

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**EVALUACIÓN DE SITIOS POTENCIALES PARA RECARGA
ARTIFICIAL EN EL CIRCUITO UNIVERSITARIO CAMPUS II,
CHIHUAHUA, MÉXICO**

POR:

ING. LAURA LETICIA CASTILLO QUINTANA

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ADÁN PINALES MUNGUÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

JUNIO DE 2026



“Evaluación de sitios potenciales para recarga artificial en el Circuito Universitario Campus II, Chihuahua, México”. Tesis, presentado por Ing. Laura Leticia Castillo Quintana como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez
Director de la Facultad de Ingeniería

M.I. Rodrigo de la Garza Aguilar
Secretario de Investigación y Posgrado

M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador(a) Académico

Dr. Adán Pinales Munguía
Director(a) de Tesis

Junio 2026

Fecha

COMITÉ

Dr. Adán Pinales Munguía
Dra. María de Lourdes Villalba
Dr. Mario Alberto Olmos Márquez
M.I. Iván Oswaldo Hernández Ledezma



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

22 de junio de 2026.

ING.LAURA LETICIA CASTILLO QUINTANA
Presente. -

En atención a su solicitud relativa al trabajo de Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Adán Pinales Munguía** para que lo desarrolle como Tesis, con el título **"EVALUACIÓN DE SITIOS POTENCIALES PARA RECARGA ARTIFICIAL EN EL CIRCUITO UNIVERSITARIO CAMPUS II, CHIHUAHUA, MEXICO"**.

Índice de Contenido

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

Capítulo 1. Introducción

1.2 Antecedentes

1.3 Planteamiento del problema

1.4 Justificación

1.5 Objetivos

Capítulo 2. Fundamentación teórica

2.1 Recarga artificial

2.2 Técnicas de recarga artificial

Pozos, túneles y perforaciones

Distribución

Infiltración en márgenes de ríos

Modificación de canales

Captación de escorrentía



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 3. Marco físico

- 3.1 Localización
- 3.2 Topografía
- 3.3 Hidrografía
- 3.4 Climatología
- 3.5 Precipitación
- 3.6 Uso de suelo y vegetación
- 3.7 Edafología
- 3.8 Fisiografía
- 3.9 Geología
- 3.10 Geofísica

Capítulo 4. Metodología

- 4.1 Recopilación y análisis de la información
- 4.2 Investigación y análisis de piezometría y calidad del agua
- 4.3 Identificación de sitios de recarga
- 4.4 Recomendación de un sitio y una posible obra de recarga

Capítulo 5. Resultados

- 5.1 Piezometría
- 5.2 Mapas de configuración piezométrica
 - Profundidad del nivel estático
 - Elevación del nivel estático
 - Evolución del nivel estático



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

5.3 Hidrógrafos

5.4 Calidad del agua

5.5 Cortes litológicos

5.6 Estudio geofísico

Localización de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVS)

Interpretación de los SEVS

Perfiles geo eléctricos

5.7 Reconocimiento del arroyo El Picacho

5.8 Estudio hidrológico

Parámetros de forma

Parámetros del relieve

Parámetros de la red de drenaje

Cauce principal

Número de escurrimiento

Coefficiente de escurrimiento

Tiempo de concentración

Precipitación media anual

Alturas de precipitación

Gastos máximos

5.9 Identificar sitios de recarga mediante recorridos de campo y SEVS distribuidos en el Circuito Universitario

5.10 Recomendar el sitio y una posible obra de recarga artificial a la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

6.2 Recomendaciones

Anexo I. Valores del número de escurrimiento

Anexo II. Valores de K para obtener el coeficiente de escurrimiento



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Anexo III. Fotografías del trabajo de campo

Referencias

Curriculum Vitae

EL DIRECTOR

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ
MARTÍNEZ**

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

M.I. RODRIGO DE LA GARZA AGUILAR

DEDICATORIA

Para Natalia

Que tus sueños sean mayores
que tus miedos.

Te amo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la vida y la salud que me presta. A mi esposo por su paciencia durante este tiempo y por su ayuda en los recorridos de campo. A mi hermano por su compañía durante el reconocimiento de campo. A mis padres por cuidar de mi bebe para poder estudiar. A mi director de tesis el Dr. Adán Pinales por su paciencia, dedicación y sus enseñanzas durante la maestría. Al M.I. Oswaldo Hernández y a la brigada de geofísica por su tiempo para realizar los sondeos eléctricos verticales. A la Dra. María de Lourdes Villalba por instruirme en la redacción y al Dr. Mario Olmos por dedicar su tiempo para la revisión de esta investigación. Al coordinador de la maestría al M.I. Miguel Ángel González por apoyarme desde el inicio de la maestría. Y a cada uno de los maestros que formaron parte de mi educación durante mi estadía en la maestría.

También quiero agradecer al Laboratorio de Sanitaria por proporcionar el personal y el material necesario para realizar los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua.

Finalmente quiero agradecer a CONACYT por apoyarme con los recursos necesarios para realizar la maestría.

²⁷ Él hace subir el vapor de agua y luego lo destila en lluvia. ²⁸La lluvia se derrama desde las nubes, y todos se benefician.
Job 36: 27-28 NTV

RESUMEN

El agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento en las zonas áridas. La ciudad de Chihuahua se abastece principalmente del agua subterránea, la cual ha tenido un impacto negativo en los últimos años. Los niveles piezométricos han estado en descenso en los últimos 10 años y ha tenido un aumento de concentración de flúor en la porción noroeste de la ciudad. Por lo cual, se ha visto la importancia de investigar el llevar a cabo obras de recarga artificial que puedan ayudar a mitigar esta situación. Por lo que se realizó un estudio en el Circuito Universitario Campus II para evaluar sitios potenciales para una obra de recarga. El trabajo de investigación se desarrolló mediante un análisis piezométrico de los pozos aledaños a la zona de estudio, análisis fisicoquímicos del agua que se acumula en el arroyo El Picacho, un estudio geofísico, el reconocimiento del arroyo El Picacho y un estudio hidrológico para conocer las características de escurrimiento y los gastos máximos de la cuenca. De acuerdo con los resultados obtenidos y a las observaciones en campo, se recomienda una obra de recarga de dispersión, la cual consiste en recargar agua mediante la infiltración natural del suelo. Se sugiere el método de Tratamiento-Suelo-Acuífero (SAT), para mejorar la calidad del agua, además de contribuir a que los niveles piezométricos no sigan disminuyendo. Una segunda opción de obra de recarga es el método de galerías de infiltración, ya que con esta metodología se disminuye el porcentaje de evaporación. La geología del área donde se localiza el arroyo El Picacho está formada por conglomerados, arenas finas y arcillas. Estos materiales podrían ayudar a mejorar la calidad del agua. El volumen de escurrimiento que podría llegar a infiltrarse oscila entre 26 y 31 m³/s.

