78 a 302.4
*Valores de referencia tomados de MODFLOW y Anderson (1992).				

3.3.1 Parámetros hidráulicos del sistema

Utilizando la información oficial publicada por CONAGUA [63] se pueden analizar los resultados de la interpretación de los valores de transmisividad obtenidos, los cuales presentan una variabilidad significativa, desde 4.3 hasta más de 4,800 m^2/día. En cuanto a la conductividad hidráulica, los valores reportados oscilan entre 0.0085 y 9.7632 m/día. Los valores más altos de estos parámetros hidráulicos se encuentran en los aprovechamientos cercanos al río Chuviscar.

Al realizar un análisis más detallado y descartar los valores atípicos, se obtiene una transmisividad media de 2.44 x 10^{-6} m^2/s y una conductividad hidráulica promedio del orden de 4.34 x 10^{-8} m/s. Es importante destacar que, en el año 2015 [26], se llevaron a cabo más pruebas de bombeo con el objetivo de desarrollar un modelo de simulación. Sin embargo, según la literatura especializada, la duración de estas pruebas puede no ser suficiente para obtener resultados representativos.

3.3.2 Censo de aprovechamientos

En el ATA se han realizado varios censos de aprovechamientos a lo largo de los años. El primero fue llevado a cabo en 1971 por Ariel Consultores [64]; el segundo se realizó en 1987 [68], en el 2012 por parte de la JMAS y la JCAS, y en el 2022 la Universidad Autónoma de Chihuahua [60], por encargo de la JCAS, llevó a cabo un inventario exclusivamente de aprovechamientos para uso público urbano. Hasta la fecha, no se ha publicado un censo oficial más reciente, por lo que se utilizará la información disponible en las plataformas de CONAGUA.

Según el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) [53] hasta el 31 de diciembre de 2023, se tienen registrados 389 aprovechamientos de agua subterránea en el acuífero Tablaopa-Aldama con un volumen autorizado de 164,649,052.8 m^3 anuales. De estos, 55 corresponden a aprovechamientos identificados como folios 8 (Tabla 16); estos son los aprovechamientos que no cuentan con una asignación o título de concesión, ya que se encuentran en lo que anteriormente se denominaba "zona de libre alumbramiento".

Tabla 16. Resumen de aprovechamientos con folio 8 registrados en el ATA. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA [(53)].

FOLIOS 8		
Uso	**No. Aprovechamientos**	**Volumen (m^3/año)**
AGRICOLA	40	5,978,817
INDUSTRIAL	2	224,000
PUBLICO URBANO	1	15,000
DOMESTICO	3	2,262.5
SERVICIOS	4	470,000
OTROS	5	103,371.87
Total	**55**	**6,793,451.37**

En relación con el volumen autorizado para la extracción de agua del ATA destinado al uso público urbano, este representa el 81% del total del volumen de agua subterránea. Según la publicación de disponibilidad de CONAGUA en 2016, la extracción alcanzó los 75.1 millones de m^3 anuales, lo que significa un incremento del doble en la autorización de extracción respecto al año anterior, cuando el volumen para uso público urbano representaba solo el 42%.

De acuerdo con los datos del organismo operador, se extrae un volumen promedio anual de 43,291,359 m^3, lo que equivale al 27% del volumen autorizado para todas las formas de uso del ATA. Como se muestra en la Figura 20, el uso industrial es insignificante, representando menos del 1%, mientras que el uso agrícola tiene un volumen autorizado del 17%. Estos datos son relevantes para la gestión de este acuífero, ya que la política pública del organismo operador juega un papel determinante en la sostenibilidad de este recurso hídrico.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

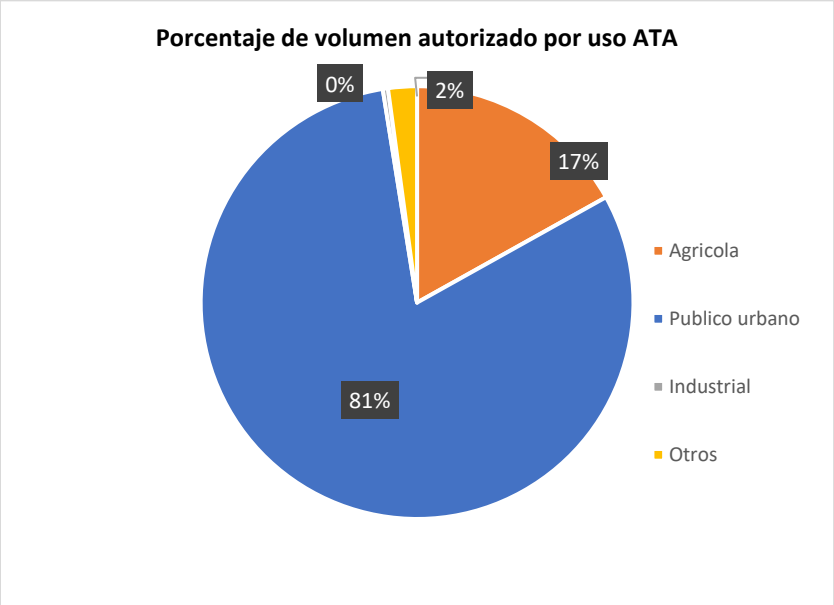


Figura 20. Volúmenes autorizados por uso de forma anual en el ATA. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA [53].

3.3.3 Rasgos indicadores de sistemas de flujo

En el acuífero Tabalaopa-Aldama (ATA), los rasgos indicadores de sistemas de flujo pueden ser identificados a través de diversos métodos y observaciones de campo. Estos indicadores son clave para comprender la dinámica del agua subterránea y pueden incluir:

Topografía: La topografía del área puede revelar áreas donde el agua subterránea puede fluir hacia abajo (zonas de recarga) o hacia arriba (zonas de descarga). Por ejemplo, las áreas de mayor elevación pueden indicar potenciales áreas de recarga, mientras que las áreas más bajas pueden indicar zonas de descarga.

Piezometría: La medición de la presión del agua subterránea en diferentes profundidades a lo largo de un área puede ayudar a identificar patrones de flujo. Las diferencias en los niveles piezométricos pueden indicar áreas de recarga y descarga.

Hidro geoquímica: El análisis de la calidad química del agua subterránea puede revelar la dirección del flujo y las áreas de recarga y descarga. Por ejemplo, la presencia de ciertos minerales o contaminantes puede indicar la influencia de fuentes de agua superficiales o actividades humanas.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Características del suelo: Las propiedades del suelo, como la permeabilidad y la textura, pueden influir en la velocidad y la dirección del flujo de agua subterránea. La observación de estas características puede proporcionar información sobre cómo el agua se mueve a través del subsuelo.

Topografía

La topografía del Acuífero Tabalaopa-Aldama (ATA) desempeña un papel crucial en el movimiento y la distribución del agua subterránea en la región. Esta área se caracteriza por una topografía montañosa, con valles y lomeríos que definen su contorno. A continuación, se detallan aspectos específicos de su topografía, incluyendo limitaciones geográficas, pendientes, elevaciones y rasgos distintivos [(63)].

En cuanto a las limitaciones geográficas (Figura 21), el ATA limita al noroeste con la Sierra de San Antonio, donde las elevaciones oscilan entre los 2,500 y 3,000 m. Al noreste, colinda con la Sierra de Aldama, donde las elevaciones pueden alcanzar hasta los 2,800 m. Hacia el sureste, limita con la Sierra de Nombre de Dios, con elevaciones promedio de 2,400 m, mientras que al suroeste limita con la Sierra de la Cruz, con altitudes entre los 2,300 y 2,500 m.

El valle central del ATA se encuentra a una altitud aproximada de 1,800 msnm, rodeado por las elevaciones de las sierras mencionadas, formando un paisaje de montañas que definen su contorno.

En cuanto a las pendientes, estas varían significativamente debido a la naturaleza montañosa de la región. En las áreas periféricas, las pendientes pueden ser pronunciadas, con inclinaciones que superan el 10% en algunos casos. En el centro del valle, las pendientes tienden a ser más suaves, pero aún pueden alcanzar entre el 2% y el 5%, facilitando el flujo del agua subterránea hacia las zonas más bajas.

El ATA se caracteriza por su relieve montañoso, con valles y lomeríos que definen su topografía. Los ríos y arroyos que atraviesan la región contribuyen a la formación de cañones y barrancas, agregando complejidad al paisaje. Se pueden identificar llanuras aluviales en las áreas de descarga del acuífero, donde el terreno es más plano y el agua subterránea puede aflorar más fácilmente.

Además de las sierras mencionadas se encuentran otras formaciones montañosas de menor altura, como la Sierra de San Ignacio y la Sierra de San Nicolás. Estas sierras contribuyen a la captación de agua y a la recarga del acuífero a través de la infiltración de precipitaciones.

En conclusión, la topografía del Acuífero Tabalaopa-Aldama está marcada por una serie de sierras y montañas que delimitan un valle central, con pendientes variables y una compleja red de ríos y arroyos que influyen en la hidrología de la región [(63)].

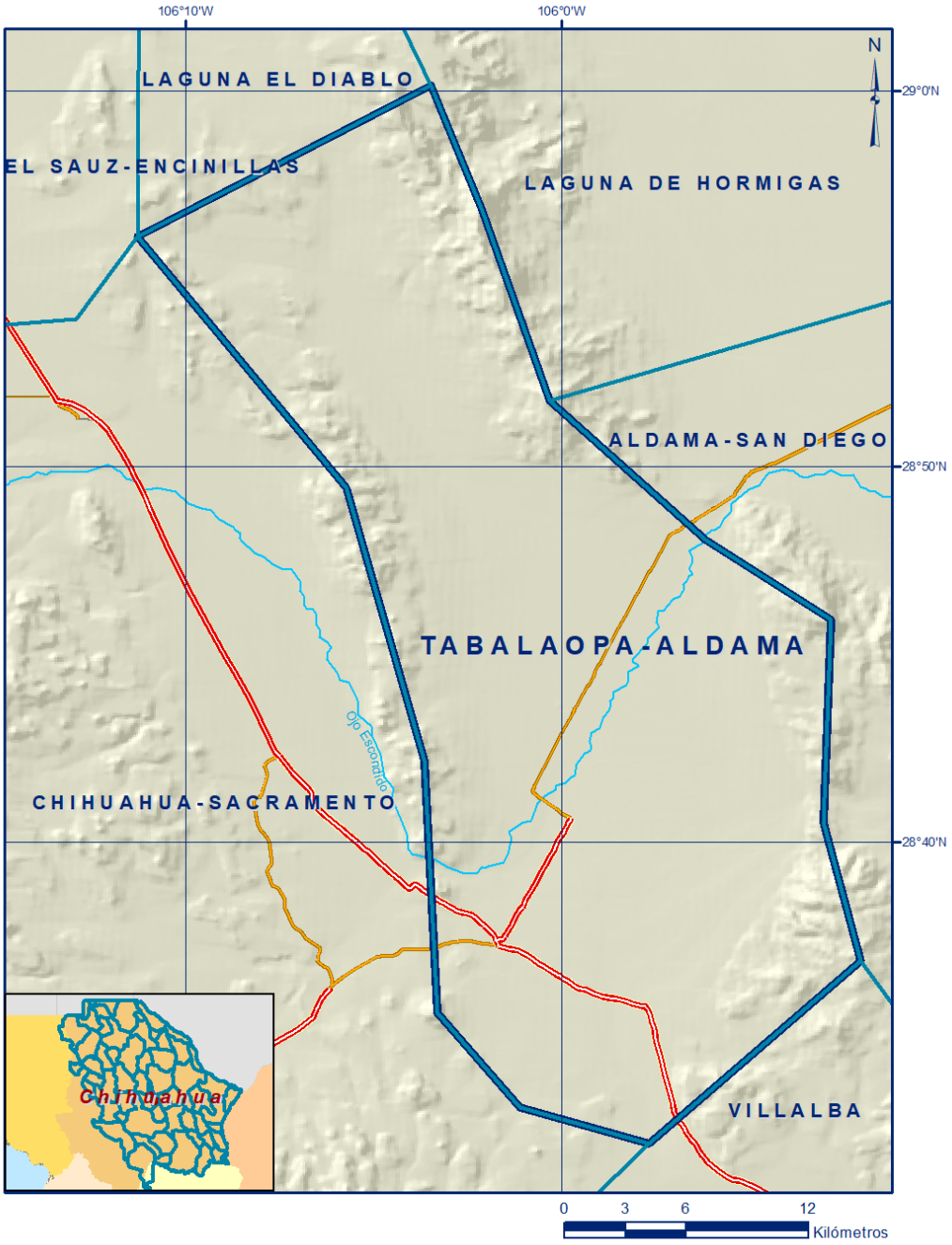


Figura 21. Topografía del acuífero Tabalaopa-Aldama. Fuente: CONAGUA (2023) [63].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Piezometría

La definición de áreas de recarga y descarga, y por ende las trayectorias de flujo de agua subterránea, puede lograrse mediante diversos indicadores, entre ellos las trayectorias piezométricas. Estas trayectorias definen las direcciones del flujo subterráneo ascendente en áreas de descarga y descendente en áreas de recarga. La construcción de una red de piezómetros para obtener esta información puede resultar costosa desde el punto de vista económico [58]. La CONAGUA, tiene una red de pozos para realizar mapas de piezometría, en el ATA se cuenta con 30 pozos como se muestra en la Figura 22.

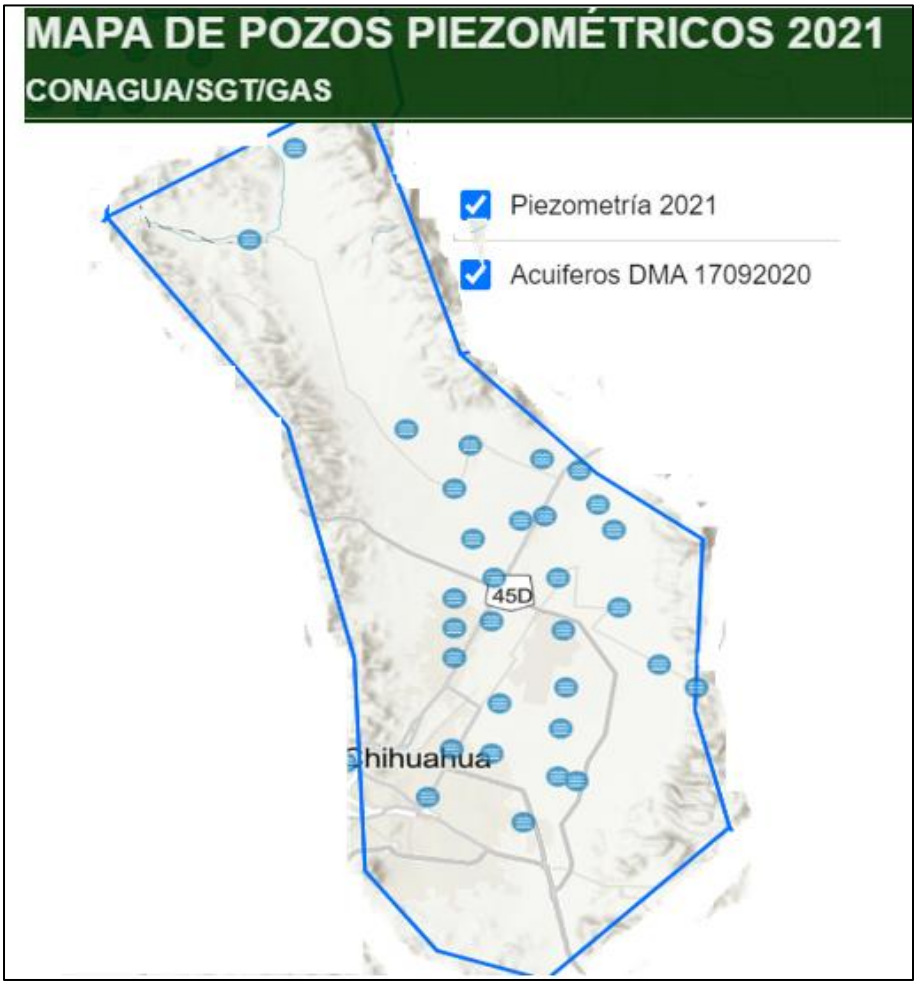


Figura 22. Pozos que son parte de la red piezométrica del ATA. Fuente: CONAGUA (2021) [56].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

También se tomó en cuenta la información del estudio realizado en 2021 [75] sobre el monitoreo piezométrico de los tres acuíferos que abastecen al municipio de Chihuahua. De los 40 pozos utilizados el 100% son pozos operados por el organismo operador. Para el análisis del 2023, se consideraron 90 pozos para la realización de las equipotenciales de profundidad y de elevación del nivel estático. En la Tabla 17 se presentan las características geográficas, como las coordenadas y la profundidad de perforación de los pozos considerados en este análisis.

Tabla 17. Características de los aprovechamientos utilizados para el análisis piezométrico en el ATA. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS

X COORD UTM	Y COORD UTM	PROFUNDIDAD (m)
402361.191	3179529.77	300
401747.273	3180714.70	300
400394.301	3182772.72	300
406307.864	3169192.43	500
407363.049	3169958.39	500
401975.356	3169353.87	350
402337.215	3170027.97	350
403736.197	3168806.76	350
406613.139	3170562.69	450
401242.932	3171099.96	350
399986.720	3168042.94	350
407653.910	3164402.83	450
400622.335	3168992.89	450
407024.850	3165599.84	450
408728.948	3163772.07	450
408223.003	3164062.87	450
404156.166	3170848.53	500
403980.626	3169540.66	500
402165.074	3175430.45	500
401346.088	3174373.02	500
403505.087	3169589.82	350
403171.011	3169803.73	450
399419.327	3171304.82	400
399085.379	3170514.84	400
403178.237	3179526.64	350
402361.191	3179529.77	350
402704.146	3180056.61	350

X COORD UTM	*Y COORD UTM*	*PROFUNDIDAD (m)*
403716.04	3171695.79	500
404273.191	3171843.87	500
405366.452	3170086.13	500
405812.973	3169133.93	500
405374.925	3169423.09	500
406517.21	3165119.75	400
405776.833	3165020.43	400
407494.891	3164180.95	400
407795.439	3170874.61	500
404631.123	3170933.59	500
404052.398	3170179.95	500
404698.087	3168727.16	500
405970.597	3170365.94	500
405766.679	3171067.79	500
407929.490	3172092.90	500
407651.639	3170369.76	500
403108.063	3166534.05	350
403615.03	3168041.38	350
399224.307	3169908.84	350
398595.373	3169892.74	350
402171.036	3171676.94	350
406818.197	3171424.38	500
406197.964	3169774.71	500
400130.866	3175459.40	350
400549.563	3174693.12	350
400704.869	3174032.51	350
401289.031	3177343.97	350
401338.066	3178295.55	350
401374.474	3179070.26	350
400696.197	3177440.73	350
400790.399	3175280.48	350

Longitud (°)	*Latitud (°)*	*PROFUNDIDAD (m)*
28.972000	-106.092417	150
28.823783	-106.034283	200
28.814983	-106.001233	200
28.808400	-105.964083	200
28.792700	-106.010050	200
28.776200	-105.974967	200
28.777583	-105.962167	200
28.783767	-105.935917	200
28.766017	-105.999550	200
28.770483	-105.927317	200
28.745867	-105.989350	200
28.745767	-105.956083	200
28.729667	-105.924283	200
28.719483	-106.010067	350
28.722800	-105.989600	350
28.717800	-105.952883	350
28.702900	-106.009467	400
28.688083	-105.951833	350
28.700233	-105.903733	350
28.735217	-106.009500	350
28.679550	-105.986217	375
28.666467	-105.954833	375
28.655633	-106.011500	375
28.652367	-105.990267	375
28.641100	-105.955617	375
28.638733	-105.946267	450
28.687617	-105.884733	450
28.629833	-106.022800	450
28.616350	-105.973600	450

De acuerdo con la Tabla 17, se observa que la mayor profundidad de perforación en el Acuífero Tabalaopa-Aldama es de 500 m. Existen pozos antiguos ubicados en zonas cercanas a los márgenes del río Chuviscar, con profundidades de perforación de 150 m y 500 m; en promedio, las profundidades de perforación de los pozos son de 380 m.

El análisis del comportamiento de las cargas hidráulicas se realizó utilizando datos de profundidad del nivel del agua subterránea y las elevaciones de los brocales en metros sobre el nivel del mar (msnm), con el fin de construir configuraciones que representen la profundidad, elevación y evolución del nivel del agua en el periodo de 2019 a 2023. Este análisis se llevó a cabo utilizando el software ArcGIS y se comparó con los resultados obtenidos en el estudio realizado en 2021.

En la configuración de la profundidad del nivel del agua para el año 2023 en el ATA (Figura 22), se observan variaciones significativas en diferentes zonas. En la porción sureste, hacia el poniente de la sierra Santa Eulalia, se registran valores máximos de más de 201 m en pozos destinados para uso público urbano. En la zona centro-poniente, hacia el sur de la Sierra Nombre de Dios, las profundidades máximas alcanzan aproximadamente los 18 m. El patrón de profundidades sigue las trayectorias de los arroyos que convergen en el río Chuviscar, donde en el arroyo del Mimbre van desde los 200 hasta los 70 m. Por otro lado, las profundidades mínimas se encuentran hacia el norte del acuífero, en el bosque de Aldama o la boquilla de Aldama, con valores entre 10 y 20 m.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

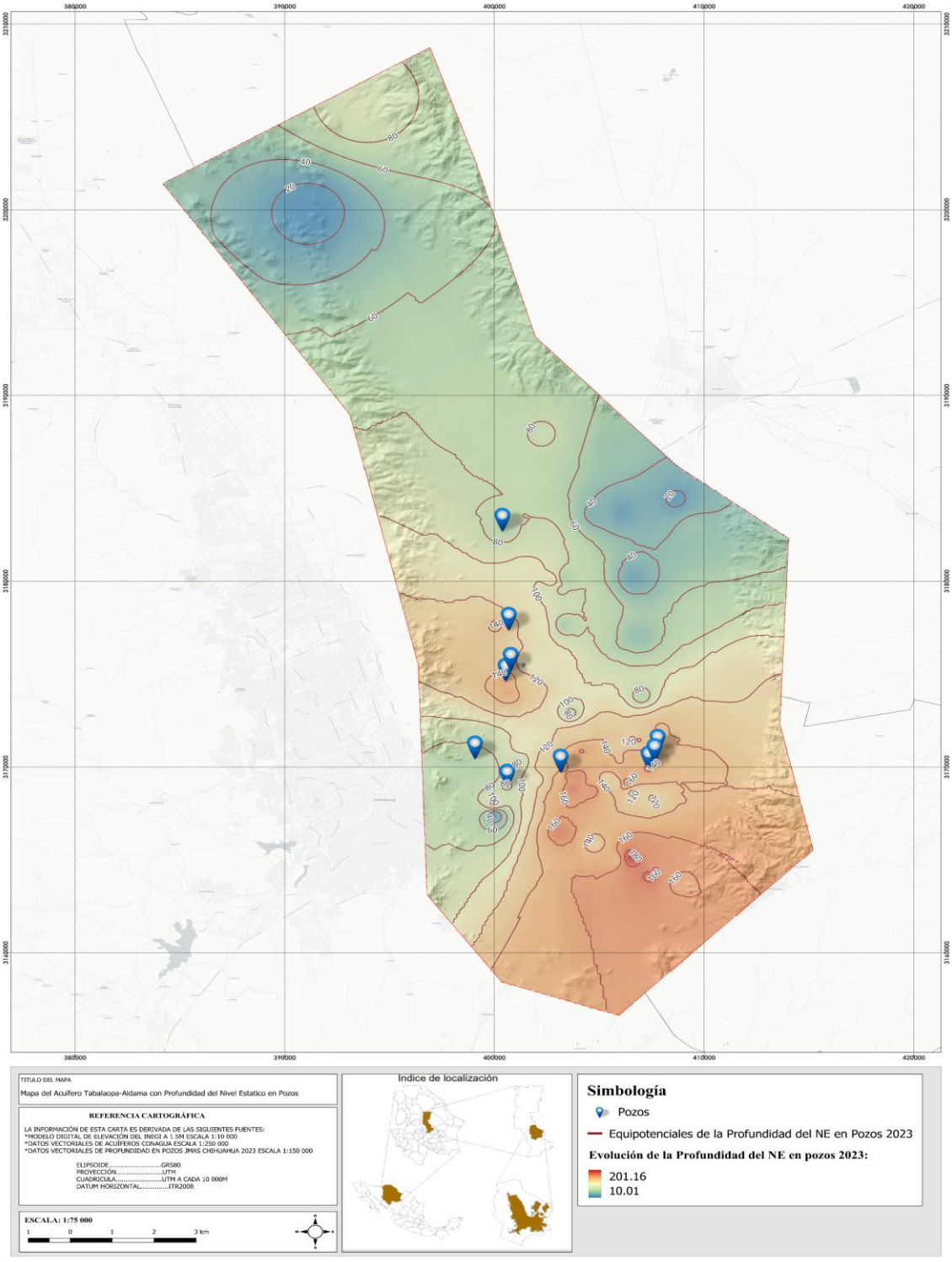


Figura 23. Profundidad del nivel estático para el año 2023 del ATA. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

En general, las profundidades menores se encuentran en la parte central del acuífero, a lo largo del río Chuviscar, y aumentan a medida que nos alejamos de esta zona hacia las sierras Nombre de Dios y San Ignacio. En el área que comprende la parte baja del río Chuviscar y el arroyo Mimbre, hasta el centro del acuífero, se observan zonas con poca profundidad al nivel estático, alrededor de los 20 m. Esta característica puede atribuirse a la saturación o recarga del subálveo debido al caudal que proviene de las aguas residuales de la ciudad.

Así mismo, se puede considerar, que, al entrar en funcionamiento, el nivel desciende en promedio 40 m, con el caudal promedio de explotación nos refiere un caudal especifico de 0.7 l/m, para el 2019 y para el 2023 el descenso de operación promedio es de 56 m, con un caudal especifico de 0.5 l/m. Esto puede deberse a las fluctuaciones de las eficiencias de los equipos de bombeo que en promedio descendió del 57% en el 2019 al 51% para el 2023.

La distribución de los pozos en la red de monitoreo actual proporciona una clara definición de los niveles de cargas hidráulicas en el valle del Acuífero Tabalaopa-Aldama. Se observa la presencia de conos de abatimiento en la parte suroriental de la ciudad de Chihuahua (ver Figura 24). Las curvas de mayor elevación del nivel estático se encuentran en la porción suroccidental del valle, con dirección hacia el sur. El flujo del agua subterránea se dirige hacia el centro del acuífero desde la Sierra Nombre de Dios, ubicada al poniente, y la Sierra San Ignacio, situada al oriente.

La dirección general del flujo del agua subterránea va desde las sierras, como la Sierra Nombre de Dios al poniente del acuífero, hacia la Sierra San Ignacio al oriente y hacia el centro del valle. Se identifican zonas con conos de abatimiento en varias direcciones.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

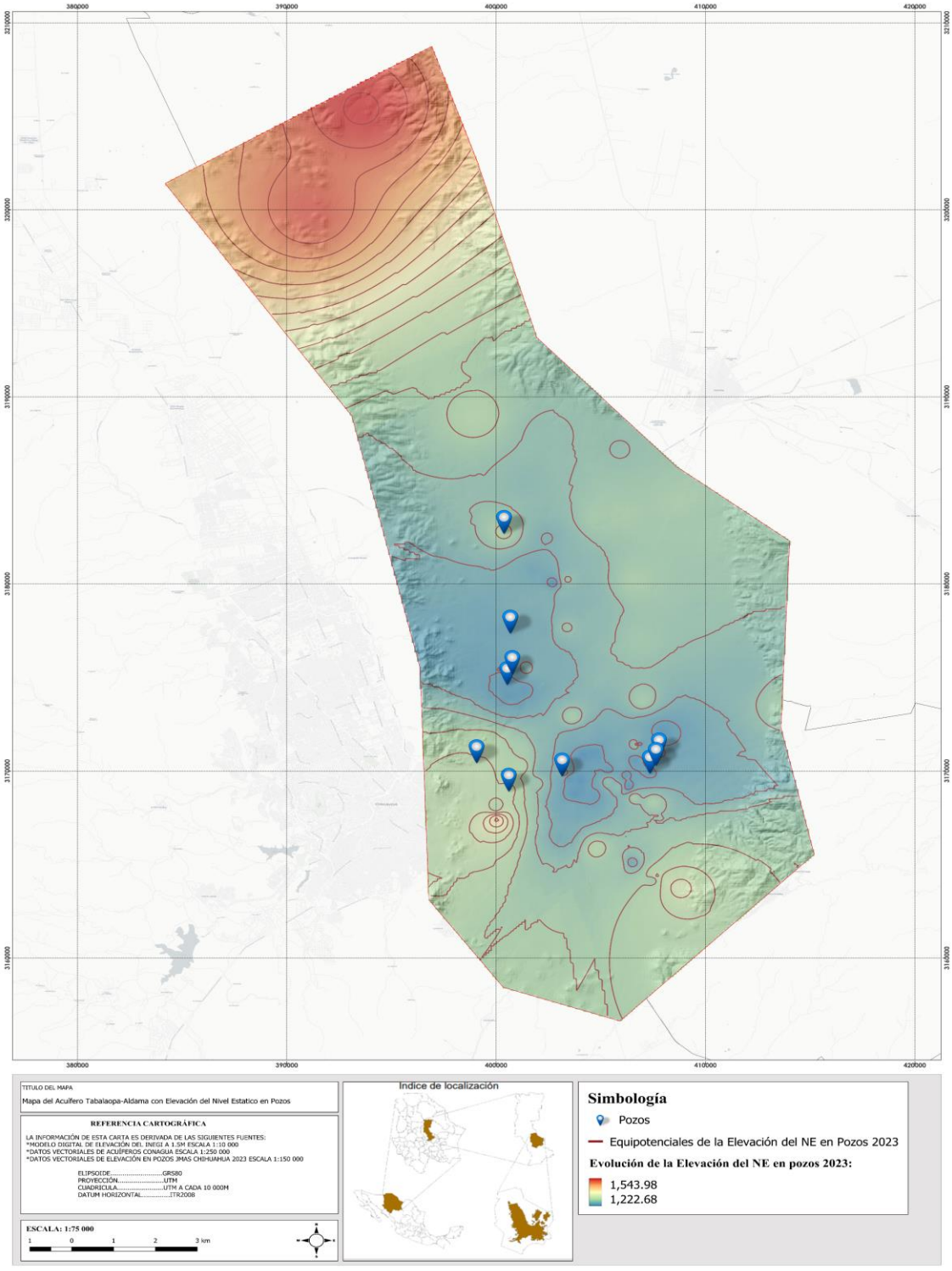


Figura 24. Elevación del nivel estático para el año 2023 del ATA. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

La configuración de la evolución del nivel del agua durante el periodo de 2019 a 2023 ofrece una comparación del comportamiento hidráulico (Figura 25). Esta representación proporciona una visión detallada de las fluctuaciones en el nivel del agua subterránea en el tiempo para el ATA.