Contenido

DEDICATORIA.....	7
AGRADECIMIENTOS.....	8
RESUMEN.....	9
Capítulo 1. Introducción	15
1.2 Antecedentes.....	16
1.3 Planteamiento del problema.....	17
1.4 Justificación	18
1.5 Objetivos.....	19
Capítulo 2. Fundamentación teórica	19
2.1 Recarga artificial	19
2.2 Técnicas de recarga artificial	20
Pozos, túneles y perforaciones.....	21
Distribución.....	23
Infiltración en márgenes de ríos.....	25
Modificación de canales	25
Captación de esorrentía.....	27
Capítulo 3. Marco físico	28
3.1 Localización.....	28
3.2 Topografía.....	29
3.3 Hidrografía	31
3.4 Climatología	33
3.5 Precipitación	35
3.6 Uso de suelo y vegetación	37
3.7 Edafología	39
3.8 Fisiografía.....	41
3.9 Geología	44
3.10 Geofísica	51
Capítulo 4. Metodología	54
4.1 Recopilación y análisis de la información.....	54
4.2 Investigación y análisis de piezometría y calidad del agua	54
4.3 Identificación de sitios de recarga.....	54

4.4 Recomendación de un sitio y una posible obra de recarga	54
Capítulo 5. Resultados	55
5.1 Piezometría	55
5.2 Mapas de configuración piezométrica	57
Profundidad del nivel estático.....	57
Elevación del nivel estático	57
Evolución del nivel estático	57
5.3 Hidrógrafos	61
5.4 Calidad del agua.....	68
5.5 Cortes litológicos	71
5.6 Estudio geofísico	72
Localización de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVS)	72
Interpretación de los SEVS	74
Perfiles geo eléctricos.....	81
5.7 Reconocimiento del arroyo El Picacho	88
5.8 Estudio hidrológico	95
Parámetros de forma.....	95
Parámetros del relieve	96
Parámetros de la red de drenaje.....	98
Cauce principal	99
Número de escurrimiento	101
Coeficiente de escurrimiento	102
Tiempo de concentración	103
Precipitación media anual	105
Alturas de precipitación.....	109
Gastos máximos.....	115
5.9 Identificar sitios de recarga mediante recorridos de campo y SEVS distribuidos en el Circuito Universitario.....	118
5.10 Recomendar el sitio y una posible obra de recarga artificial a la Universidad Autónoma de Chihuahua.....	121
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	124
6.1 Conclusiones	124
6.2 Recomendaciones.....	124

Anexo I. Valores del número de escurrimiento.....	125
Anexo II. Valores de K para obtener el coeficiente de escurrimiento	127
Anexo III. Fotografías del trabajo de campo	128
Referencias	129
Curriculum Vitae	134

Índice de tablas y figuras

Tabla 1. Métodos principales y específicos de recarga artificial.....	20
Tabla 2. Precipitaciones medias mensuales	35
Tabla 3. Profundidad al nivel estático de los pozos de los años 2011 y 2023.....	55
Tabla 4. Análisis fisicoquímicos de los pozos.....	69
Tabla 5. Análisis fisicoquímicos del arroyo El Picacho.....	70
Tabla 6. Interpretación geológica del SEV 1	74
Tabla 7. Interpretación geológica del SEV 2	75
Tabla 8. Interpretación geológica del SEV 3	76
Tabla 9. Interpretación geológica del SEV 4	77
Tabla 10. Interpretación geológica del SEV 5	78
Tabla 11. Interpretación geológica del SEV 6	79
Tabla 12. Interpretación geológica del SEV 7	80
Tabla 13. Interpretación geológica del SEV 8.....	81
Tabla 14. Numero de orden de corriente.....	98
Tabla 15. Número de escurrimiento de acuerdo con la cobertura vegetal	102
Tabla 16. Número de escurrimiento del área de estudio	102
Tabla 17. Coeficientes de escurrimiento del área de estudio.....	103
Tabla 18. Tiempo de concentración del área de estudio	104
Tabla 19. Datos de precipitación de la estación compuesta.....	106
Tabla 20. Resumen de los parámetros que caracterizan la cuenca	107
Tabla 21. Precipitaciones máximas diarias.....	110
Tabla 22. Intensidad-Duración-Periodo de retorno	113
Tabla 23. Gasto unitario en función del tiempo de concentración (SARH, 1982. Pág. 74) 116	
Tabla 24. Gastos máximos obtenidos por el método de SCS	116
Tabla 25. Gastos máximos obtenidos por el método racional.....	117
Tabla 26. Resumen de los gastos máximos	118
Tabla 27. Sitios propuestos para una obra de recarga artificial.....	119
Figura 1. Almacenamiento y recuperación en acuíferos (INOWAS, 2018)	22
Figura 2. Almacenamiento, transferencia y recuperación en acuíferos (INOWAS, 2018) ...	22
Figura 3. Pozos secos (INOWAS, 2018).....	23
Figura 4. Estanques de infiltración (INOWAS, 2018)	23
Figura 5. Filtración en dunas (INOWAS, 2018)	24

Figura 6. Tratamiento suelo-acuífero (INOWAS, 2018).....	24
Figura 7. galerías de infiltración (Viola, 2019).....	25
Figura 8. Banco de infiltración (INOWAS, 2018).....	25
Figura 9. Presas de recarga (Rozikulov, 2025).....	26
Figura 10. Represas subterráneas (INOWAS, 2018)	26
Figura 11. Represas de arena (INOWAS, 2018)	27
Figura 12. Presas de recarga aguas abajo (Dillon, 2018).....	27
Figura 13. Cosecha de lluvia (INOWAS, 2018)	28
Figura 14. Mapa de localización (INEGI, 2009).....	30
Figura 15. Mapa de hidrografía (INEGI, 2010).....	32
Figura 16. Mapa el tipo de clima (INEGI, 1984).....	34
Figura 17. Grafica de precipitación media mensual de la estación 8040.....	36
Figura 18. Grafica de precipitación media mensual de la estación 8185.....	36
Figura 19. Mapa del tipo de suelo y vegetación del área de estudio (INEGI, Serie VI)	38
Figura 20. Mapa de la edafología del área de estudio (INEGI, Serie II).....	40
Figura 21. Mapa de la fisiografía del área de estudio (INEGI, 1981).....	43
Figura 22. Mapa de la geología del área de estudio (SGM, 2002)	50
Figura 23. Mapa de localización de los SEVS (Bejar, 2013)	53
Figura 24. Mapa de localización de los pozos de agua potable	56
Figura 25. Mapa de configuración de profundidad (2023)	58
Figura 26. Mapa de configuración de elevación del NE (2023).....	59
Figura 27. Mapa de configuración de evolución del NE (2011 - 2023)	60
Figura 28. Hidrógrafos de la zona norte	63
Figura 29. Hidrógrafos de la zona noroeste	64
Figura 30. Hidrógrafo de la zona noreste	65
Figura 31. Hidrógrafos de la zona centro	66
Figura 32. Hidrógrafos de la zona sur	67
Figura 33. Mapa de localización de los SEVS.....	73
Figura 34. Interpretación del SEV 1	74
Figura 35. Interpretación del SEV 2	75
Figura 36. Interpretación del SEV 3	76
Figura 37. Interpretación del SEV 4	77
Figura 38. Interpretación del SEV 5	78
Figura 39. Interpretación del SEV 6	79
Figura 40. Interpretación del SEV 7	80
Figura 41. Interpretación del SEV 8	81
Figura 42. Perfil geo eléctrico 1	83
Figura 43. Perfil geo eléctrico 2	85
Figura 44. Perfil geo eléctrico 3	87
Figura 45. Fotografía del inicio del recorrido	88
Figura 46. Fotografías del segmento destruido y conglomerado	89
Figura 47. Fotografía del segmento canalizado.....	89
Figura 48. Fotografía del segmento destruido y arcilla.....	90
Figura 49. Fotografías del segmento en buen estado	91