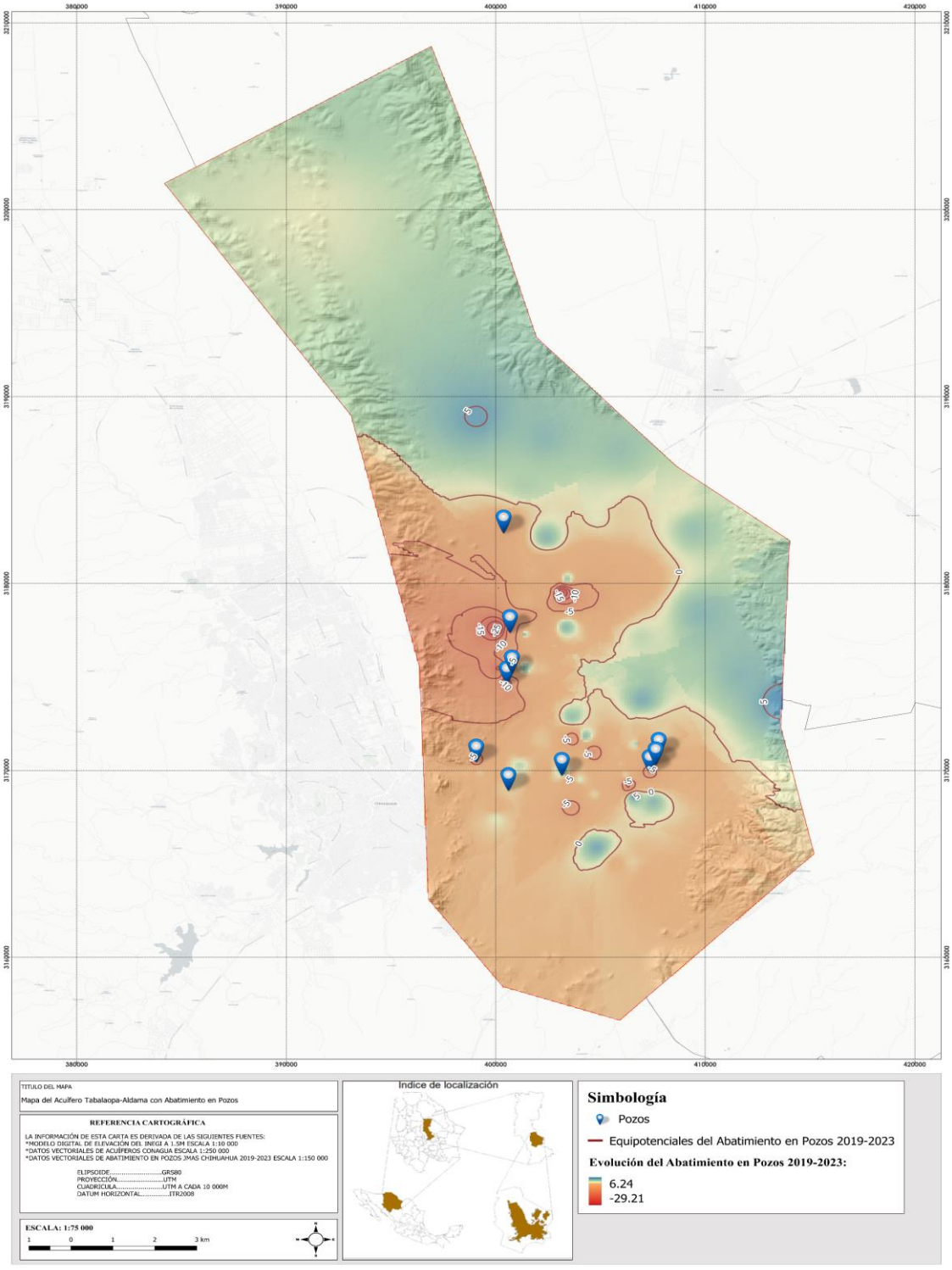


Figura 25. Evolución del nivel estático para el año 2023 del ATA. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

La configuración actualizada muestra que los descensos en los niveles de agua subterránea son más acelerados en algunas zonas, conocidas como conos de abatimiento, mientras que permanecen moderados en el resto del acuífero, en comparación con el periodo anteriormente analizado [75]. En áreas colindantes entre el suroriente de la ciudad de Chihuahua y Aquiles Serdán, se registran los mayores descensos, del orden de -30 m. Se observan descensos promedio alrededor de las márgenes del arroyo el mimbre y del río Chuviscar, que van desde -10 a -2 m, mientras que se define un área extensa con cambios nulos, es decir, una evolución igual a cero.

En este acuífero, los descensos menores se presentan en la porción central, a lo largo del río Chuviscar y sus alrededores, incrementándose a medida que se aleja de esta zona hacia las sierras Nombre de Dios y San Ignacio. En general, el acuífero experimenta un descenso promedio que representa un abatimiento promedio anual de aproximadamente -2.3 m en el periodo analizado de 2019 a 2023.

La Figura 26 relaciona la profundidad del pozo con la profundidad al nivel estático, con el fin de identificar las zonas de tránsito, flujo local y regional. Se verifica que la zona de descarga o sistema de flujo local corresponde a la porción ribereña del río. Los pozos donde se tienen mayores profundidades de perforación están captando el agua del flujo intermedio a regional.

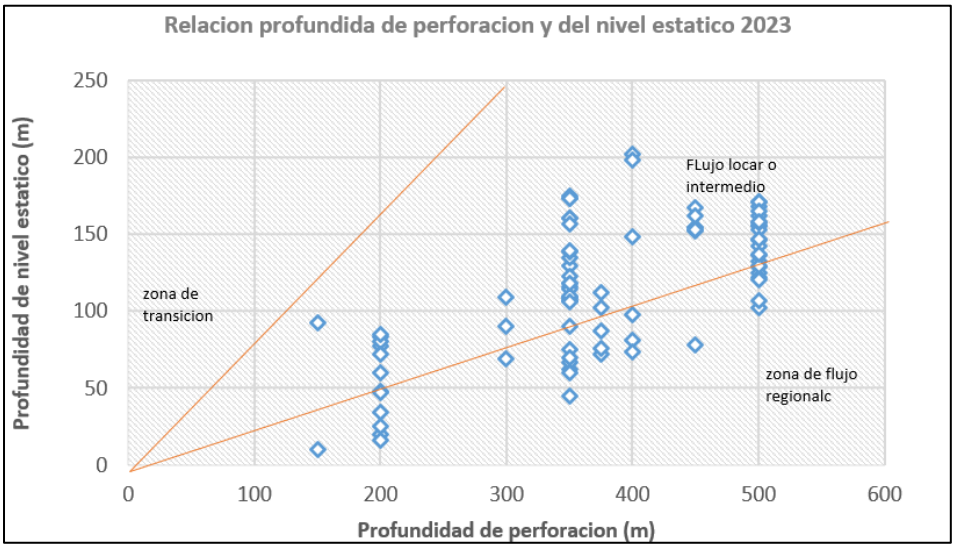


Figura 26. Relación de la profundidad de pozo contra la profundidad del nivel estático ATA. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En relación con los caudales de extracción en el acuífero durante el periodo 2019-2023, se registraron caudales promedio de 27 litros por segundo (lps), con caudales máximos de 70 lps y mínimos de 8 lps. Estos datos son fundamentales para comprender la dinámica de extracción y la disponibilidad de agua en el acuífero durante este periodo.

Hidro geoquímica

La hidro geoquímica del acuífero Tabalaopa-Aldama ha sido objeto de diversos estudios que han investigado la composición química y las características del agua subterránea en esta región. Estos estudios han revelado la presencia de diferentes elementos y compuestos químicos en el agua subterránea, así como su distribución y posibles fuentes de contaminación como se analizó en el **Informe 5. Análisis de riesgo y resiliencia hídrica**.

Según informes de la CONAGUA, se han realizado análisis hidro geoquímicos en varios puntos del acuífero Tabalaopa-Aldama para evaluar la calidad del agua y su idoneidad para diversos usos, como el abastecimiento humano, la agricultura y la industria. Estos análisis han permitido identificar la presencia de minerales disueltos, metales pesados y otros contaminantes en algunas áreas del acuífero, lo que puede afectar su calidad y potencialmente representar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente, lo cual puede revisarse a detalle el **Informe 5. Análisis de riesgo y resiliencia hídrica** y en el **Informe 4. Análisis urbano y rural**.

Además, instituciones académicas como la UACH han llevado a cabo estudios que han profundizado en la comprensión de la hidro geoquímica del acuífero Chihuahua-Sacramento. Estas investigaciones han explorado la relación entre la geología local, las actividades humanas y la calidad del agua subterránea, brindando información crucial para la gestión y protección de este recurso. Uno de los estudios más completos al respecto fue el realizado en 2015, auspiciado por la JMAS [(26).]

Por otro lado, en el año 2022, la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS) junto con la JMAS Chihuahua, JMAS Juárez y la Universidad Autónoma de Chihuahua llevaron a cabo un informe ejecutivo final como parte del convenio para el levantamiento del inventario estatal de fuentes de suministro de agua potable [(60).] Aunque este informe se ha mencionado en informes anteriores de este estudio, cabe destacar que su alcance no abarca el análisis de todos los parámetros de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 [(61)]. Se centra específicamente en la comparación de las concentraciones de fluoruros y arsénico en los aprovechamientos para abasto de agua potable, agrupados por municipio. Debido a estas limitaciones en el muestreo y análisis de la información, no se aborda en la integración de este capítulo para los tres acuíferos que aborda.

Balance hídrico

Dada la complejidad de la integración y análisis de datos e información sin generar estimaciones de caudales de explotación y censos de aprovechamientos dentro de los acuíferos, este tema es un área de actualización urgente. Por esta razón, en todos los capítulos donde se menciona la disponibilidad según lo establece la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 [(62)], se

utilizan los datos oficiales publicados en la plataforma de la CONAGUA para el año 2023 [63] abarcando los tres acuíferos considerados.

En la publicación del 2023 de CONAGUA [63] referente a la actualización de disponibilidad media anual para el ATA. Se resalta que utiliza datos del censo de 2007 los cuales son los siguientes:

- Se cuenta con un total de 344 aprovechamientos de aguas subterráneas, de los cuales 210 corresponden a pozos y 134 a norias.
- El volumen total de extracción estimado asciende a 75.1 hm^3 anuales, de los cuales 34.4 hm^3 (45.8%) se destinan al uso público urbano, 31.3 hm3 (41.7%) para uso agrícola, 8.1 hm3 (10.8%) para usos múltiples y el resto para uso doméstico e industrial.
- Por otro lado, el volumen de extracción de aguas subterráneas reportado por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) [53] es de 76,373,896 m^3 anuales, según datos actualizados hasta el 30 de diciembre de 2022.
- La recarga total media anual del acuífero estimada es de 76.5 hm^3/año, de los cuales 70.2 son recarga natural y los 6.3 restantes corresponden a la recarga por retornos de riego.
- La Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea (DMA) se calcula restando la descarga natural comprometida (DNC) y el volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) al volumen de recarga total media anual (R).
- Para este acuífero, el cálculo resulta en un valor negativo, este resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, se tiene un déficit de -4,173,896 m^3 anuales**.**

En cuanto al análisis del realizado en el REPDA con actualización al 31 de diciembre del 2023, se tiene [53]:

- Se tiene 389 aprovechamientos de aguas subterráneas, con un volumen total autorizado de 164,649,052.82 m^3/año; es decir 89.5 hm^3 adicionales.
- De estos aprovechamientos 217 están registrados para la actividad agrícola con un volumen anual autorizado de 27,830,425.00 m^3, que, en comparación a la publicación de disponibilidad del 2023 se tienen valores similares e incluso tiene un descenso de aproximadamente de 3.5 hm^3.
- 70 aprovechamientos están registrados para uso público urbano con un volumen anual autorizado de 132,636,918.00 m^3, que, en comparación a la publicación de disponibilidad del 2023, se incrementó 100 hm^3 el volumen que se reporta en la publicación.
- Aunque en la publicación no se detalle el uso industrial es importante en este acuífero debido a que representa un volumen de acuerdo con el REPDA de 636,486.00 m^3, a través de 11 aprovechamientos.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

4. Acuífero El Sauz-Encinillas (ASE)

El acuífero El Sauz-Encinillas (ASE), designado con la clave 0807 por la Comisión Nacional del Agua, está situado en la región central del estado de Chihuahua. Sus límites geográficos abarcan los paralelos 28°53'31" a 29°39'41" de latitud norte y los meridianos 106°09'35" a 106°43´27" de longitud oeste, ocupando una extensión de 2,743 km^2. Limita al norte con los acuíferos Laguna de Tarabillas y Flores Magón-Villa Ahumada, al este con Laguna de Hormigas y Laguna El Diablo, al sur con Chihuahua Sacramento y Alto Río San Pedro, y al oeste con Santa Clara y Cuauhtémoc, todos pertenecientes al estado de Chihuahua [76].

El acuífero El Sauz-Encinillas juega un papel crucial en la provisión de agua para la región central del estado de Chihuahua. Su importancia radica en ser una fuente vital de agua subterránea para satisfacer las necesidades domésticas, industriales y agrícolas de la zona. Además, contribuye significativamente a la sustentabilidad ambiental al mantener los ecosistemas locales y respaldar la actividad agrícola

4.1. Modelo Geológico Conceptual

El modelo geológico conceptual del acuífero Sauz-Encinillas se basa en la comprensión de la estratigrafía, la estructura geológica y las propiedades hidrogeológicas que caracterizan este sistema acuífero.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

4.1.1. Geología regional

El acuífero Sauz-Encinillas (ASE) se encuentra ubicado en la región centro-norte del estado de Chihuahua, específicamente en la parte septentrional del municipio de Chihuahua. Esta área está dividida en dos grandes provincias fisiográficas: la provincia de Sierras y Cuencas al oriente, y la provincia de la Sierra Madre Occidental al poniente. El acuífero forma parte de la Sub-provincia del Bolsón de Mapimí en la sección denominada Subsección de Los Bolsones [(76)] (Figura 27).

En esta área, se observan características tanto de la provincia de Sierras y Cuencas como de la Sierra Madre Occidental. Hay presencia de sierras angostas y alargadas con una orientación preferente hacia el noroeste, que se extienden por más de 100 km. Estas sierras contrastan con las llanuras aluviales y los valles paralelos que ocupan la mayor parte del área. Los valles presentan una suave pendiente hacia el oriente y una orientación general norte-sur.

Hacia el oeste, las planicies se estrechan gradualmente hasta encontrarse con los abruptos relieves de la Sierra Madre Occidental. Por otro lado, al oriente del área, las llanuras aluviales se vuelven más extensas, formando bolsones que reflejan un relleno aluvial potente.

La cuenca de la Laguna de Encinillas está rodeada parcialmente por tres rasgos geológicos bien estudiados: el Valle El Sauz-Encinillas, la Sierra de Peña Blanca y el Bloque Caldera-Del Nido.

El acuífero se sitúa en depósitos aluviales del Cuaternario de gravas y arcillas que llenan una fosa tectónica en el Valle de Santa Clara. Está limitado por varios accidentes geográficos, como la Sierra de Providencia, el cordón de Gato, la Sierra de Gallegos al norte, la Sierra de Peña Blanca y la sierra del Cuervo al este, el acuífero Chihuahua-Sacramento al sur, y las sierras de Majalca, El Nido y Papurrín al oeste [(68)].

La geología de la región también abarca la presencia de rocas volcánicas, como tobas, domos y flujos con intercalaciones de ignimbritas de composición riolítica, así como rocas calcáreas cretácicas y sedimentos paleozoicos. Estas formaciones geológicas están atravesadas por fallas y estructuras que afectan su morfología y comportamiento hidrogeológico [(77)] [(45)].

El acuífero está limitado al oeste por una importante unidad montañosa de gran longitud y altitud, conocida como Sierra Majalca-El Nido-Papurrín, con elevaciones máximas de 2700 metros sobre el nivel del mar (msnm) en el cerro La Campana, a la salida del cañón de Santa Clara, y una diferencia de elevación con respecto al valle de aproximadamente 1200 m. El valle intermontano de Santa Clara se encuentra directamente al oeste del valle El Sauz – Encinillas, a una elevación promedio de 2000 msnm. Los cambios bruscos de altitud entre los valles mencionados se deben a la presencia de grandes fallas normales que afectan a la región y que sobresalen en el valle como pilares tectónicos, dando lugar a la sierra Majalca-El Nido-Papurrín como límite occidental del valle, que muestra un frente oriental sumamente escarpado y abrupto. El límite oriental está formado por otro pilar tectónico que conforma la sierra Peña Blanca. Ambas unidades orográficas se

desarrollan en una potente secuencia de tobas e ignimbritas riolíticas dispuestas en forma aproximadamente horizontal; por ello, el relieve en su mayor parte es escalonado debido a la erosión diferencial. Sin embargo, en algunos lugares, como en la sierra El Sauz, el relieve se desarrolla sobre rocas calcáreas cretácicas [44] [77] [45].