Figura 50. Fotografías del segmento con maleza y agua estancada	91
Figura 51. Fotografía de la fracción con agua estancada	92
Figura 52. Fotografías del canal en buen estado.....	93
Figura 53. Fotografías del concreto levantado.....	93
Figura 54. Fotografías de acumulaciones de arena.....	94
Figura 55. Fotografías del concreto abierto y levantado	94
Figura 56. Pendiente del cauce principal mediante la recta equivalente	101
Figura 57. Curvas de Intensidad-Duración-Periodo de retorno	114
Figura 58. Mapa localización de los sitios propuestos para una obra de recarga artificial	120
Figura 59. Balsa de infiltración	122
Figura 60. Galerías de infiltración. Imagen izq. (Viola, 2019). Imagen der. (PRONAR, 2004)	123
Figura 61. Método de Tratamiento-Suelo-Acuifero (SAT).....	123

Capítulo 1. Introducción

En el norte de México se localiza el estado de Chihuahua, el cual cuenta con climas como: árido, semiárido, muy árido y subhúmedo (CONABIO, 1998) y con 61 acuíferos de los cuales 14 se consideran sobreexplotados generando una problemática seria a su población, quien depende principalmente del agua subterránea (Romero-Martínez, 2020). Este estado también se divide en 67 municipios, la capital, ciudad Chihuahua se localiza en el municipio 19 denominado Chihuahua, misma que denota un importante desarrollo (Olivas, 2022).

La población Chihuahuense cada vez se ve más afectada por el desabasto de agua en 94 colonias según dan a conocer los medios periodísticos locales. El horario de abastecimiento de agua es limitado e irregular, se surte de 4 a 7 de la mañana. La Junta Municipal del Agua y Saneamiento (JMAS), organismo administrador del recurso hídrico, señaló que los horarios del suministro dependen del nivel de los tanques de almacenamiento, así como la demanda de agua, aumentando en verano debido a las altas temperaturas en la ciudad.

El principal suministro de agua de la ciudad es el acuífero Chihuahua-Sacramento con déficit importante, según informes técnicos de la Comisión Nacional del Agua (CNA) en el periodo 2015 a 2020. Otros suministros adicionales son los acuíferos Sauz-Encinillas y Tabalaopa-Aldama. Todos estos acuíferos se encuentran relacionados a la ecología y morfología del paisaje desértico propio del estado de Chihuahua, registrando mermas en las recargas por la extracción excesiva por el desarrollo urbano e industrial no planificados, deforestación de la región serrana y crecimiento demográfico (Programa Sectorial 2011-2016). Estos y otros aspectos negativos que afectan tanto a la disponibilidad de agua potable como a las obras civiles han dado origen a la creciente investigación sobre métodos y técnicas para incorporar de manera natural o inducida agua al subsuelo.

Los diferentes métodos que se utilizan para la recarga de aguas subterráneas tienen como objetivo preservar los acuíferos y mantener las condiciones geológicas originales de los mismos. Una utilidad que tienen algunos métodos de recarga inducida es eliminar ciertos contaminantes en las aguas subterráneas para poder brindar agua de mejor calidad a los habitantes de ciertas regiones.

Actualmente se cuenta con una obra de recarga en los Ojos del Chuvíscar ubicado aproximadamente al Oeste-Suroeste de la ciudad de Chihuahua (Escolero *et al.*, 2017). Sin embargo, este tipo de proyectos no es suficiente ya que el descenso del nivel freático sigue en aumento en diferentes partes de la ciudad. Por lo tanto, es importante seguir implementando un mayor número de obras de recarga en la ciudad y en zonas aledañas

con el propósito de aplazar a mayor tiempo la crisis de falta de agua en la ciudad. Dillon *et al.*, (2022) mencionaron que existen dos formas de mitigar las consecuencias de la explotación de los acuíferos, la primera es reducir la extracción de aguas subterráneas y la segunda aumentar la recarga a los sistemas acuíferos, esto ayudaría a mejorar la calidad del agua subterránea y a amortiguar la falta de agua, que genera el cambio climático.

El Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la CNA, menciona que para la selección del sitio de una obra de recarga depende la disponibilidad del terreno, el tipo de suelo, las condiciones hidrogeológicas, los recursos económicos disponibles y el impacto ambiental (CONAGUA, 2019). Custodio y Llamas (1983) señalaron que la recarga de aguas subterráneas es un proceso que existe de forma natural en un ambiente geológico. Esta se da por la precipitación que se convierte en escorrentía, la cual pasa por los estratos del suelo hasta llegar a la zona saturada. Sin embargo, en algunas ocasiones el agua no alcanza a llegar a esta zona, quedando en zona no saturada, regresando gran parte de ella a la atmósfera por medio de la evaporación y evapotranspiración de las plantas. Sallwey *et al.*, (2018), indicaron que una correcta evaluación de un sitio para establecer una recarga exitosa puede lograrse con la aplicación de combinaciones de criterios múltiples a través de Sistemas de Información Geográfica GIS. Por otra parte, cabe remarcar que Israel es un país donde se ha utilizado la recarga artificial con agua proveniente del río Jordán para mejorar la calidad de las aguas procedentes del Lago Tiberíades, esta agua se utiliza para uso agrícola. Este es uno de los proyectos documentados más antiguos que sigue funcionando aún en la actualidad (Custodio y Llamas, 1983).

1.2 Antecedentes

La recarga artificial de acuíferos es una técnica de infiltración de agua al subsuelo de manera superficial o subsuperficial, con aguas provenientes de escorrentía y agua de ríos y últimamente de agua tratada. Esta práctica se ha desarrollado a lo largo del tiempo por

distintas civilizaciones, como las dinastías Qin y Han, las cuales construyeron los sistemas conocidos como “Karez”. Estos eran canales utilizados para infiltrar agua al subsuelo para fines agrícolas. En los Andes también se desarrollaron canales para infiltrar agua, llamados “Amunas”, los cuales eran canales creados para infiltrar el agua de la lluvia al subsuelo. Y en Sierra Nevada (España) los árabes infiltraban el agua mediante una técnica conocida como “Careo” para mantener los caudales base constante (Heng *et al.*, 2020).

Con el paso del tiempo han aumentado las obras de recarga, ya que se tienen registrados más de 1200 obras en más de 62 países. Las primeras obras de recarga en America fue a finales de los 80’s en California, donde se utilizó el método de inundación (Escolero *et al.*, 2017). En algunos países europeos la recarga artificial representa la mayor cobertura de agua, por ejemplo, en Dusseldorf y Budapest dependen en un 100% del agua de recarga artificial y en Berlín el 75% (Fernández, 2005).