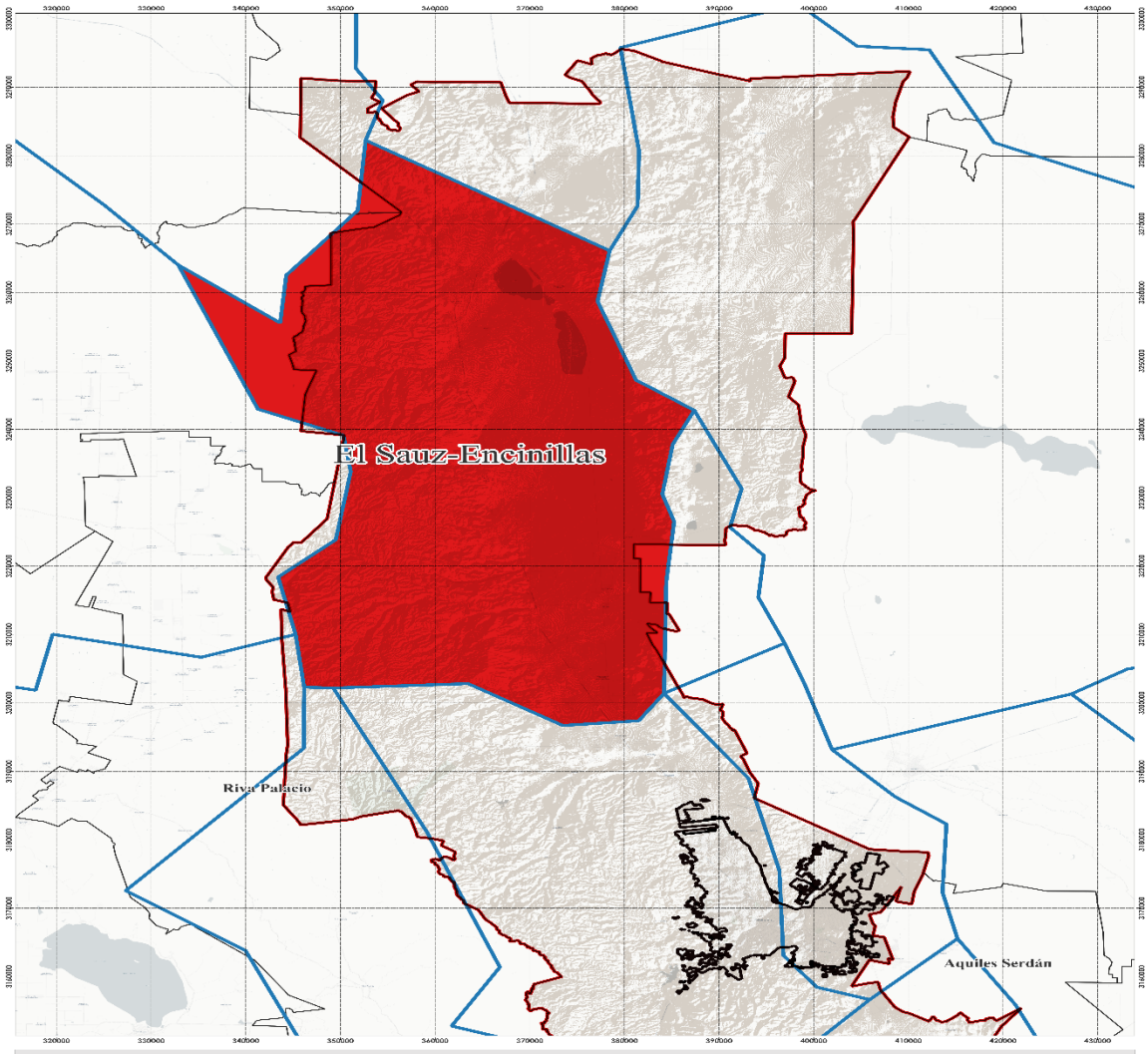


Figura 27. Mapa del acuífero El Sauz - Encinillas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI [23] y CONAGUA [24].

4.1.2. Estructura geológica

El acuífero El Sauz-Encinillas se caracteriza por una compleja estructura geológica influenciada por una serie de eventos tectónicos y volcanotectónicos a lo largo de su historia. Estos eventos han dado forma a la estructura geológica del acuífero de la siguiente manera [68] [45]:

Durante el Cretácico y el Paleógeno, se produjeron eventos tectónicos compresivos conocidos como el período Laramídico, que causaron el levantamiento y el plegamiento de la secuencia sedimentaria preexistente. Estos eventos generaron cabalgamientos y fallamientos de tipo inverso, lo que contribuyó a la formación de la estructura geológica actual del acuífero.

Posteriormente, durante el Oligoceno-Mioceno, se produjo un evento de distensión tectónica importante, que causó un basculamiento notable de la sección volcánica a través de un sistema de fallas normales de amplia distribución y extensión. Estos eventos de distensión tectónica jugaron un papel crucial en la configuración actual del acuífero.

Como resultado de estos eventos tectónicos, se formaron fosas y pilares tectónicos que constituyen las estructuras dominantes en el acuífero. Estas estructuras están marcadas por rasgos geomorfo estructurales de rumbo NNO-SSE, expresados como fallas normales y fracturas. Las montañas circundantes, compuestas principalmente por rocas terciarias ígneas, como riolitas, andesitas y basaltos, destacan por su elevación y forman bloques tectónicos levantados.

La cuenca donde se ubica el acuífero se caracteriza por la presencia de pilares tectónicos de alineación preferencial NNO, separados por amplias fosas de relleno (bolsones). Estas fosas tienen fuertes espesores de material de relleno, lo que facilita el almacenamiento de volúmenes considerables de agua. En resumen, estos eventos han afectado significativamente el comportamiento hidrogeológico del ASE y la distribución del agua subterránea en la región.

4.1.3. Estratigrafía

El registro estratigráfico de la región abarca desde el Mesozoico hasta el Cuaternario, con una variedad de formaciones que revelan la evolución geológica a lo largo del tiempo. Comenzando con el Cretácico, se encuentran unidades como la Formación Aurora, compuesta principalmente por calizas marinas afectadas localmente por intrusivos graníticos y pórfidos riolíticos. Esta formación es característica de la región y se encuentra en la sierra El Sauz y otras localidades como Punta de Agua [16] [76].

En el Cenozoico, destacan las rocas volcánicas como las riolitas y andesitas, presentes en diferentes áreas como la Sierra de Sacramento y el Cañón de Santa Clara. Estas rocas muestran una variedad de texturas y colores, y se han datado en diferentes períodos desde el Paleoceno hasta el Oligoceno.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

El Cuaternario está marcado por formaciones como el Conglomerado Polimíctico, que constituye la base de muchas sierras y cerros en la región, y el Aluvión Lacustre, que se encuentra en lechos de ríos y áreas bajas de cultivo. Además, se mencionan formaciones intrusivas y metamórficas como el Granito, la Cuarzomonzonita y el Pórfido Riolítico, que afectan a rocas sedimentarias de diferentes edades.

La región presenta una compleja historia geológica que incluye eventos volcánicos, sedimentarios e intrusivos a lo largo de millones de años, evidenciados por una variedad de formaciones litológicas y estructurales. Las edades y características de estas unidades se han determinado mediante técnicas de datación radiométrica y correlaciones estratigráficas.

A continuación, se resume las características de cada formación estratigráfica que se encuentra en el ASE [67,68]:

La Formación Aurora, consiste principalmente calizas marinas con intercalaciones de arcillas. Aflora principalmente en la sierra El Sauz y en Punta de Agua, dentro del acuífero El Sauz - Encinillas, en el estado de Chihuahua. Presenta afectación local por intrusiones graníticas y pórfidos riolíticos, con evidencia de metamorfismo de contacto como la marmorización de las calizas.

La Formación Glen Rose, se compone mayormente wackestone a packstone con intercalaciones de mudstone arcilloso. Se encuentra en ambientes neríticos internos en facies arrecifales y está presente en diferentes puntos del acuífero, contribuyendo a la litología de la región de Chihuahua. Se formó en ambientes marinos poco profundos con alta energía, típicos de arrecifes.

La Formación Walnut, está compuesto por calizas arcillosas y margas en estratos delgados y laminares depositado en ambientes neríticos inestables internos y medios. Se encuentra en la región del acuífero, especialmente asociada con la Formación Edwards y otras unidades del Cretácico Inferior. Sus estratos delgados sugieren una deposición en un entorno marino inestable.

La Formación Finlay, se caracteriza por ser calizas grises en estratos masivos. Se deposita en ambientes someros con alta energía sobre una plataforma somera durante una etapa regresiva. Aflora en el ASE, contribuyendo a la secuencia estratigráfica de la región.

La Formación Sacramento, es un conglomerado de fragmentos de rocas calcáreas depositado en facies continentales, probablemente relacionadas con ambientes fluviales. Forma parte de la secuencia estratigráfica del ASE, contribuyendo a la litología del área y sugiriendo procesos erosivos y sedimentarios continentales en la región. Los conglomerados están compuestos por fragmentos de rocas preexistentes del Albiano inferior-medio, indicando procesos erosivos y sedimentarios continentales.

La presencia y distribución de cada formación dentro del ASE, ayuda a comprender la geología y la hidrogeología del acuífero.

4.1.4. Geología estructural

Al considerar de manera regional las estructuras observadas en el ASE, destaca el importante efecto de los eventos tectónicos ocurridos a fines del Cretácico y principios del Paleógeno, durante el período compresivo Laramídica. Estos eventos generaron levantamientos y pliegues en la secuencia sedimentaria preexistente, provocando cabalgamientos y fallamientos de tipo inverso. Posteriormente, durante el Oligoceno-Mioceno, se produjo un evento de distensión tectónica significativo, que causó un basculamiento notable de la sección volcánica a través de un sistema de fallas normales de amplia distribución y extensión. Estas fallas y basculamientos dieron lugar a la formación de fosas y pilares tectónicos, que son las estructuras dominantes en el acuífero [(39) (40)].

La estructura geológica del ASE refleja una complejidad influenciada por eventos tectónicos y volcanotectónicos que han dejado una huella distintiva en la región. Estos eventos han dado forma a diversas características geomorfológicas y estructurales que son relevantes para su comportamiento hidrogeológico y la distribución del agua subterránea en la zona [(40)].

El acuífero se localiza en una cuenca superficial endorreica de forma irregular, con un control estructural extensional típico de la provincia fisiográfica de Sierras y Cuencas. Rodeado por montañas compuestas por rocas terciarias ígneas, principalmente de composición riolítica, así como rocas sedimentarias cretácicas en la porción este y calizas en la porción sur [(41) (42) (76)].

La fosa tectónica se caracteriza por la presencia de pilares tectónicos de alineación preferencial NNO, separados por amplias fosas de relleno (bolsones), con fuertes espesores de material de relleno que facilitan el almacenamiento de volúmenes de agua considerables.

En resumen, la estructura geológica del acuífero El Sauz-Encinillas es el resultado de una serie de eventos tectónicos que han generado una variedad de características geomorfológicas y estructurales que influyen en su comportamiento hidrogeológico y en la distribución del agua subterránea en la región.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

4.1.5. Geología del subsuelo

El ASE se ubica en el centro del estado de Chihuahua, abarcando parcialmente los municipios de Chihuahua y Namiquipa, y en menor medida los municipios de Aldama y Buenaventura (Figura 28). Geológicamente, presenta una variedad de suelos de origen aluvial, residual, arcilloso y volcánico, así como rocas sedimentarias. Su rumbo predominante es NNO-SSE y se encuentra en la zona de transición con la provincia de la Sierra Madre Occidental. Limita con varias sierras, como El Oso, El Nido, La Tinaja Lisa, Rusia, Victorino y Calosa [(40) (42)].

Para la interpretación de la geología del subsuelo, se consideraron los resultados de los sondeos electromagnéticos realizados como parte del estudio llevado a cabo en el año 2009 [(76)], además de la información geológica de campo y de cortes litológicos obtenidos tanto en este acuífero como en los adyacentes que se encuentran en un ambiente geológico similar a nivel regional.

De manera general, se establece que el acuífero se emplaza en una cuenca tectónica, con un espesor de hasta 800 m en el centro del valle, compuesto por sedimentos clásticos aluviales de granulometría variable, resultado de diferentes facies sedimentarias fluviales y lacustres desarrolladas durante la evolución del relleno sedimentario del valle. Este relleno disminuye en espesor hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero.

El espesor del relleno constituye la unidad actualmente explotada, pero existen pozos que han perforado las rocas volcánicas fracturadas, aún no exploradas. El basamento y las fronteras al flujo subterráneo del acuífero están formados por ignimbritas de composición riolítica compacta y una secuencia volcánica predominantemente andesítica. Estas unidades suelen presentar baja permeabilidad en el subsuelo, pero cuando están fracturadas, constituyen zonas de recarga en superficie, ya que forman las sierras que limitan el valle [(45).]

A mayor profundidad, las rocas calizas cretácicas conforman el basamento regional y presentan buena permeabilidad, lo que se evidencia en trabajos de minería donde causan la inundación de las obras.

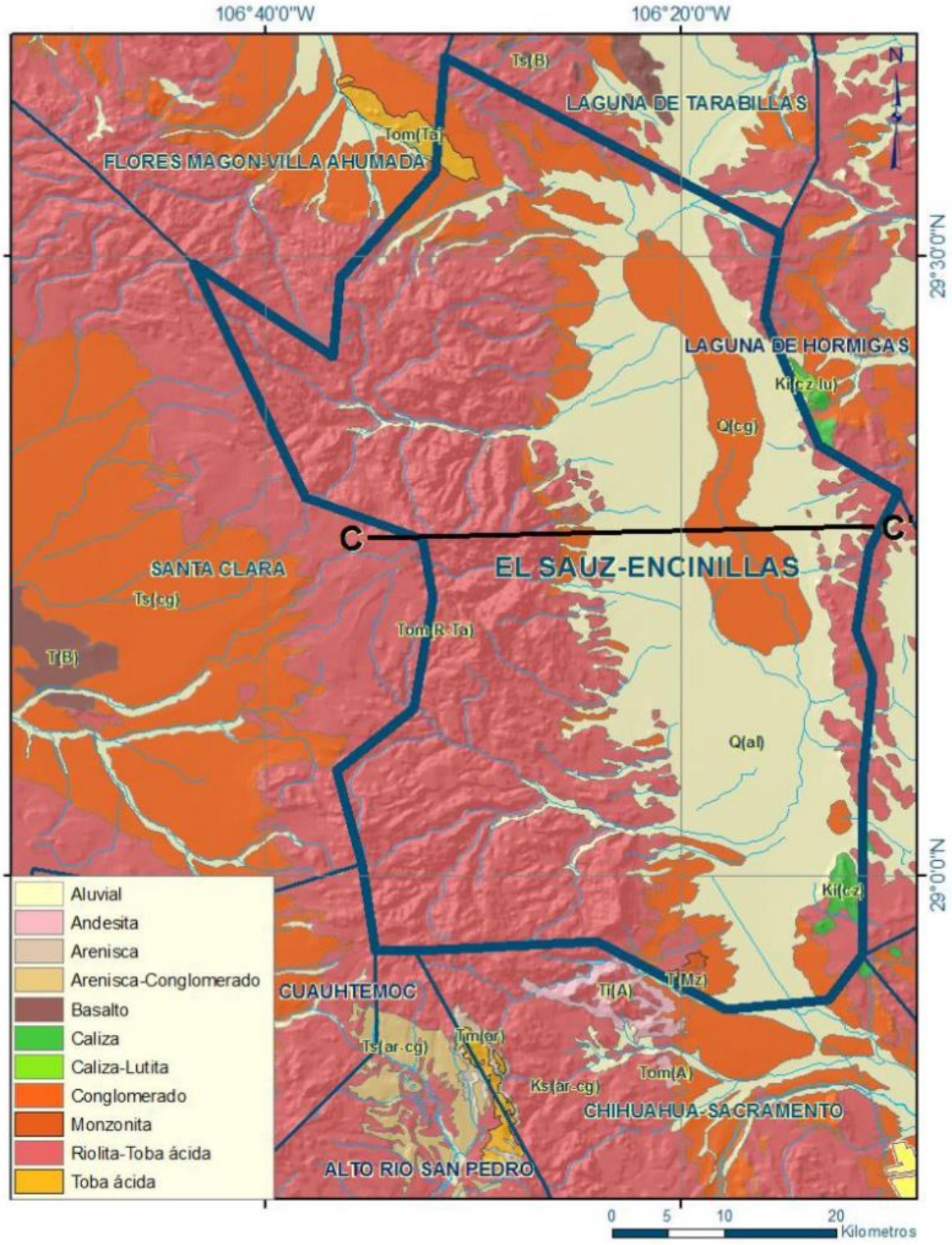


Figura 28. Geología general del acuífero El Sauz-Encinillas. Fuente: CONAGUA (2023) [76].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua | Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820 | https://implanchihuahua.org/

4.1.6. Geofísica

El estudio geofísico en el acuífero El Sauz - Encinillas, ha sido abordado como en los otros acuíferos, de forma dispersa y no existe una base estructurada que apoye cada vez más el conocimiento del subsuelo del ASE, en este caso el estudio realizado de evaluación de fuentes por la UACH, es el estudio público más actualizado, ya que genero nuevos datos y reinterpreto lo existente para realizar los perfiles geoeléctricos; la técnica utilizada son los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) [(26)].

La Tabla 18 presenta una reinterpretación de los perfiles generada en el estudio evaluación de fuentes actuales y de fuentes alternas [(26)] utilizando datos de campo obtenidos mediante el arreglo Schlumberger.

Tabla 18. Resumen de los resultados del estudio geofísico en el ASE. Fuente: estudio evaluación de fuentes actuales y de fuentes alternas [(26)].

UNIDAD	ρ_a (Ω-m)	DESCRIPCION BREVE	POSIBLE PERMEABILIDAD
1	1-20	Material fino de naturaleza arcillosa de posible origen lacustre.	Baja
2	20-50	Material aluvial con granulometría fina a media (limos a arenas).	Mediana
3	50-500	Material de origen coluvial. Presencia de boleos y gravas en matriz limo-arenosa.	Mediana-alta
4	200-1000	Rocas alteradas o fracturadas, posible conglomerado basal.	Dependiente de condiciones estructurales.
5	>1000	Rocas cristalinas inalteradas.	Nula

4.2. Factores Externos que Impactan el ASE

El ASE es un sistema de almacenamiento de agua subterránea de gran importancia para la región, ya que abastece de agua a diversas actividades como la agricultura y el consumo humano, los principales factores externos que lo impactan son:

Cambio climático: puede afectar la disponibilidad de agua en la región, lo que impacta negativamente en el acuífero. La disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura podrían reducir la recarga del acuífero y aumentar la evaporación.

Deforestación: La tala de árboles en las zonas de recarga del acuífero puede reducir la infiltración de agua y aumentar la erosión del suelo, lo que a su vez puede afectar la calidad del agua.

Expansión urbana: El crecimiento de las ciudades y pueblos en la zona del acuífero puede aumentar la demanda de agua y la generación de aguas residuales, lo que puede impactar negativamente en la calidad y cantidad del agua del acuífero.

Contaminación: El uso de pesticidas, fertilizantes y otros productos químicos en la agricultura, así como la descarga de aguas residuales sin tratamiento, pueden contaminar el agua del acuífero.

Estos factores externos pueden tener impactos significativos en la gestión y la sustentabilidad del acuífero El Sauz Encinillas, destacando la importancia de un enfoque integrado y sostenible para su manejo.

4.2.1. Cambio climático

En el informe **1. Análisis del medio natural**, se abordó de forma breve y general para la condición de los principales parámetros que son indicadores del clima y de lo que se ha denominado variabilidad o cambio climático, además de esto en el informe **5. Análisis de riesgos y resiliencia hídrica**, se realizó el análisis de causas y consecuencias del cambio climático en el Municipio de Chihuahua. A continuación, se hizo una integración de la información de los estudios realizados en el ASE, basándose en la disponibilidad de CONAGUA del 2023 [(76)] y de Evaluación de fuentes del 2015 [(26)].

En el ASE se pueden identificar los siguientes tipos de climas:

BWkw(w) - Muy seco templado: Este clima se encuentra en una pequeña parte al este del acuífero. Es un clima muy seco y desértico, con veranos cálidos y una temperatura media anual entre 12 y 18°C. El régimen de lluvias de verano es al menos diez veces mayor que en el mes más seco del año, y la precipitación invernal es menor al 5% de la anual.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

BS0kw - Seco templado: Presente en la zona norte y parte central del área del acuífero, es el clima estepario más seco. También cuenta con veranos cálidos y una temperatura media anual entre 12 y 18°C. El porcentaje de precipitación invernal oscila entre el 5 y 10.2% del total anual.

BS0kw(w) - Seco templado: Se encuentra en la porción sureste del acuífero. Es similar al anterior, pero con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal inferior al 5%.

BS1kw - Semiseco semifrío: Ocupa una franja central de norte a sur en el acuífero. Es menos seco que los anteriores, con veranos cálidos y una temperatura media anual entre 12 y 18°C. Presenta precipitaciones invernales y un porcentaje entre el 5 y 10.2% del total anual.

C(w1) - Templado subhúmedo: Este clima se encuentra en la parte oeste de la zona y es intermedio en cuanto a humedad. La temperatura media anual varía entre 18 y 22°C, con un régimen de lluvias de verano significativamente mayor que en el mes más seco del año.

C(E)(w1) - Semifrío subhúmedo: Ubicado en zonas de la parte oeste del acuífero, este clima presenta una humedad media. Al igual que el anterior, tiene un régimen de lluvias de verano mayor al mes más seco del año, con un porcentaje de precipitación invernal entre el 5 y 10.2%.

4.2.2. Precipitación

En este sentido, podría compararse de manera similar a la situación de los acuíferos ACHS y ATA; no obstante, en el caso de este acuífero, no se dispone de puntos de observación. Según los resultados de los estudios, la precipitación media anual en el acuífero El Sauz-Encinillas se estima en 474 mm.

4.2.3. Temperatura

En este contexto, se presupone un comportamiento análogo al observado en los otros dos acuíferos, dado que no se disponen de estaciones para una comparación actualizada. Es importante destacar que, en los otros acuíferos, se registraba históricamente una temperatura media anual de 16.1°C, mientras que en el caso del acuífero El Sauz-Encinillas (ASE), los estudios históricos arrojaron una temperatura media anual de 14.8°C, con una variación estacional más marcada durante los meses de mayo a septiembre.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

4.2.4. Hidrografía

Este apartado será abordado con mayor detalle en el **Informe 9. Análisis de Aguas Superficiales**. El acuífero El Sauz-Encinillas se encuentra en la Región Hidrológica 34 "Cuencas Cerradas del Norte", específicamente en la subcuenca Laguna de Encinillas, perteneciente a la cuenca Arroyo El Carrizo y otros [(76)] (Figura 29). Esta región presenta características geográficas que influyen en la hidrología superficial y subterránea del área.

El área del acuífero se distingue por ser una cuenca hidrográfica de forma alargada, con un eje principal de orientación norte-sur. Predomina un tipo de cuenca endorreica, donde la laguna de Encinillas en el norte y centro de la zona es el principal cuerpo de agua. Esta laguna tiene una zona de inundación que ocasionalmente se extiende varios kilómetros hacia el sur de su límite normal [(76)].

Aunque no hay corrientes fluviales importantes en el área, se identifican dos corrientes de cierta relevancia: el Cañón de Santa Clara y el Cañón de Bellavista, mientras que otras corrientes son intermitentes y solo llevan agua durante la temporada de lluvias.

La cuenca hidrográfica se caracteriza por una pendiente media en la parte alta y baja. El sistema orográfico de la región forma subcuencas cerradas que dan origen a cuerpos de agua tipo lacustre aluvial, aunque en un estado avanzado de azolvamiento y extinción [(76)].

La hidrología superficial está dominada por la laguna de Encinillas, que recibe la mayor parte de los escurrimientos generados en su cuenca. Entre los principales arroyos que la alimentan se encuentran El Sauz, el Papurrín, La Campana, Los Prietos-Santa Clara y Las Playas. Estos arroyos recorren distancias variables desde sus nacimientos hasta su desembocadura en la laguna, aportando agua significativa a la misma.

Los arroyos y la laguna de Encinillas son características importantes del acuífero, distribuyéndose en varias partes de la región. Los arroyos como El Sauz, el Papurrín, La Campana, Los Prietos – Santa Clara y Las Playas se extienden desde diferentes puntos hacia la laguna de Encinillas.

El uso del agua superficial en la cuenca es limitado, principalmente para riego agrícola en áreas cercanas a localidades como Nuevo Delicias [(76)].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

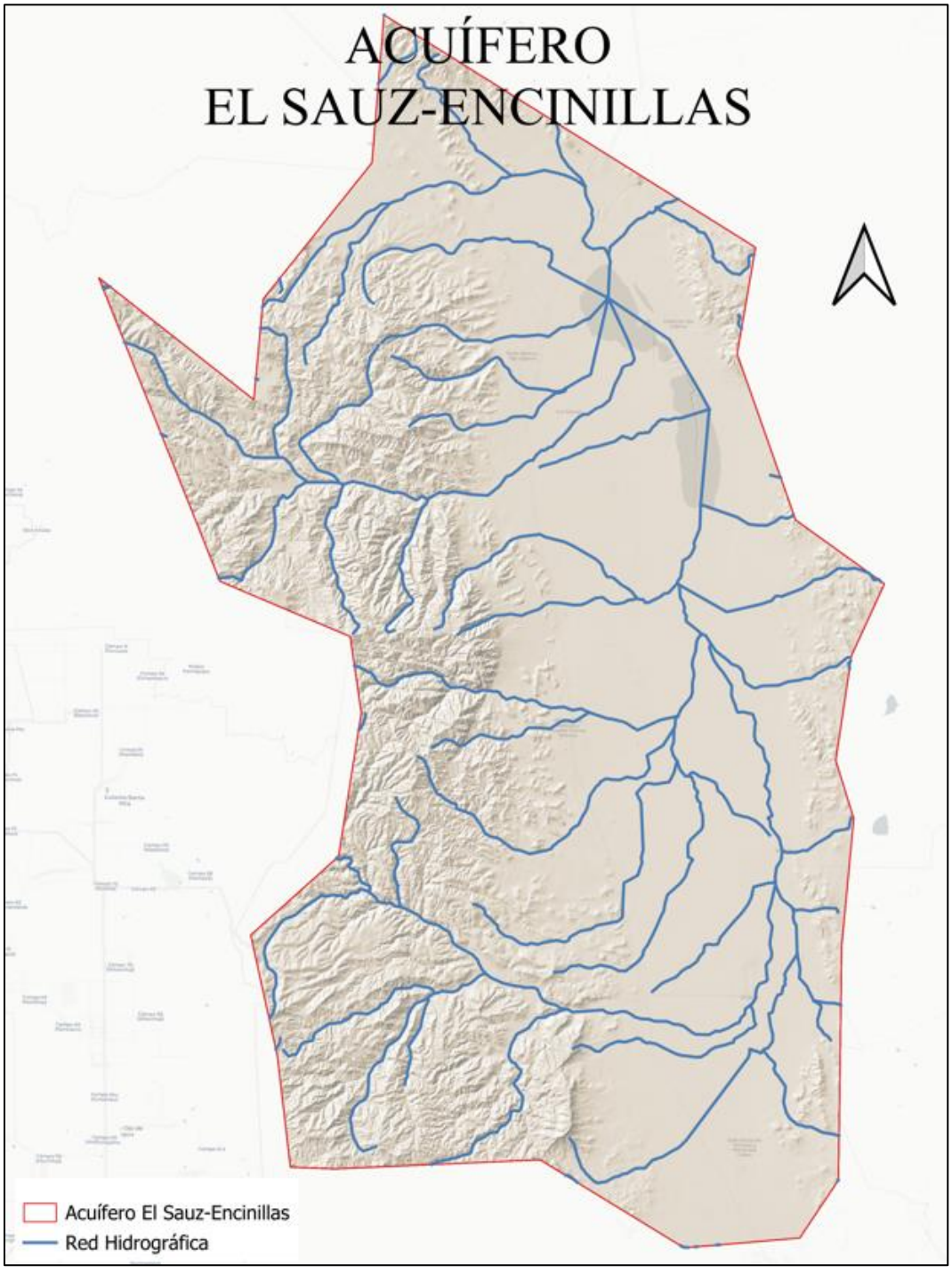


Figura 29. Hidrografía dentro del acuífero El Sauz-Encinillas (ASE). Fuente: Elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

4.2.5. Vegetación

La distribución de las coberturas de vegetación en el acuífero El Sauz-Encinillas muestra una variedad de tipos de vegetación a lo largo de la región. Entre ellos se encuentran los bosques, que se localizan en áreas específicas del acuífero, principalmente en su sección oeste y en las partes altas de las montañas. Los bosques de Pino-Encino se encuentran en los límites altitudinales superiores, mientras que los de Encino-Pino se ubican en los límites altitudinales inferiores, especialmente en la sección oeste [(23) (72)].

En menor proporción que los bosques primarios, se presentan los bosques secundarios, generalmente en la fracción sureste del ASE. Los cultivos, por su parte, se encuentran principalmente en el valle, al sur y alrededor de las localidades urbanas, extendiéndose hacia el norte en menor medida, prácticamente hasta llegar a la laguna de Encinillas.

El matorral se ubica en los alrededores de la laguna de Encinillas, extendiéndose hacia el límite sur por el extremo este de la zona. El matorral secundario presenta una distribución más limitada que el matorral, localizándose principalmente en la fracción sureste del acuífero. Los pastizales, por otro lado, se extienden desde la laguna de Encinillas hasta las zonas de cultivo en el sur del acuífero, predominando en la franja central [(51)].

Además de estas coberturas principales, existen otras coberturas de vegetación distribuidas en varias partes de la región, incluyendo áreas con agricultura de riego o temporal, bosques de transición y áreas sin vegetación debido a la intervención humana. Es importante destacar que la cobertura de vegetación nativa ha sido modificada principalmente donde se encuentran las comunidades más grandes en el sureste del acuífero, incluyendo la localidad del Sauz y otras áreas urbanas cercanas.

4.2.6. Edafología

En el **Informe 1: Análisis del Medio Natural se describen las características físicas del municipio de Chihuahua**. En la zona del ASE se encuentran diversas unidades de suelos y subunidades, las cuales se describen a continuación [52) (73) (76)]:

El Feozem, caracterizado por su tierra parda con una capa superficial obscura rica en materia orgánica y nutrientes. Este tipo de suelo se localiza en la porción centro-norte del acuífero, formando el abanico aluvial del cañón de Santa Clara.

El Fluvisol, por otro lado, es un suelo de río poco desarrollado, presente en los cauces de arroyos principales, ubicándose en la franja central del acuífero, cercano a los cauces de los arroyos.

El Litosol, es comúnmente encontrado en la porción centro-occidental y en el extremo oriental del acuífero, caracterizado por su suelo de piedra con una profundidad menor a 10 cm.

El Regosol, es un suelo poco desarrollado de color claro y pobre en materia orgánica, distribuido alrededor del valle y hacia el oeste del acuífero.

El Solonchak, suelos salinos con alto contenido de sales ubicados en la parte centro-norte del valle, al sur de la Laguna de Encinillas.

El Vertisol, es un suelo húmedo y expansible con alto contenido de arcillas presente en el extremo oriental del acuífero.

El Xerosol, es un suelo seco característico de zonas áridas y semiáridas, concentrándose hacia los extremos sur y norte del acuífero.

El Yermosol, se caracteriza por ser un suelo desolado presente en zonas áridas, con capas de cal, yeso y sales en la superficie o subsuelo, localizado en una pequeña porción al norte del acuífero.

Las subunidades de suelo, como el Háplico, Eútrieo, Calcárico, Órtico, Pélico, Álbico y Lúvico, ofrecen una clasificación más detallada de las características de los suelos, lo que contribuye a una comprensión más completa de la distribución y naturaleza de los suelos en el Acuífero El Sauz-Encinillas [52) (73) (76).

4.3. Hidrogeología

El ASE exhibe una naturaleza heterogénea y anisótropa, mayormente de tipo libre, aunque con condiciones de semiconfinamiento a nivel local debido a la interdigitación de estratos de baja permeabilidad. Este sistema está encajado en una fosa tectónica (graben) que se encuentra rellenada por sedimentos de diversas granulometrías. Los depósitos aluviales alcanzan un espesor máximo de hasta 800 m y disminuyen hacia las laderas de las sierras circundantes, donde se observan los abanicos aluviales [(76)].

En profundidades mayores, las rocas volcánicas y calizas muestran una permeabilidad secundaria causada por fracturamiento, representando otra unidad que aún no ha sido completamente explorada. Sin embargo, existen evidencias de su presencia en trabajos mineros realizados principalmente en acuíferos adyacentes a continuación se engloban y resumen. La principal fuente de recarga es el agua de lluvia, tanto la que se infiltra en las zonas altas como la que se precipita directamente en el valle y los retornos de riego agrícola. La litología, estratigrafía y estructura geológica influyen en la naturaleza, distribución y movimiento del agua subterránea. Según el estudio elaborado en el 2015 [(26)] se podría clasificar el sistema del ASE como se observa en la Tabla 19.

Tabla 19. Resumen de unidades hidrogeológicas en el acuífero El Sauz-Encinillas. Fuente: Estudio de evaluación de fuentes, JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH,2015 [(26)].

El Sauz-Encinillas				
UNIDAD HIDROESTRATIGRÁFICA	**MEDIO POROSO**	**FORMACIONES GEOLÓGICAS**	**GRADO DE PERMEABILIDAD**	***RANGO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/d)**
UH 1	Fracturado	KiCz, KaCz	Media a alta	$1x10^{-2}$
UH 2	Fracturado	Ks-A, TeR, TeA y TeA-B	Media a baja	$1x10^{-4}$ a $1x10^{-7}$
UH 3	Fracturado	ToTR-lg, TeTR-lg y TGr	Baja	$1x10^{-7}$
UH 4	Fracturado y Granular	ToB y TmCgp	Media	10 a $1x10^{-3}$
UH 5	Granular	Qal y QCgp	Media a elevada	5.47 a 302.4
*Valores de referencia tomados de MODFLOW y Anderson (1992).				

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

4.3.1 Parámetros hidráulicos del sistema

Utilizando la información oficial publicada por CONAGUA [76] se determinó que la transmisividad del acuífero El Sauz-Encinillas varía en un rango de 24 a 455 m²/día, equivalente a 0.3 a 5.3 x 10^{-3} m²/s, con un promedio de 191 m²/día o 2.2 x 10^{-3} m²/s. Estos valores se obtuvieron considerando un espesor saturado de 170 m, lo que resulta en una conductividad hidráulica promedio de 1.1 m/día, o 1.3 x 10^{-5} m/s.