Algunas de las obras de recarga dentro de la República Mexicana se encuentran en San Luis Rio Colorado, Sonora, donde se llevó a cabo una obra de recarga mediante lagunas de infiltración con agua proveniente de una Planta de Tratamiento. En la región Lagunera también se llevó a cabo un proyecto de recarga por medio de lagunas de infiltración (Escolero *et al.*, 2017).

En la ciudad de Chihuahua se llevó a cabo una obra de recarga en los Ojos del Chuvíscar mediante un sistema que consiste en un muro filtrante sobre el rio Chuvíscar y una tubería ranurada localizada aguas arriba del muro. Esta tubería conduce el agua hacia un pozo de infiltración. Esta obra comenzó a operar en la temporada de lluvias del año 2004 y ha operado durante 12 años (Escolero *et al.*, 2017).

1.3 Planteamiento del problema

El aumento en la demanda de agua para satisfacer las necesidades en los diferentes sectores (publico-urbano, agricultura, ganadería, industria, etc.) ha dado como resultado un descenso en los niveles del agua subterránea, teniendo como consecuencia la construcción de pozos más profundos, lo cual eleva los costos de construcción y operación, además de

afectar en la calidad del agua. Otro factor que ha afectado a los niveles del agua subterránea es el crecimiento de la ciudad, ya que esta favorece la impermeabilización del suelo y afecta a la recarga natural de las aguas subterráneas (Sánchez, 2024).

1.4 Justificación

El acuífero Chihuahua-Sacramento, se localiza en la porción central del Estado de Chihuahua, cubre una superficie de 1,889 km², el municipio de Chihuahua abarca el 94.3% de la superficie del acuífero. Administrativamente, el acuífero corresponde a la Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el año 2010, la población existente en la superficie del acuífero era de 812,685 habitantes. La población se distribuye, Capital del Estado de Chihuahua, con una población de 809,232 habitantes y 75 localidades rurales que en conjunto albergan 3,453 habitantes (DOF, 2015). Las actividades económicas principales que son abastecidas por el acuífero Chihuahua-Sacramentos son la producción de leche de bovino, agricultura con 30,214 hectáreas (16,685 hectáreas corresponden a temporal y 13,529 hectáreas de riego), el comercio, la industria de la transformación, maquiladora y de la construcción.

La precipitación promedio anual en la ciudad de Chihuahua es de 405.6 mm, de la cual solo el 8% se infiltra, mientras que el 40.70% se evapora o se queda en las plantas. El 47.94% sale de la ciudad, los escurrimientos en los arroyos y canales y llega hasta el Río Sacramento (Orduño, 2015). La irregular distribución espacial y temporal de la lluvia en las que se puede observar que a partir de 1990 las precipitaciones en las cercanías de la ciudad de Chihuahua disminuyeron de manera considerable. Finalmente, el problema de la sequía que hace que se extraiga más agua del acuífero.

La recarga artificial es una solución factible ya que es una técnica que favorece el aumento de la recarga de los acuíferos reponiendo al manto freático de la extracción que supera la recarga, hace que sea posible mantenerlo estable y con pocas variaciones los niveles de agua almacenada en los acuíferos. Además, evita la intrusión de agua salada hacia el subsuelo continental y, por consiguiente, a las reservas de agua dulce.

1.5 Objetivos

Objetivo general

Evaluar sitios de posible recarga artificial en el Circuito Universitario Campus II (porción centro oriente del acuífero Chihuahua-Sacramento).

Objetivos específicos

1. Recopilar información de las características físicas (hidrografía, topografía, geología, edafología, uso de suelo y vegetación, provincias fisiográficas, tipo de clima y precipitación) del área de estudio.
2. Buscar y analizar la información histórica de los niveles piezométricos y calidad del agua para conocer el comportamiento hidrogeológico y geoquímico.
3. Identificar sitios de recarga mediante recorridos de campo y SEVS distribuidos en el circuito.
4. Recomendar el sitio y una posible obra de recarga artificial a la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Capítulo 2. Fundamentación teórica

2.1 Recarga artificial

La recarga artificial de acuíferos es la capacidad de poder incorporar agua de origen superficial a un acuífero con la intención de recuperar sus niveles piezométricos para incrementar el almacenamiento de agua subterránea y lograr un equilibrio entre la

demanda y la disponibilidad de las reservas de agua y poder garantizar el abastecimiento de agua potable durante el año (Custodio, 2019; Dillon, 2022; Ringleb, 2016).

Otros objetivos de la recarga de acuíferos son la restauración de los acuíferos, protección de los acuíferos ante el descenso de los niveles piezométricos, evitar inundaciones, mejorar la calidad del agua, reutilización del agua residual mediante tratamientos e incorporación al subsuelo, entre otros objetivos (Dillon, 2022).

En la mayoría de los proyectos de recarga artificial de acuíferos el agua proviene de fuentes superficiales como agua de lluvia, aguas residuales tratadas, ríos o lagos. Esto es por la disponibilidad del recurso, como el agua residual cuya disponibilidad es durante todo el año. Es importante mencionar que el agua de origen para la recarga debe de ser segura tanto como para los seres humanos como para el medio ambiente (Dillon, 2022).

2.2 Técnicas de recarga artificial

Ringleb (2016) describe 5 técnicas de recarga artificial de acuíferos, de las cuales 3 consisten en infiltrar agua al subsuelo y 2 en interceptar (Tabla 1).

Tabla 1. Métodos principales y específicos de recarga artificial

	Métodos principales	Métodos específicos
--	---------------------	---------------------

Técnicas utilizadas para infiltrar	Pozos, túneles y perforaciones	• Almacenamiento y recuperación en acuíferos (ASR: Aquifer storage and recovery) • Almacenamiento, transferencia y recuperación en acuíferos (ASTR: Aquifer storage, transfer and recovery) • Pozos Secos (Dry Wells)
	Distribución	• Estanques de infiltración (Infiltration ponds) • Filtración en dunas (Dune filtration) • Tratamiento suelo-acuífero (Soil aquifer treatment (SAT)) • Galerías de infiltración (Infiltration galleries)
	Infiltración en márgenes de ríos	• Banco de infiltración (Bank Filtration)
Técnicas utilizadas para interceptar	Modificación de canales	• Presas de recarga o tanques de percolación (Recharge weirs or percolation tanks) • Represas subterráneas (Underground dams) • Represas de arena (sand dams) • Presas de recarga aguas abajo (Recharge Releases)
	Captación de esorrentía	• Cosecha de lluvia para almacenamiento en acuíferos (Rainwater Harvesting for Aquifer Storage)

Pozos, túneles y perforaciones

- 1. Almacenamiento y recuperación en acuíferos (ASR).** El objetivo es introducir agua a un pozo para su almacenamiento y tratamiento, pudiendo extraerla con una mejor calidad. El origen del agua puede ser de ríos, lagos, agua de lluvia o agua subterránea. Es importante mencionar que se requiere un pretratamiento del agua para prevenir la contaminación del agua (INOWAS, 2018; Dillon, 2022).

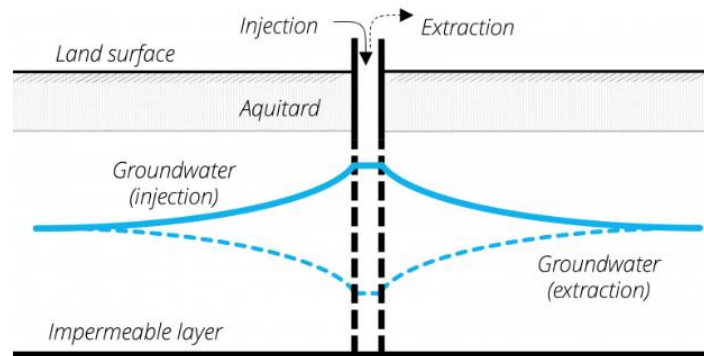


Figura 1. Almacenamiento y recuperación en acuíferos (INOWAS, 2018)

2. **Almacenamiento, transferencia y recuperación en acuíferos (ASTR).** Este método consiste en inyectar agua a un pozo y extraer agua en otro pozo con la finalidad de darle un tratamiento extra al agua mediante los procesos físicos y químicos por el cual pasa el agua a través de los materiales geológicos del subsuelo. Este método se utiliza donde la geología del subsuelo está formada por estratos gruesos y de baja permeabilidad (INOWAS, 2018; Dillon, 2018).

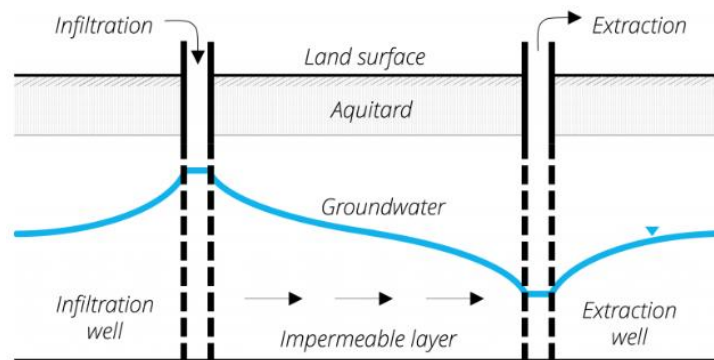


Figura 2. Almacenamiento, transferencia y recuperación en acuíferos (INOWAS, 2018)

3. **Pozos secos (dry wells).** Para esta técnica se utilizan pozos de niveles piezométricos muy profundos para que el agua se puede filtrar naturalmente hacia la zona saturada. El origen del agua puede ser de ríos, lagos, aguas pluviales o aguas residuales tratadas. Al recargarse mediante gravedad, hace que sea un método rentable (Dillon, 2022; INOWAS, 2018).

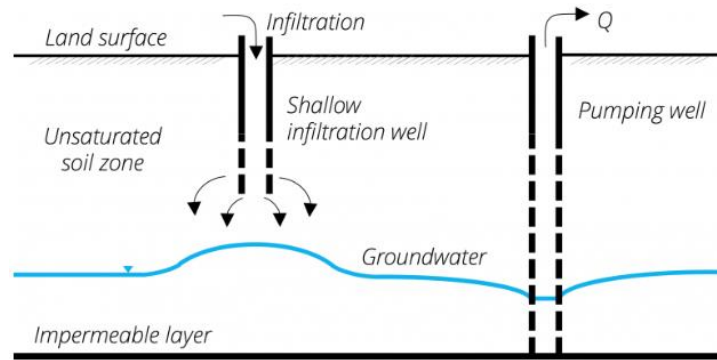


Figura 3. Pozos secos (INOWAS, 2018)

Distribución

4. **Estanques de infiltración (Infiltration ponds).** Este método consiste en infiltrar el agua hacia el acuífero a través de la zona no saturada, por medio de la desviación del agua superficial hacia cuencas y canales. La infiltración es favorecida por la construcción de diques o excavaciones. Es importante mencionar que este método se desarrolla en suelos permeables (INOWAS, 2018; Dillon, 2022).

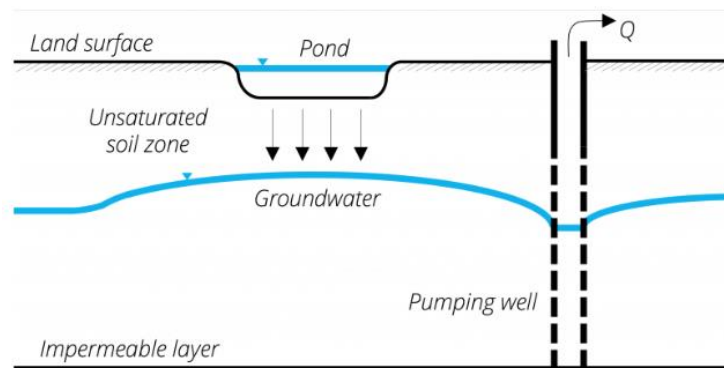


Figura 4. Estanques de infiltración (INOWAS, 2018)

5. **Filtración en dunas (Dune filtration).** El objetivo de esta técnica es infiltrar el agua mediante estanques contruidos en dunas y extraer el agua a una altitud menor con la intención de mejorar la calidad del agua, ya que el paso del agua a través de las dunas elimina contaminantes en suspensión y disueltos, mediante procesos físicos, químicos y biológicos. El origen del agua puede ser de ríos, lluvia y aguas residuales tratadas (INOWAS, 2018; Dillon, 2022).

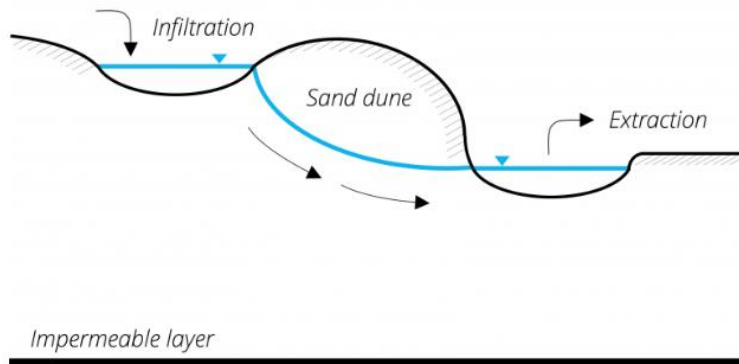


Figura 5. Filtración en dunas (INOWAS, 2018)

6. **Tratamiento suelo-acuífero (Soil aquifer treatment (SAT)).** Esta técnica es utilizada para el tratamiento natural de aguas residuales, donde el agua se infiltra de manera intermitente por medio de estanques de filtración, eliminando los patógenos a través de la zona no saturada, lo cual mejora la calidad del agua. Este método se utiliza en suelos no saturados (INOWAS, 2018; Dillon, 2022).