En cuanto al coeficiente de almacenamiento (S), se ha determinado que, para la zona central del valle, el valor promedio es de 7.1 x 10^{-4}. Además, los valores de rendimiento específico (Sy) en esta región varían entre 0.06 y 0.21. Estos datos son fundamentales para comprender la capacidad del acuífero para almacenar y transmitir agua.

4.3.2 Censo de aprovechamientos

En el ASE se han realizado diversos censos de aprovechamientos, siendo el último llevado a cabo en 2009, al cual hace referencia la publicación de disponibilidad de CONAGUA en 2023 [76]. En 2022, la UACH, por encargo de JCAS, realizó un inventario que se centró únicamente en los aprovechamientos para uso público urbano, aunque no logró contabilizar todos los existentes [60]. Hasta la fecha, no se ha publicado un censo oficial más reciente, por lo que se utilizará la información disponible en las plataformas de CONAGUA.

Según el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) [53] hasta el 31 de diciembre de 2023 se tienen registrados 516 aprovechamientos de agua subterránea con un volumen autorizado de 201,973,291.14 m^3/anuales. De estos, 129 corresponden a aprovechamientos identificados como folios 8 (Tabla 20); estos son los aprovechamientos que no cuentan con una asignación o título de concesión, ya que se encuentran en lo que anteriormente se denominaba "zona de libre alumbramiento".

Tabla 20. Resumen de aprovechamientos con folio 8 registrados en el ASE. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA [(53)].

FOLIOS 8		
Uso	**No. Aprovechamientos**	**Volumen (m^3/año)**
AGRICOLA	116	20,957,790.7
INDUSTRIAL	0	
PUBLICO URBANO	1	30,000
DOMESTICO	2	1,941
SERVICIOS	1	20,000
OTROS	9	513,156
Total	**129**	**21,522,887.74**

En el ASE, el volumen autorizado para la extracción de agua destinado al uso público urbano representa el 67% del total del volumen de agua subterránea disponible. Este volumen autorizado específico para uso urbano asciende a 134,420,240 m^3. Por otro lado, el uso agrícola ha experimentado un notable aumento en la autorización de extracción, alcanzando un volumen de 61,231,220.1 m^3, según los registros del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), específicamente con los folios 8 (Figura 30).

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

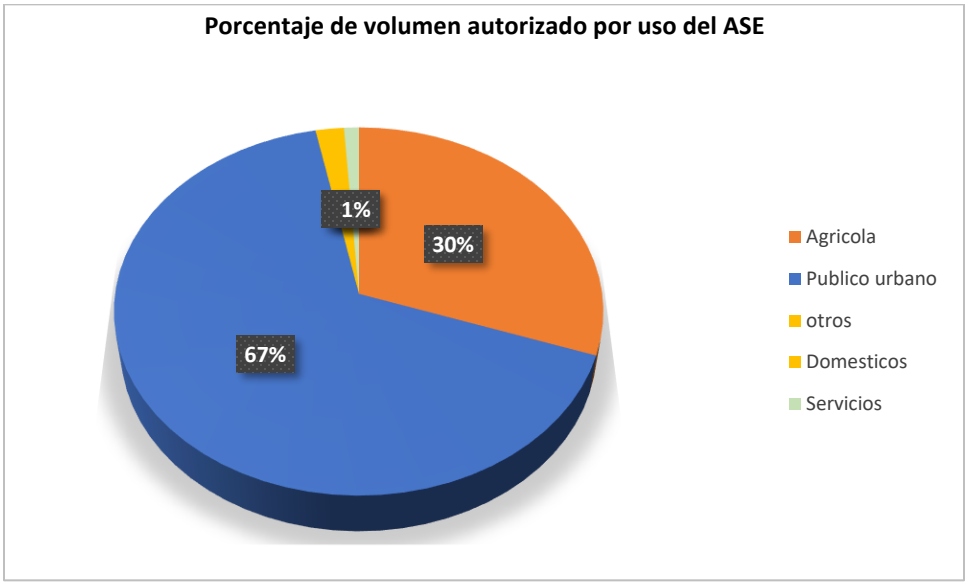


Figura 30. Volúmenes autorizados por uso de forma anual en el ASE. Fuente: elaboración propia con datos del REPDA [53].

4.3.3 Rasgos indicadores de sistemas de flujo

En el acuífero El Sauz-Encinillas (ASE), los rasgos indicadores de sistemas de flujo pueden ser identificados a través de diversos métodos y observaciones de campo. Estos indicadores son clave para comprender la dinámica del agua subterránea y pueden incluir:

Topografía: La topografía del área puede revelar áreas donde el agua subterránea puede fluir hacia abajo (zonas de recarga) o hacia arriba (zonas de descarga). Por ejemplo, las áreas de mayor elevación pueden indicar potenciales áreas de recarga, mientras que las áreas más bajas pueden indicar zonas de descarga.

Piezometría: La medición de la presión del agua subterránea en diferentes profundidades a lo largo de un área puede ayudar a identificar patrones de flujo. Las diferencias en los niveles piezométricos pueden indicar áreas de recarga y descarga.

Hidro geoquímica: El análisis de la calidad química del agua subterránea puede revelar la dirección del flujo y las áreas de recarga y descarga. Por ejemplo, la presencia de ciertos minerales o contaminantes puede indicar la influencia de fuentes de agua superficiales o actividades humanas.

Características del suelo: Las propiedades del suelo, como la permeabilidad y la textura, pueden influir en la velocidad y la dirección del flujo de agua subterránea. La observación de estas características puede proporcionar información sobre cómo el agua se mueve a través del subsuelo.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

características puede proporcionar información sobre cómo el agua se mueve a través del subsuelo.

Topografía

El ASE se encuentra en un valle delimitado por cadenas montañosas o sierras en sus bordes, lo que le confiere una forma alargada y generalmente estrecha (Figura 31). A pesar de estar en un valle, su topografía puede ser variada, con zonas de llanuras interiores, colinas suaves o laderas pronunciadas, dependiendo de su ubicación específica dentro del valle y la geología local.

La presencia de barrancas y arroyos que atraviesan el territorio del acuífero indica la existencia de un sistema de drenaje que influye en su hidrología subterránea. Esta interacción con la superficie sugiere una importante interacción entre las aguas subterráneas y la superficie, lo que puede afectar la recarga y descarga del sistema acuífero [(76)].

La topografía del ASE se caracteriza por un valle entre sierras con un relieve variado que incluye colinas, llanuras y barrancas, y una significativa interacción con la superficie que influye en su hidrología subterránea. Las sierras y arroyos en la geografía del acuífero pueden constituir características importantes de su topografía, proporcionando tanto barreras físicas como vías de flujo para las aguas superficiales y subterráneas en la zona.

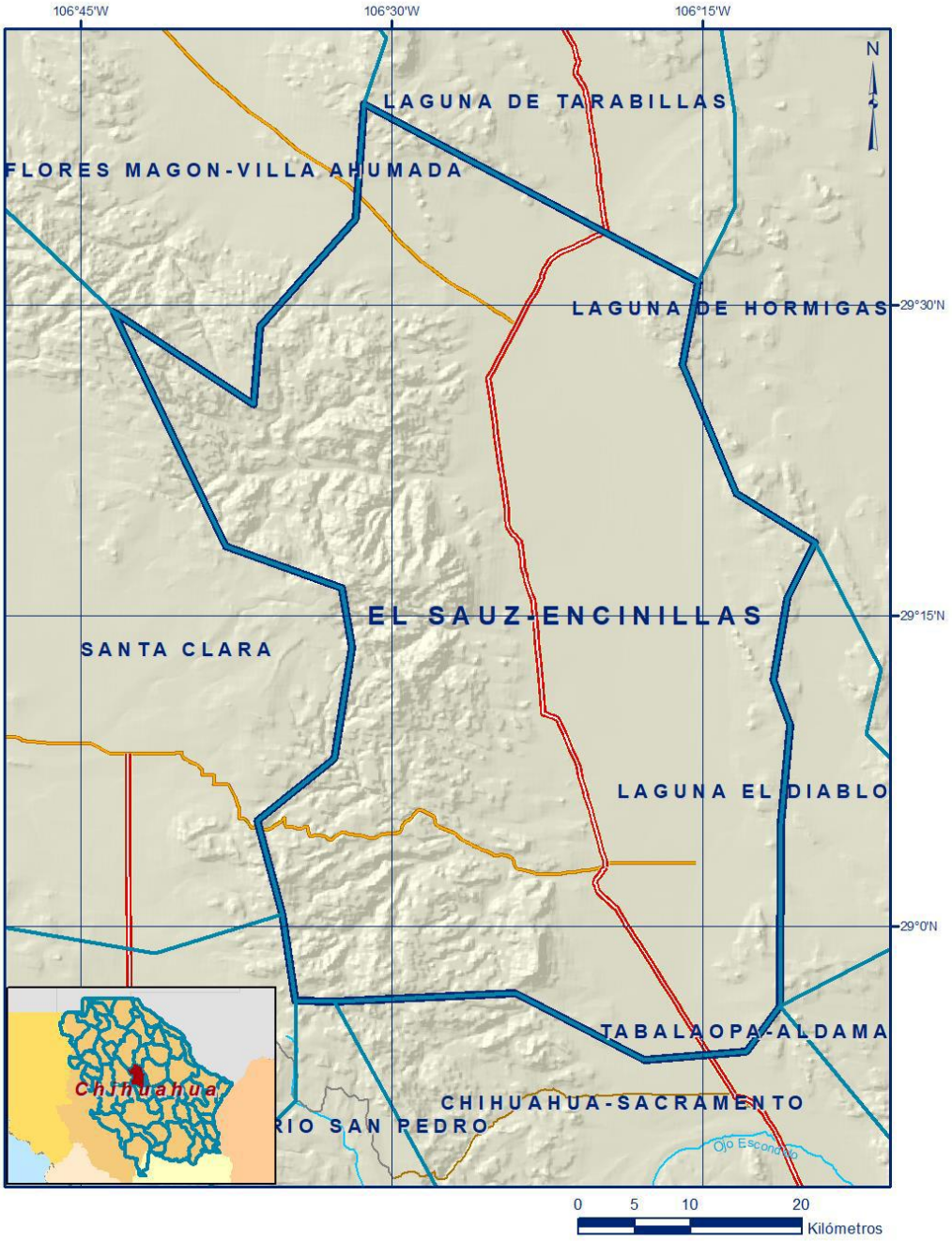


Figura 31. Topografía del acuífero El Sauz-Encinillas. Fuente: CONAGUA (2023) [76].

Piezometría

La definición de áreas de recarga y descarga, y por ende las trayectorias de flujo de agua subterránea, puede lograrse mediante diversos indicadores, entre ellos las trayectorias piezométricas. Estas trayectorias definen las direcciones del flujo subterráneo ascendente en áreas de descarga y descendente en áreas de recarga. La construcción de una red de piezómetros para obtener esta información puede resultar costosa desde el punto de vista económico [58]. La CONAGUA, tiene una red de pozos para realizar mapas de piezometría, en el ASE se cuenta con 36 pozos como se muestra en la Figura 32.

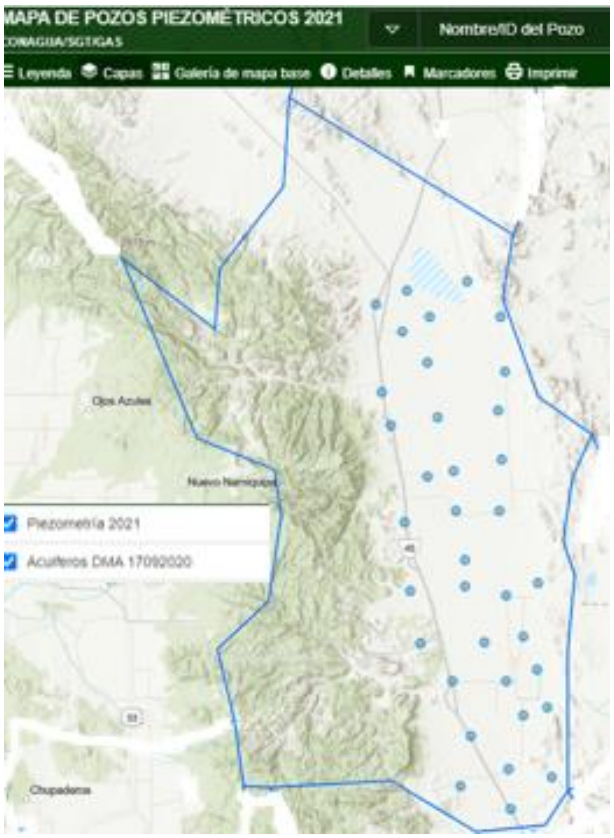


Figura 32. Pozos que son parte de la red piezométrica del ASE. Fuente: CONAGUA (2021) [56].

También se tomó en cuenta la información del estudio realizado en 2021 [75] sobre el monitoreo piezométrico de los tres acuíferos que abastecen al municipio de Chihuahua. De los 40 pozos utilizados el 25% son pozos operados por el organismo operador. Para el análisis del 2023, se consideraron 63 pozos para la realización de las equipotenciales de profundidad y de elevación del nivel estático. En la Tabla 21 se presentan las características geográficas, como las coordenadas y la profundidad de perforación de los pozos considerados en este análisis.

Tabla 21. Características de los aprovechamientos utilizados para el análisis piezométrico en el ASE. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS

X COORD UTM	*Y COORD UTM*	*PROFUNDIDAD (m)*
379695.249	3205709.07	200
380943.053	3205781.99	200
380931.745	3205840.29	200
381339.071	3205993.08	200
375963.238	3196459.35	200
376969.351	3196379.34	150
378849.050	3196677.16	200
379562.163	3197441.42	150
378363.324	3197552.17	300
377949.170	3196271.37	300
377909.194	3198462.26	300
379583.249	3196657.18	300
379319.123	3199121.27	300
379341.231	3195790.41	300
379808.170	3198305.37	300
380850.200	3197494.25	150
373151.253	3216332.68	200
372927.963	3217312.00	200
372721.943	3218193.16	250
374656.109	3216286.06	250
374423.876	3217257.05	250
374192.096	3218240.66	250
374952.946	3219178.01	250
375166.097	3220154.92	250
375238.083	3220980.98	350
375340.122	3222134.87	350

Longitud (°)	Latitud (°)	PROFUNDIDAD (m)
29.460333	-106.381667	200
29.446333	-106.418667	350
29.433000	-106.354667	350
29.417833	-106.387167	350
29.385500	-106.357167	350
29.354167	-106.411667	350
29.328000	-106.344667	350
29.318667	-106.401167	350
29.265833	-106.356667	350
29.470500	-106.309500	200
29.432500	-106.269167	200
29.375333	-106.263833	200
29.334500	-106.272500	200
29.282833	-106.268000	200
29.270833	-106.325333	150
29.217167	-106.384167	200
29.145500	-106.378333	150
29.089667	-106.365833	300
29.229500	-106.323000	300
29.228833	-106.270833	300
29.177500	-106.312000	300
29.150000	-106.311667	300
29.153833	-106.224500	300
29.140333	-106.262833	300
29.091667	-106.289167	150
29.098000	-106.241333	200
29.062167	-106.225333	200
29.050833	-106.327500	250
29.050833	-106.262833	250
29.014500	-106.242167	250
29.022833	-106.212833	250
28.993333	-106.305500	250
28.958000	-106.259500	250
28.940500	-106.318000	350
28.949667	-106.208000	350
28.916667	-106.257500	350

De acuerdo con la Tabla 21, se observa que la mayor profundidad de perforación alcanza los 350 m. Estos pozos se ubican en zonas cercanas a los márgenes de las sierras y tienen profundidades de perforación de 150 y 200 m respectivamente. En promedio, las profundidades de perforación de los pozos son de 300 m.

El análisis del comportamiento de las cargas hidráulicas se realizó utilizando datos de profundidad del nivel del agua subterránea y las elevaciones de los brocales en metros sobre el nivel del mar (msnm), con el fin de construir configuraciones que representen la profundidad, elevación y evolución del nivel del agua en el periodo de 2019 a 2023. Este análisis se llevó a cabo utilizando el software ArcGIS y se comparó con los resultados obtenidos en el estudio realizado en 2021.

En la configuración de la profundidad del nivel del agua para el año 2023 en el acuífero Sauz Encinillas, se evidencian variaciones significativas en diferentes zonas (Figura 33):

La configuración de la profundidad al nivel estático revela fluctuaciones que van desde 2 hasta 165 m. En las proximidades de los poblados de Encinillas y Ejido Nuevo Delicias, ubicados en el centro del acuífero, las profundidades oscilan entre 40 y 80 m. Por otro lado, al sur, las profundidades varían de 100 a 165 m, siendo más profundas debido al efecto topográfico en el extremo sur, donde se localizan los pozos que alimentan el acueducto El Sauz-Chihuahua.

En contraste, las profundidades mínimas alcanzan aproximadamente entre 2 y 5 m cerca de la Laguna Encinillas. Estas profundidades menores se encuentran principalmente en las partes más bajas del acuífero o en el centro del valle, incrementando gradualmente hacia las sierras.

Es notable la partición de las profundidades de la superficie freática, aproximadamente en el centro del acuífero, dividiéndolo en dos zonas, el centro norte y el centro sur. Los pozos ubicados en la parte fracturada en la zona conocida como estación terrazas presentan características distintas, ya que difieren del tipo de roca de donde obtienen su explotación, siendo en este caso calizas con cavernas importantes. En contraste, la mayoría de los pozos en el acuífero se emplazan en materiales de rellenos aluviales.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

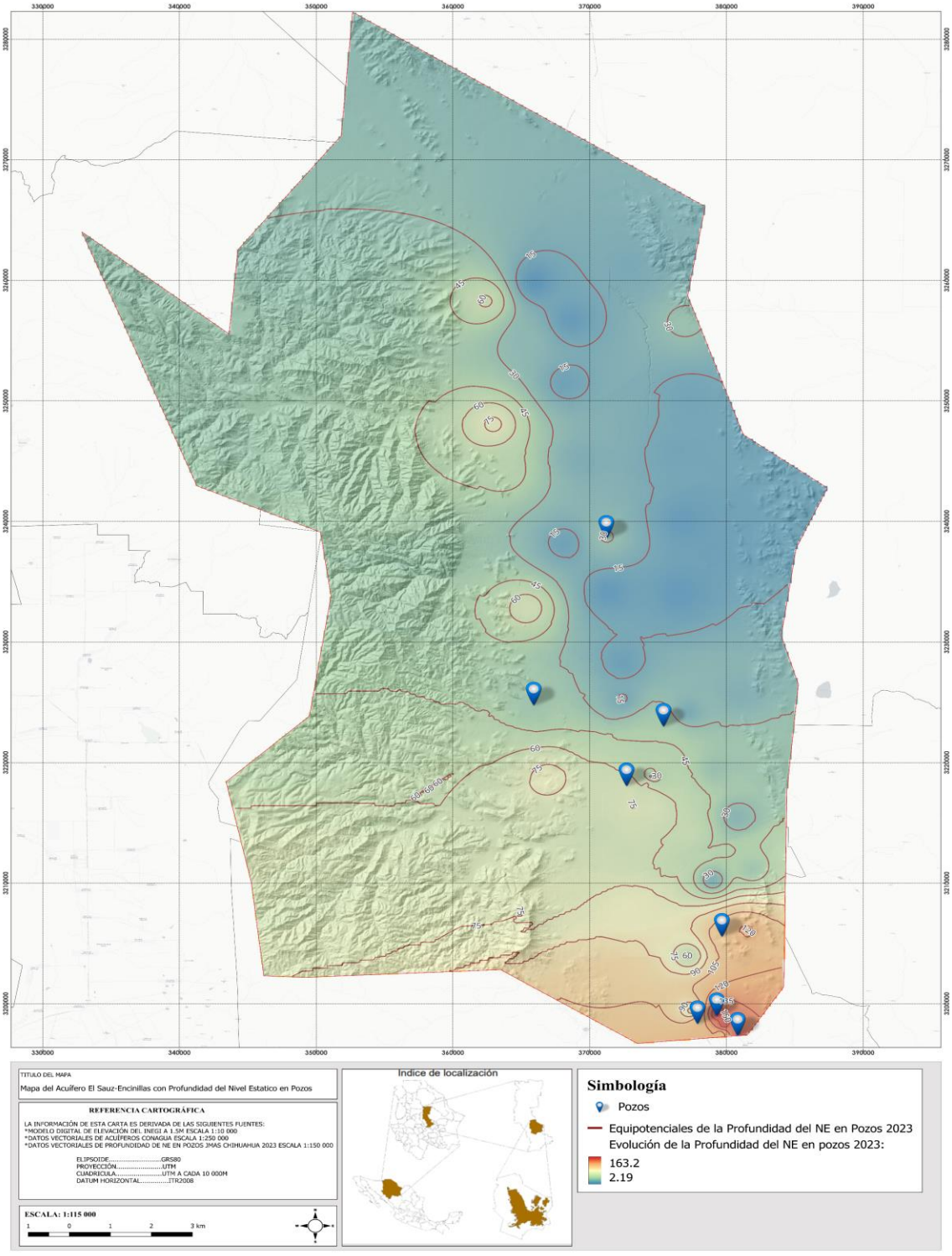


Figura 33. Profundidad del nivel estático para el año 2023 del ASE. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

En relación con la configuración de elevación del nivel estático para el año 2009 (Figura 34), las elevaciones variaban entre 1515 y 1570 metros sobre el nivel del mar (msnm) conforme se asciende topográficamente desde el valle hacia las estribaciones de las sierras. En la porción sur, el cono de abatimiento se hace más evidente al extenderse su superficie. Para el 2023 la variación se hizo mayor conservando el patrón de distribución con valores de 1583 a 1412 msnm.

La red de flujo en el acuífero muestra una dirección preferente desde las sierras que bordean el centro hacia el valle. Sin embargo, en la porción central se pueden observar elevaciones del nivel del agua que decrecen levemente hacia el norte y el sur, lo que sugiere que esta zona central podría actuar como un parteaguas hidráulico. Esta área es susceptible de desplazarse tanto hacia el norte como hacia el sur, dependiendo de las extracciones de agua subterránea que se realicen en estas áreas.

En la porción sur del acuífero, se identifica un cono de abatimiento o una zona de depresión piezométrica, que ya se evidenciaba desde el 2009 y que ha ido incrementando su superficie. Este fenómeno promueve el flujo de agua subterránea desde los alrededores hacia esta zona.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

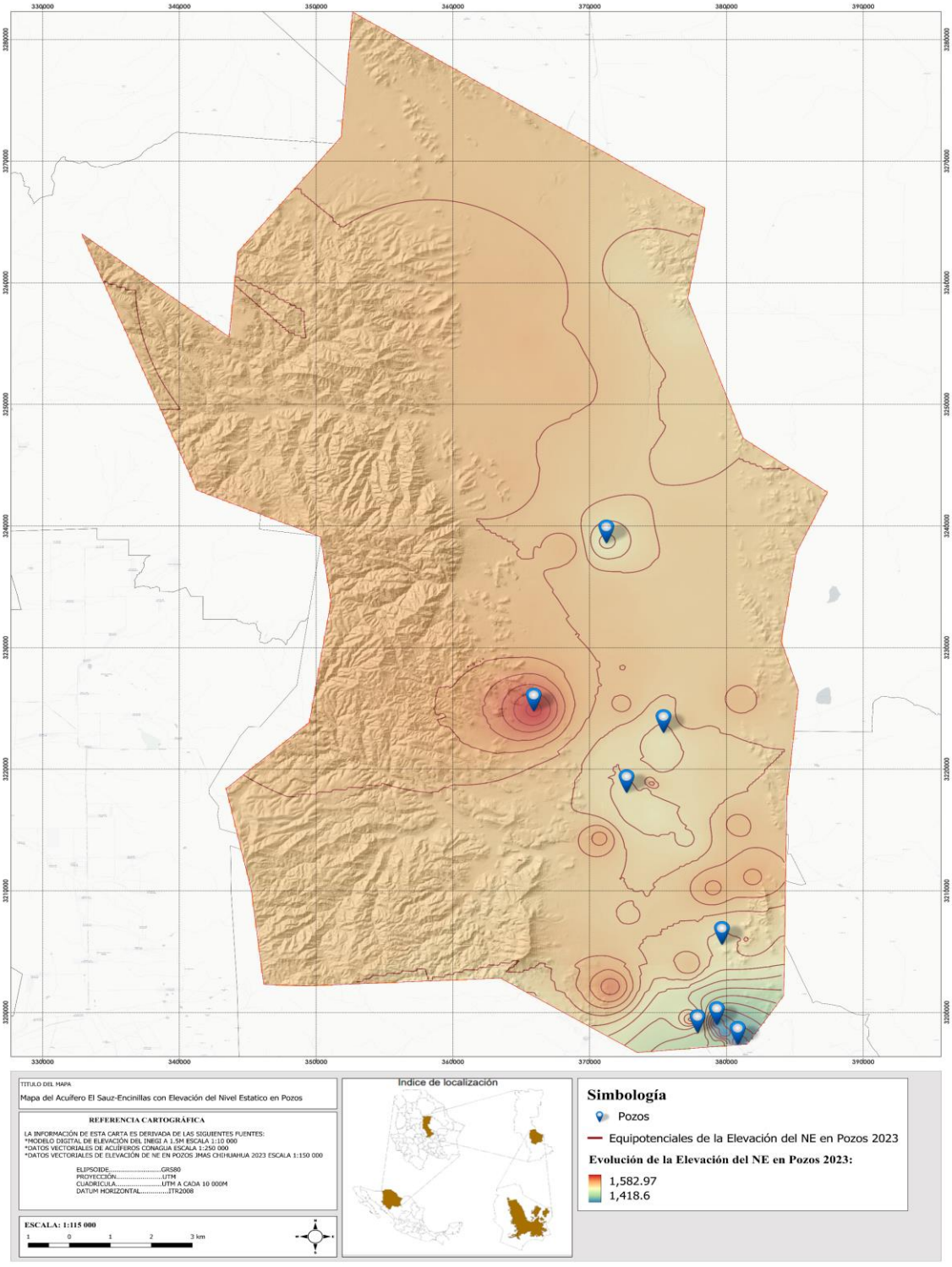


Figura 34. Elevación del nivel estático para el año 2023 del ASE. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

La configuración de la evolución del nivel del agua durante el periodo de 2019 a 2023 ofrece una comparación del comportamiento hidráulico (Figura 35). Esta representación proporciona una visión detallada de las fluctuaciones en el nivel del agua subterránea en el tiempo para el ASE.

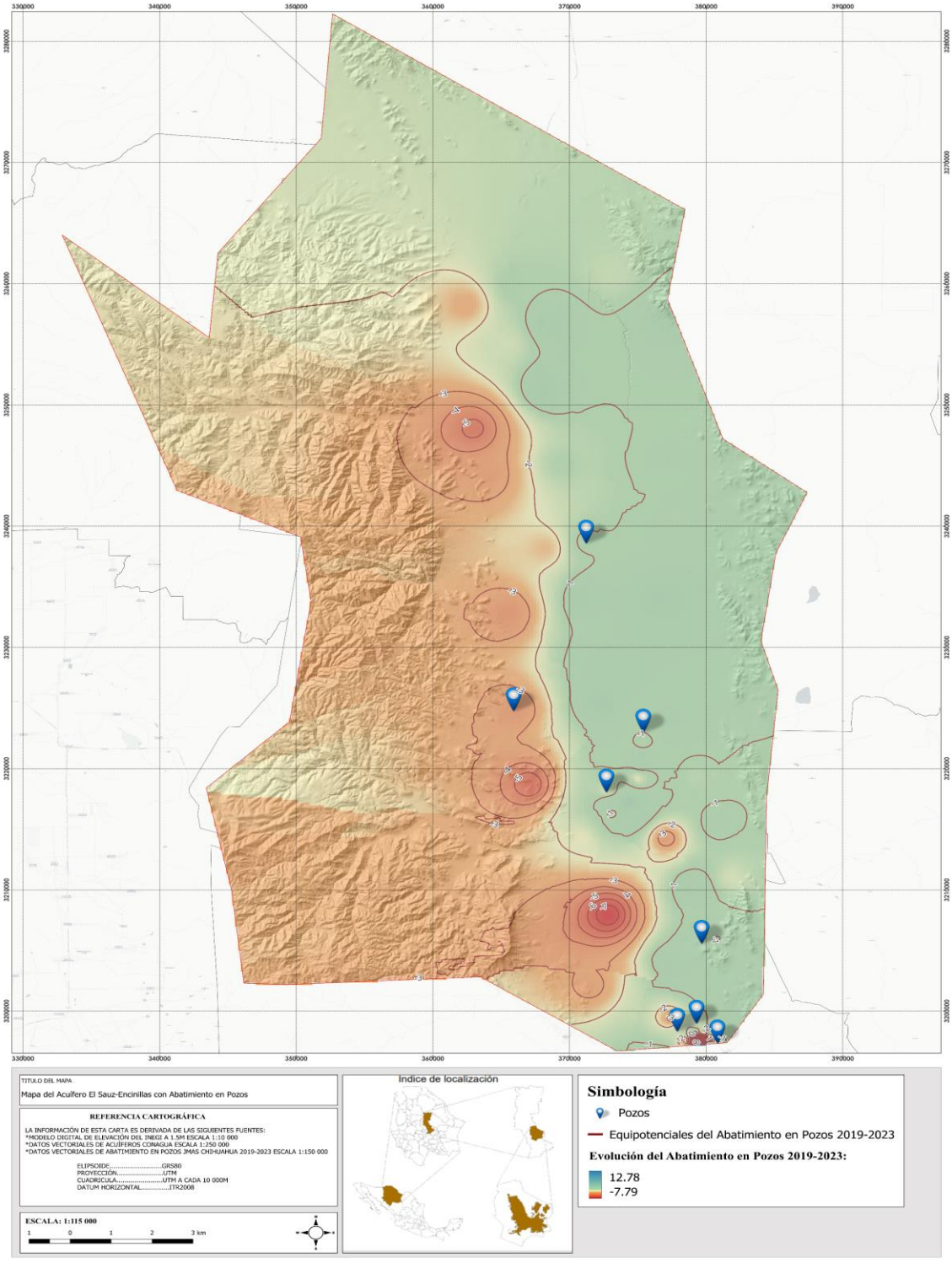


Figura 35. Evolución del nivel estático para el año 2023 del ASE. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

Se realizó un análisis de la evolución del nivel estático del ASE con datos piezométricos correspondientes a los años 2019 y 2023. Se observó que los valores de abatimiento medio anual varían entre 0 y -8 m. Los mayores abatimientos se registran en el extremo sur del acuífero, donde se concentran los pozos que abastecen de agua potable a la ciudad de Chihuahua, generando así el cono de abatimiento.

En esta configuración se observan tanto recuperaciones (valores positivos) como abatimientos (valores negativos). Los abatimientos máximos se presentan al sur del acuífero y otro en la porción central, hacia el noroeste de la localidad El Sauz.

Las recuperaciones se observan principalmente en las porciones norte, noroeste y oeste del acuífero, prácticamente en el pie de monte de la Sierra Los Fresnos hasta la Mesa Las Águilas. Sin embargo, a medida que se aleja del pie de monte hacia el valle, se comienzan a presentar abatimientos, siendo los valores máximos generalmente desde la porción central hasta el sur del acuífero.

En general, el acuífero presenta un abatimiento promedio anual de alrededor de -1 m.

La Figura 36 relaciona la profundidad del pozo con la profundidad al nivel estático, con el fin de identificar las zonas de tránsito, flujo local y regional. Se verifica que la zona de descarga o sistema de flujo local corresponde a la porción ribereña de la laguna de encinillas y a las inmediaciones al pie de monte del lado oeste del acuífero. Los pozos donde se tienen mayores profundidades de perforación están captando el agua del flujo intermedio a regional.

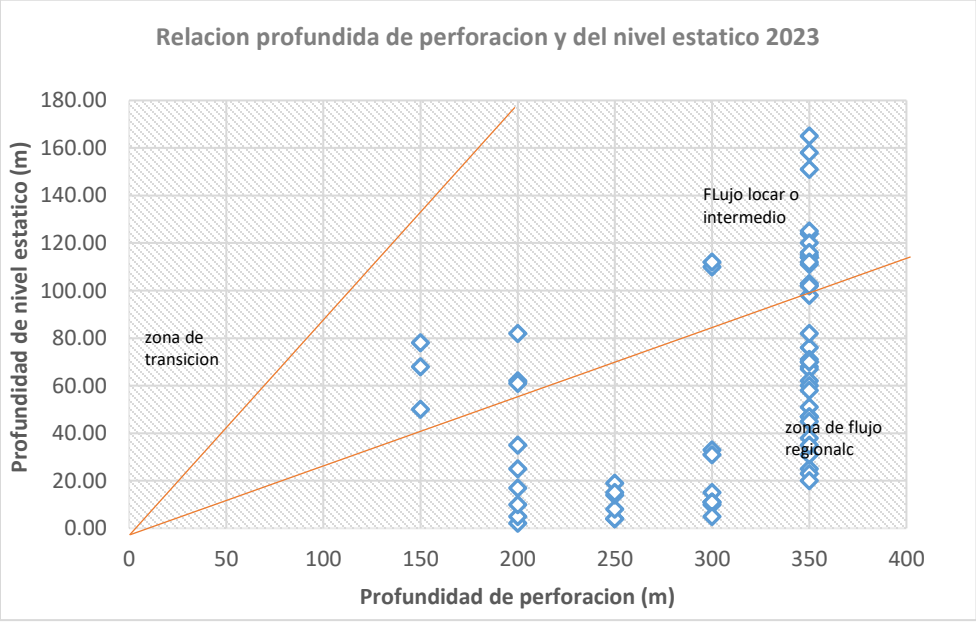


Figura 36. Relación de la profundidad de pozo contra la profundidad del nivel estático ASE. Fuente: elaboración propia con datos de la JMAS (2023).