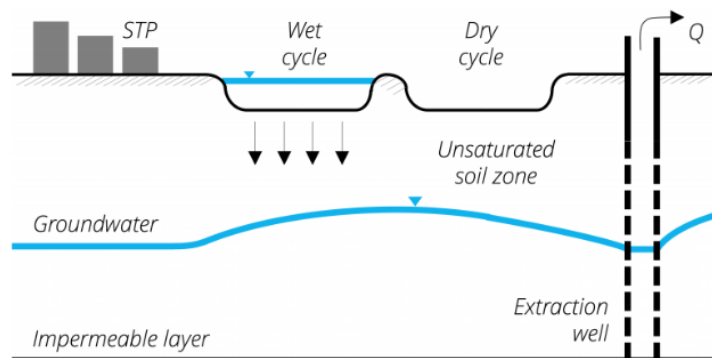


Figura 6. Tratamiento suelo-acuífero (INOWAS, 2018)

7. **Galerías de infiltración (Infiltration galleries).** El propósito de esta técnica es infiltrar agua por medio de zanjas enterradas con tuberías ranuradas o celdas de polietileno para lograr la infiltración a través de la zona no saturada (Dillon, 2022).

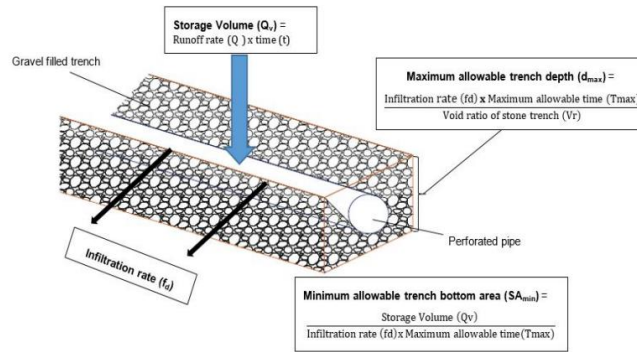


Figura 7. galerías de infiltración (Viola, 2019)

Infiltración en márgenes de ríos

8. **Banco de infiltración (Bank Filtration).** Esta técnica consiste en extraer agua mediante un pozo cercano a un río o lago con la intención de propiciar la filtración del agua superficial hacia el acuífero para dar un pretratamiento al agua y mejorar su calidad (Dillon, 2022).

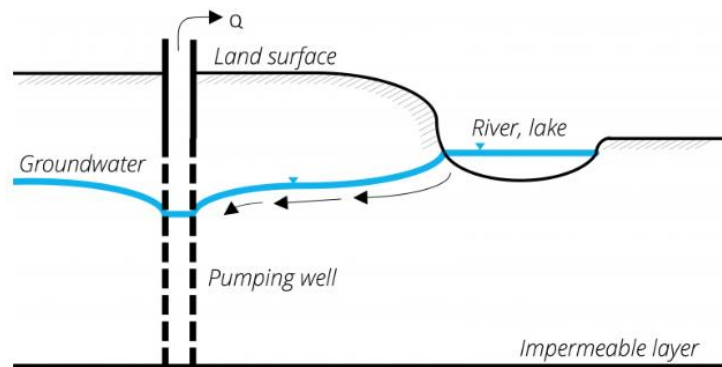


Figura 8. Banco de infiltración (INOWAS, 2018)

Modificación de canales

9. **Presas de recarga o tanques de percolación (Recharge weirs or percolation tanks).** Esta técnica se basa en construir represas en arroyos efímeros para infiltrar agua en acuíferos libres (Dillon, 2022).

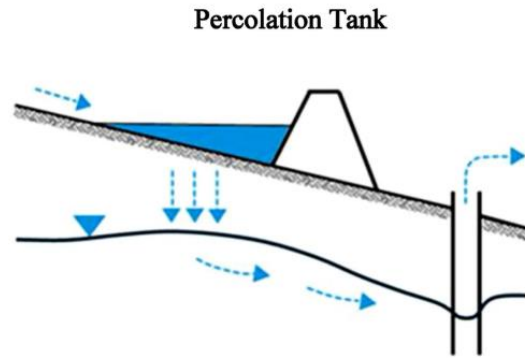


Figura 9. Presas de recarga (Rozikulov, 2025)

10. Represas subterráneas (Underground dams). Este método es utilizado en arroyos efímeros, el cual consiste en construir una barrera de baja permeabilidad anclada al basamento o a una capa de arcilla a través del lecho del arroyo con el objetivo de retener las crecidas de agua y aumentar el nivel freático. Esta técnica es utilizada en la ganadería y para uso doméstico (INOWAS, 2018; Dillon, 2022).

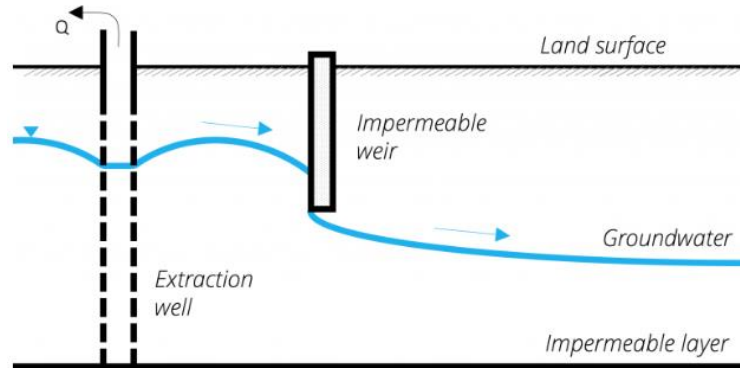


Figura 10. Represas subterráneas (INOWAS, 2018)

11. Represas de arena (sand dams). Este método consiste en contener los sedimentos de las crecidas de agua en los arroyos efímeros, creando un "acuífero" que pueda almacenar agua en las épocas de lluvia. Los diques de arena pueden favorecer la disponibilidad de agua en las estaciones secas, además de reducir la evaporación (INOWAS, 2018; Dillon, 2022).

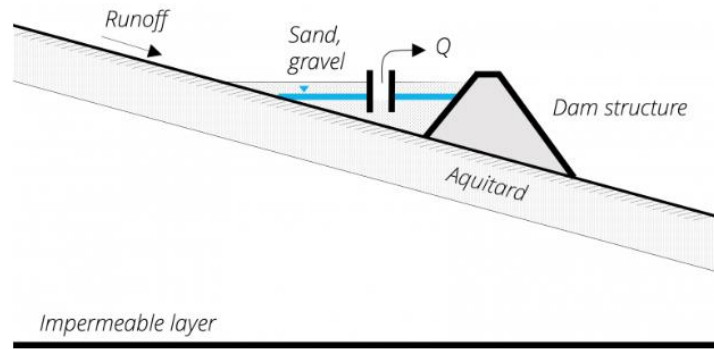


Figura 11. Represas de arena (INOWAS, 2018)

12. Presas de recarga aguas abajo (Recharge Releases). Esta técnica es en arroyos efímeros donde las represas retienen el agua de las crecidas y el agua es liberada de manera paulatina para nivelar la infiltración en los acuíferos subyacentes (Dillon, 2022).