En relación con los caudales de extracción en el acuífero durante el periodo 2019-2023, se registraron caudales promedio de 27 litros por segundo (lps), con caudales máximos de 70 lps y mínimos de 8 lps. Estos datos son fundamentales para comprender la dinámica de extracción y la disponibilidad de agua en el acuífero durante este periodo.

Hidro geoquímica

La hidro geoquímica del acuífero El Sauz-Encinillas ha sido objeto de diversos estudios que han investigado la composición química y las características del agua subterránea en esta región. Estos estudios han revelado la presencia de diferentes elementos y compuestos químicos en el agua subterránea, así como su distribución y posibles fuentes de contaminación como se analizó en el **Informe 5. Análisis de riesgo y resiliencia hídrica**.

Según informes de la CONAGUA, se han realizado análisis hidro geoquímicos en varios puntos del acuífero El Sauz-Encinillas para evaluar la calidad del agua y su idoneidad para diversos usos, como el abastecimiento humano, la agricultura y la industria. Estos análisis han permitido identificar la presencia de minerales disueltos, metales pesados y otros contaminantes en algunas áreas del acuífero, lo que puede afectar su calidad y potencialmente representar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente, lo cual puede revisarse a detalle el **Informe 5. Análisis de riesgo y resiliencia hídrica** y en el **Informe 4. Análisis urbano y rural**.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Balance hídrico

Dada la complejidad de la integración y análisis de datos e información sin generar estimaciones de caudales de explotación y censos de aprovechamientos dentro de los acuíferos, este tema es un área de actualización urgente. Por esta razón, en todos los capítulos donde se menciona la disponibilidad según lo establece la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 [(62)], se utilizan los datos oficiales publicados en la plataforma de la CONAGUA para el año 2023 [(76)] abarcando los tres acuíferos considerados.

En la publicación del 2023 de CONAGUA [(76)] referente a la actualización de disponibilidad media anual para el ASE. Se resalta que utiliza datos del censo de 2009 los cuales son los siguientes:

- Se cuenta con un total de 392 aprovechamientos activos y 131 inactivos, de estos aprovechamientos son 30 las norias que se encuentran activas, mientras 70 son inactivas.
- El volumen total de extracción estimado asciende a 127.2 hm^3 anuales, de los cuales 105.5 hm^3 (82.9 %) se destinan para uso agrícola, 2.8 hm^3 (2.2 %) para uso doméstico-abrevadero, 18.7 hm^3 (14.7%) para uso público-urbano
- Por otro lado, el volumen de extracción de aguas subterráneas reportado por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) [(53)] es de 120,540,680 m^3 anuales, según datos actualizados hasta el 30 de diciembre de 2022.
- La recarga total media anual del acuífero estimada es 62.4 hm^3/año, de los cuales 41.3 hm^3 corresponden a la recarga natural y los 21.1 hm^3 restantes a la recarga inducida.
- La Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea (DMA) se calcula restando la descarga natural comprometida (DNC) y el volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) al volumen de recarga total media anual (R).
- Para este acuífero, el cálculo resulta en un valor negativo, este resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, se tiene un déficit de 58,140,680 m^3 anuales.

En cuanto al análisis del realizado en el REPDA con actualización al 31 de diciembre del 2023, se tiene [(53)]:

- Se tiene 516 aprovechamientos de aguas subterráneas, con un volumen total autorizado de 201,973,291.14 m^3/año; es decir 81.4hm^3 adicionales
- De estos aprovechamientos 333 están registrados para la actividad agrícola con un volumen anual autorizado de 61,231,220.14 m^3, que, en comparación a la publicación de disponibilidad del 2023, tiene un descenso de aproximadamente de 44.3 hm^3.
- 55 aprovechamientos están registrados para uso público urbano con un volumen anual autorizado de 134,420,240.00 m^3, que, en comparación a la publicación de disponibilidad del 2023, se incrementó 116 hm^3 el volumen que se reporta en la publicación.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

5. Referencias

1. UACH Facultad de Ingeniería, CNA. Estudio Geofísico del Valle de Chihahua (Segunda Parte). ; 1980.

2. UACH Facultad de Ingeniería, CNA. Estudio Geohidrológico del Valle de Chihuahua (Primera Parte). ; 1978.

3. SARH. 1.Análisis de la Problemática de Abastecimiento de Agua Potable a la Ciudad de Chihuahua. ; 1985.

4. TEGEMIN S.A. de C.V., CNA. Actualización de Mediciones Piezométricas de los Acuíferos Reactivados. ; 1996.

5. CNA. Diseño de Redes de Monitoreo de los Acuíferos de los Valles de: Juárez, Jiménez-Camargo, Chihuahua-Sacramento en el estado de Chihuahua. ; 1996.

6. Cruz-Martinez et. al. Evaluación de la calidad del agua subterránea en el acuífero Chihuahua-Sacramento. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 2017; 69: 527-538.

7. Barrios A. Caracterización hidrogeológica del acuífero Sacramento, Chihuahua. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 2019; 36: 47-62.

8. Ramos-Leal, J. et al.. Estructura hidrogeológica del acuífero Tabalaopa y su relación con la recarga natural.. Revista de Investigación Hidrogeológica. 2015;(23): 56-68.

9. Morales-Garduño, M. et al. Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Tabalaopa en Chihuahua.. Hidrogeología. 2020; 28: 123-135.

10. López-Hernández, J. et al. Evaluación de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero Aldama, Chihuahua.. Revista de Ciencias Ambientales. 2018;(26): 89-102.

11. García-Benavides, L. et al.. Dinámica hidrogeológica del acuífero Aldama, Chihuahua. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 2021; 37: 25-38.

12. Sandoval-Silva, E. et al. Caracterización hidrogeológica del acuífero Sauz Encinillas en Chihuahua. Investigaciones Geográficas. 2016;(81): 92-107.

13. Serrano-Cisneros, J. et al. Gestión integrada de los recursos hídricos en el acuífero Sauz Encinillas.. Revista de Ingeniería del Agua. 2019;(26(): 175-189.

14. CONAGUA. Actualización de da Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Chihuahua-Sacramento (0830), Estado de Chihuahua. Ciudad de México:; 2023.

15. Ariel Consultores S.A. de C.V., SARH. Estudio hidrogeológico de los acuíferos de la zona de veda en la región de Aldama, Chih.. ; 1972.

16. PROYESCO S.A. DE C.V., SARH. Prospección geofísica de los valles del Sauz y Tabalaopa, Chih., para proporcionar agua en bloque a la ciudad de Chihuahua, Chihuahua. ; 1980.

17. Osuna Vizcarra A. Construcción de un modelo digital de flujo y diseño de una política de explotación óptima del acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua.. Chihuahua:; 1991.

18. Pérez Arambula JM. Determinación de la geometría del acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua.. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería.; 1996.

19. Moro Ingeniería S.C., CONAGUA. Actualización de mediciones piezométricas de los acuíferos denominados: Janos, Buenaventura y Tabalaopa-Aldama, Chihuahua. CONAGUA; 2004.

20. CCN S.A. DE C.V., CONAGUA. Monitoreo piezométrico de los acuíferos de Ascensión, Palomas-Guadalupe Victoria, Valle de Juárez y Chihuahua-Sacramento y calidad del agua de los acuíferos Chihuahua-Sacramento y Tabalaopa-Aldama. ; 2005.

21. Ledezma Ruíz R. Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería.; 2009.

22. Diario Oficial de la Federación (DOF). ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Chihuahua-Sacramento, clave 0830, en el Estado de Chihuahua, Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo. [Online].; 2015 [cited 2024 03 25. Available from: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5404985&fecha=25/08/2015#gsc.tab=0.

23. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Geografía y Medio Ambiente. [Online].; 2023 [cited 2023 11 14. Available from: https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/.

24. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Disponibilidad por Acuíferos. [Online].; 2023 [cited 2023 12 27. Available from: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html.

25. Smith J. Geología regional de la cuenca del acuífero Chihuahua-Sacramento.. Boletín del Instituto Geológico de México. 2008;(112): 321-335.

26. JCAS-JMAS-CONAGUA-UACH. Evaluación de las fuentes actuales y de fuentes alternas. Junta Municipal de Agua y Saneamiento; 2015.

27. Burrows M. Notas sobre la geología de la región de Chihuahua.. Boletín del Instituto Geológico de México. 1910;(27): 145-180.

28. Handschy WJ. Geología Regional del Área de la Falla del Valle de Río Grande: Nuevo México y Chihuahua. Boletín del Instituto Geológico de México,. 1986;(99): 63-81.

29. Burrows J. Definición de la Formación Las Vigas.. Boletín del Instituto Geológico de México. 1910; 50: 127-135.

30. Handschy WJ. Ambientes de depósito de la Formación Las Vigas.. Revista Mexicana de Geología. 1986;(12): 89-96.

31. Humphrey J, Díaz M. Definición de la Formación La Virgen.. Boletín del Instituto Geológico de México. 1956;(70): 213-227.

32. Buckardt C. Reporte inicial sobre la Formación La Virgen. Boletín de Geología de Coahuila, 15(2), 78-81. Boletín de Geología de Coahuila. 1930;(15): 78-81.

33. Zwazinger H. Paleogeografía del Cretácico inferior en Chihuahua y Coahuila. Revista Mexicana de Geología. 1986;(10): 45-58.

34. Imlay RW. Definición de la Formación Cupido. Boletín del Instituto Geológico de México, 80(3), 129-140. Boletín del Instituto Geológico de México. 1936;(80): 129-140.

35. Imlay RW. Definición de la Formación La Peña. Boletín del Instituto Geológico de México. 1936;(80): 129-140.

36. Amsbury DL. Estratigrafía del área de El Mimbre - Parras, Coahuila.. Instituto Mexicano del Petróleo. 1958;(81): 1-36.

37. UNAM. Carta Geocronológica de México. [Online]. [cited 2024 03 02. Available from: https://www.geologia.unam.mx/contenido/carta-geologica-mexicana.

38. Servicio Geológico Mexicano. Servicio Geológico Mexicano. [Online]. [cited 2024 03 02. Available from: https://www.gob.mx/sgm.

39. Gómez-Treviño E, González-Álvarez R. Estudio Geológico y Estructural de la Sierra Majalca, Chihuahua, México. ; 2015.

40. Pelayo-Villarreal AM, Vázquez-Montoya A. Análisis geológico-estructural del límite sur del acuífero Chihuahua-Sacramento. Revista mexicana de ciencias geológicas. 2013;(30): 380-393.

41. Villalba-Breceda G. Análisis geológico-estructural de la región noreste de la Cuenca Sacramento y la Sierra Majalca, Chihuahua, México.. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 2010;(62): 437-451.

42. Villalba-Breceda G, Martínez-López J. Análisis estructural de la Sierra de Majalca, Chihuahua, México.. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 2007;(59): 1-20.

43. CONAGUA. Estudio Geofísico del Valle de Chihuahua, Chihuahua, México. ; 1980.

44. CONAGUA. Estudio de prospección geofísica de los valles El Sauz y Tabalaopa, Chihuahua, México. ; 1980.

45. Rivas L. Modelo de unidades geoeléctricas del acuífero El Sauz-Encinillas, Chihuahua México. [Online].; 2019 [cited 2024 03 02. Available from: http://repositorio.uach.mx/244/.

46. García E. Modifications to the system of climate classification of Köppen. 5th ed. Ciudad de México: Instituto de Geografía UNAM; 2004.

47. CONAGUA. Estaciones climatológicas. [Online].; 2024 [cited 2024 03 02. Available from: https://smn.conagua.gob.mx/tools/GUI/sivea_v3/sivea.php..

48. FAO. Infiltración. [Online]. [cited 2024 03 02. Available from: https://www.fao.org/3/y4690s/y4690s00.htm.

49. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Manejo del agua en suelos áridos y semiáridos. [Online].; 2014 [cited 2024 03 02.

50. National Weather Service. Climate Prediction Center. [Online].; 2024 [cited 2024 02 03. Available from: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.

51. INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. [Online].; 2024 [cited 2024 02 13. Available from: https://www.inecc.gob.mx/emapas?De=IGOBMX.

52. Centro de Estudios Estratégicos (CEE) y Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua. Estudio para la Definición del Borde Urbano, Zonas de Valor Ambiental y de Preservación Ecológica. Estudio. Chihuahua:; 2019.

53. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Consulta a la base de datos del REPDA. [Online].; 2023 [cited 2023 12 27. Available from: https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx.

54. Meyboom P. Groundwater systems and their delineation.. Water Resources Research. ;(2): 267-276.

55. Tóth J. A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada.. Journal of Hydrology. ;(4): 219-232.

56. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). [Online].; 2023 [cited 2022 12 27. Available from: https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=repda.

57. Custodio E, Llamas MR. Hidrología subterránea. Barcelona: Ediciones Omega; 1983.

58. Freeze RA, Cherry JA. Groundwater. Englewood Cliffs Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.; 1979.

59. Todd DK. Groundwater hydrology New York; 1980.

60. JCAS, JMAS, JMAS Juarez y UACH. Inventario Estatal de Fuentes de Suministro de Agua Potable en el Estado de Chihuahua. ; 2022.

61. Diario Oficial de la Federación (DOF). NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. [Online].; 2022 [cited 2023 12 27. Available from: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0.

62. Diario Oficial de la Federación (DOF). NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. [Online].; 2015 [cited 2023 12 11. Available from: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0.

63. CONAGUA. Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Tabalaopa-Aldama (0835), Estado de Chihuahua. Ciudad de México:; 2023.

64. Ariel Construcciones S.A., SARH. SECRETARIA DE RECURSOS HIDRÁULICOS. 1972. Estudio Hidrogeológico de los acuíferos de la zona de veda en la región de Aldama, Chihuahua.; 1972.

65. CONAGUA. Actividades Geohidrológicas en los Acuíferos: Santa Clara, Aldama San Diego, Villalba, Conejos Médanos, Tabalaopa Aldama y Alto Río San Pedro, en el Estado de Chihuahua.. ; 2007.

66. Pérez AJ. Determinación de la Geometría del Acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua. ; 1996.

67. SARH. Estudio Geofísico realizado en los Valles de Tabalaopa y Aldama Chihuahua.; 1972.

68. SARH, PROYESCO, S.A. Prospección geofísica de los Valles del Sauz y Tabalaopa, Chih., para Proporcionar Agua en Bloque a la Ciudad de Chihuahua, Chih. ; 1981.

69. Mauger RL. Descripción de las rocas volcánicas del área de Sacramento, estado de Chihuahua. ; 1983.

70. Bockoven FJ. Riegos de superficie para la agricultura en el norte del estado de Chihuahua. , Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agrícolas.; 1976.

71. Mellor WM. Análisis de la geología estructural del área de estudio. Universidad Autónoma de Chihuahua; 1978.

72. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Ficha Climatica. Chihuahua. México:; 2022.

73. García-Moya E, Miranda-Avilés H. Vegetación del estado de Chihuahua. Revista Mexicana de Biodiversidad, 81(4), 1079-1116. Revista Mexicana de Biodiversidad. 2010;(81): 1079-1116.

74. CONAGUA. Actualización de mediciones piezométricas del acuífero de Tabalaopa, Chihuahua. ; 2004.

75. JMAS, Gobierno Municipal de Chihuahua, Fundación Produce y Fideicomiso para el cuidado del agua en el municipio de Chihuahua. Monitoreo Piezométrico de los Acuíferos El Sauz-Encinillas, Chihuahua-Sacramento y Tabalaopa-Aldama. Informe técnico. ; 2021.

76. CONAGUA. Actualización de la Disponibilidad Media Anual De Agua en el Acuífero El Sauz Encinillas (0807), Estado de Chihuahua. Ciudad de México:; 2023.

77. Comisión Nacional del Agua. Actualización Geohidrológica de los acuíferos Las Palmas, Palomas-Guadalupe-Victoria, Los Moscos, Josefa Ortiz de Domínguez, El Sauz-Encinillas, Laguna El Diablo, Laguna La Vieja, y Chihuahua-Sacramento, en el estado de Chihuahua. ; 2009.

78. Sistema Metorológico Nacional. Normales Climatológicas por Estado. [Online]. [cited 2023. Available from: https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chih.