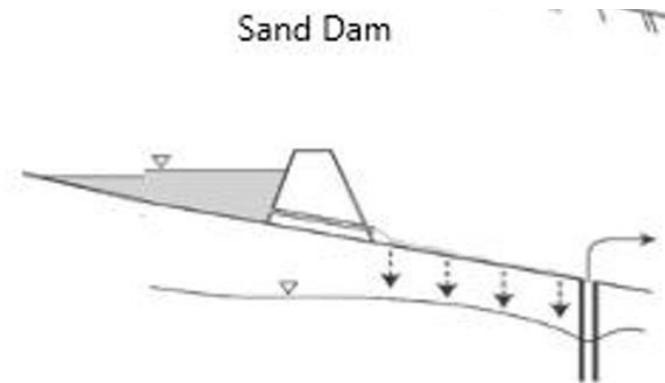


Figura 12. Presas de recarga aguas abajo (Dillon, 2018)

Captación de escorrentía

13. Cosecha de lluvia para almacenamiento en acuíferos (Rainwater Harvesting for Aquifer Storage). Es la captación de la escorrentía superficial acumulada en los tejados mediante zanjas, drenaje inverso o cualquier método que necesite poco espacio. El agua colectada puede ser utilizada para riego, almacenamiento en tanques o infiltración (Ringleb, 2016; INOWAS, 2018).

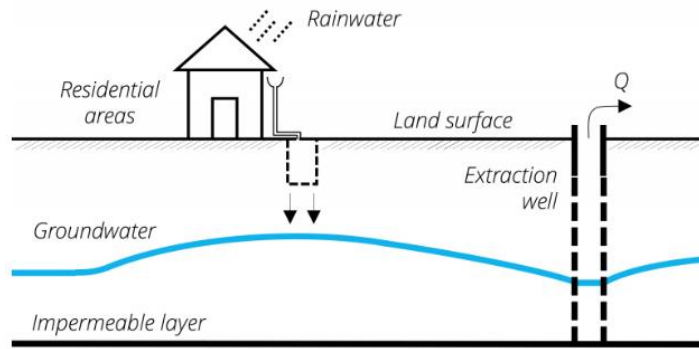


Figura 13. Cosecha de lluvia (INOWAS, 2018)

Capítulo 3. Marco físico

3.1 Localización

El área de estudio se localiza al norte de la República Mexicana, en el estado de Chihuahua, en la ciudad que recibe el mismo nombre. En la porción noroeste se encuentra la zona de interés (Figura 14), la cual tiene una extensión de 38.6 km².

La zona en donde se pretende realizar una obra de recarga de aguas subterráneas se localiza dentro del Circuito Universitario Campus II, el cual se ubica dentro de la mancha urbana en la fracción noroeste de la ciudad. El área del Campus corresponde a 2 km² y las vías de acceso son por medio de la Av. Homero en sentido Este-Oeste, el Periférico de la Juventud en sentido Sur-Norte y por la Vialidad Los Nogales en sentido Norte-Sur. Las colonias colindantes son el Fraccionamiento Campo Bello y Fraccionamiento Cordilleras hacia el poniente y en sentido opuesto colinda con el Fraccionamiento Paseos de Chihuahua hacia el oriente.

Dentro del Campus Universitario II se encuentra la Facultad de Ingeniería (FING), Facultad de Ciencias Químicas (FCQ), Facultad de Contaduría y Administración (FCA), Facultad de Medicina y Ciencias Biomédicas (FMYCB), Facultad de Enfermería y Nutriología (FEN) la Facultad de Ciencias de la Cultura Física (FCCF). En el interior del Campus Universitario II también se localiza el Estadio Olímpico de la UACH y la Glorieta de los Universitarios Ilustres.

3.2 Topografía

El rango de elevación topográfica del área de estudio oscila entre 1460 y 1970 msnm. De acuerdo con sus elevaciones, el INEGI divide a la zona como sierra alta con mesetas en la porción oeste y llanura aluvial de piso rocoso o cementado en la fracción oriental. La elevación en la sierra oscila entre 1560 y 1970 msnm, mientras que la altura en la llanura se encuentra entre 1460 y 1560 msnm. En el Circuito Universitario Campus II la altura oscila entre 1490 y 1530 msnm.

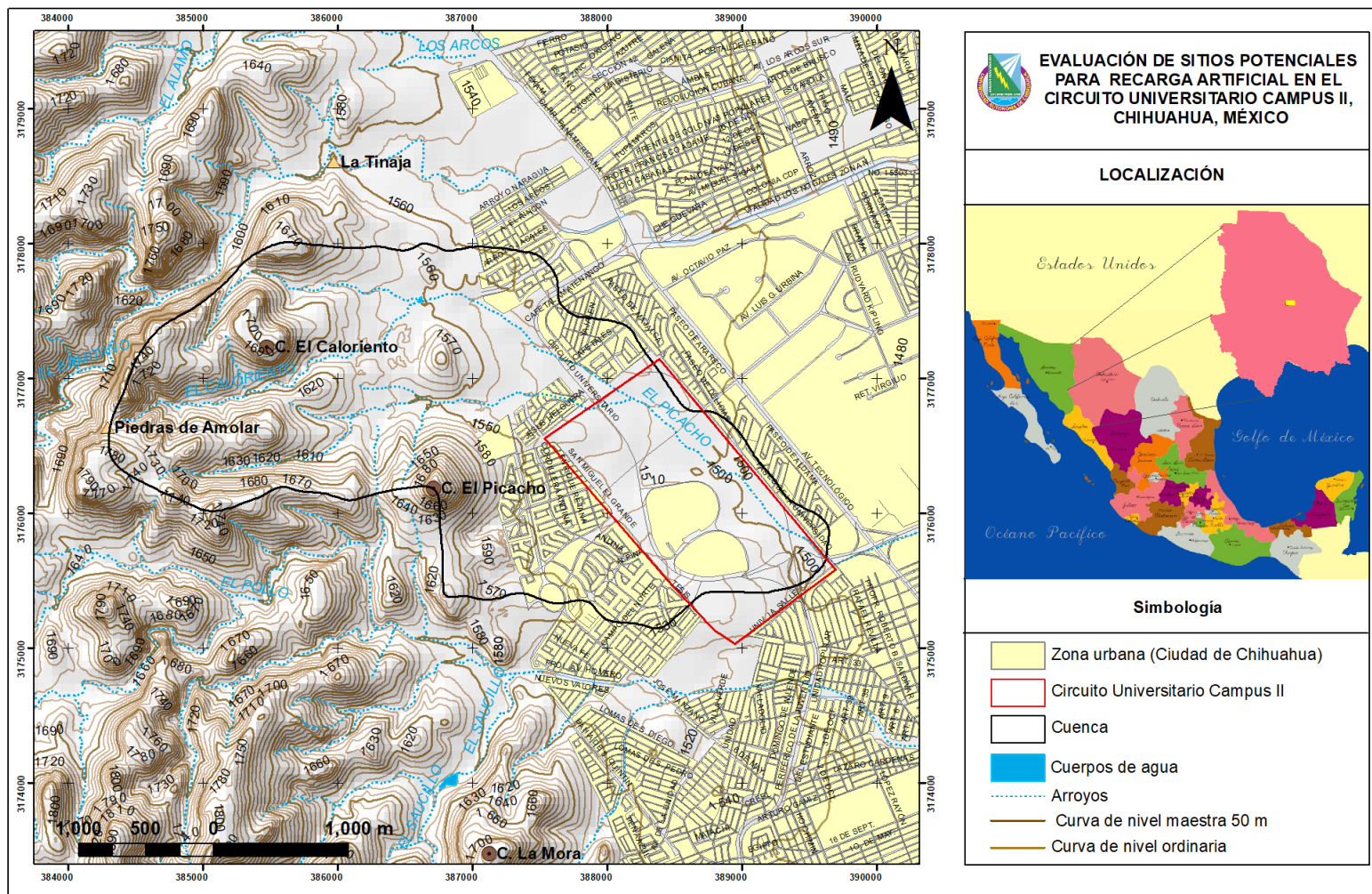


Figura 14. Mapa de localización (INEGI, 2009)

3.3 Hidrografía

Dentro del área de estudio se localizan 6 corrientes de agua intermitentes que llevan por nombre El Caloriento, El Picacho, El Ermitaño, El Pollo, Embudo Chico y El Mimbres. En la Figura 15 se observa que el Caloriento y El Picacho se encuentran dentro de la cuenca hidrológica, mientras que El Ermitaño, El Pollo, Embudo Chico y El Mimbres se localizan fuera de la cuenca. Los tributarios de cada uno de estos arroyos forman un drenaje detrítico dentro del área de estudio.

El Caloriento nace en la sierra alta, en Piedras de Amolar y sigue su curso a través del Cerro El Caloriento para luego pasar por un costado del Fracc. Alleza Norte y mantenerse por la Avenida que lleva el mismo nombre. El arroyo tiene una longitud de 4,595.73 metros y en algunos tramos se encuentra canalizado. Este arroyo llega hasta el Estadio Universitario donde intercepta con el arroyo El Picacho. A partir de este punto el Caloriento pierde su nombre para llamarse El Picacho. Por otro lado, el Picacho nace de forma paralela al Caloriento, siguiendo su curso por la Av. Los Nogales, pasando por un costado del Fracc. Santa Clara y Quintas Sebastián, hasta entrar al Circuito Universitario Campus II y unirse con el Caloriento en la parte posterior del Estadio Universitario. El arroyo El Picacho tiene una longitud de 7,852.22 metros.

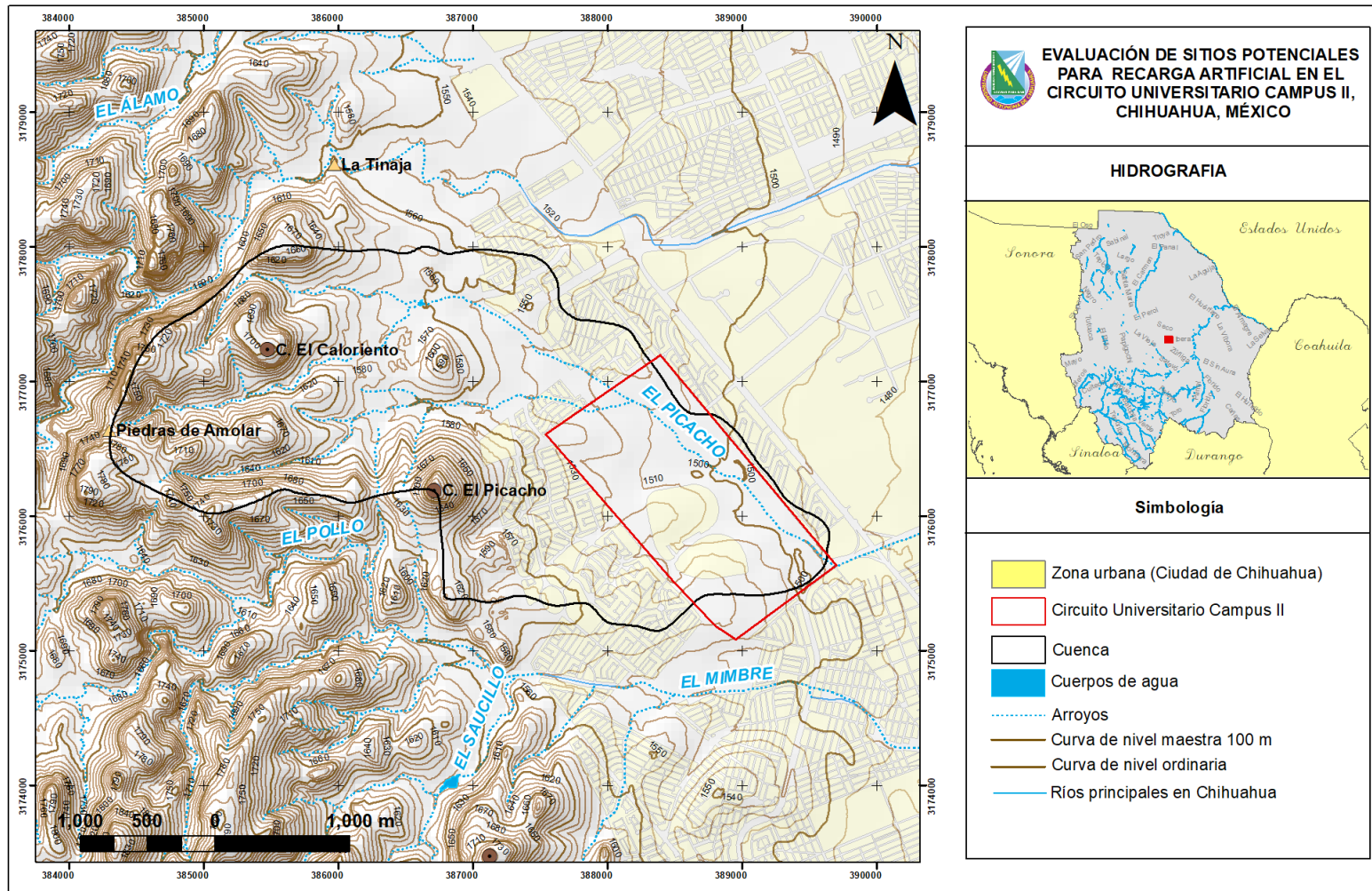


Figura 15. Mapa de hidrografía (INEGI, 2010)

3.4 Climatología

Según la clasificación de climas de Köppen modificado por Enriqueta García para la República Mexicana, el área de estudio se ubica dentro de los climas de tipo BS el cual corresponde climas semisecos con lluvias en verano y escasas durante el año. Una pequeña porción del área de estudio corresponde al tipo de clima BSokw y la mayor parte de la zona pertenece al clima BS1kw (Figura 16).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024) describe los climas BSokw y BS1kw como áridos y templados con temperaturas que oscilan entre 12°C y 18°C. Las temperaturas más bajas se encuentran entre -3°C y 18°C.

La CONAGUA realizó un análisis climatológico con las estaciones Presa El Rejón, Majalca, San Antonio, Universidad, Presa Chihuahua y La Mesa, donde se da a conocer que la temperatura media anual es de 15.9°C. El Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua (IMPLAN) menciona que la temperatura media anual es de 18.4°C con un promedio máximo de 26.8°C y mínimo de 18.5°C. Según la CONAGUA los meses donde la temperatura alcanza los mayores valores se presentan de mayo a septiembre, mientras que los valores más bajos se presentan de diciembre a febrero.

.

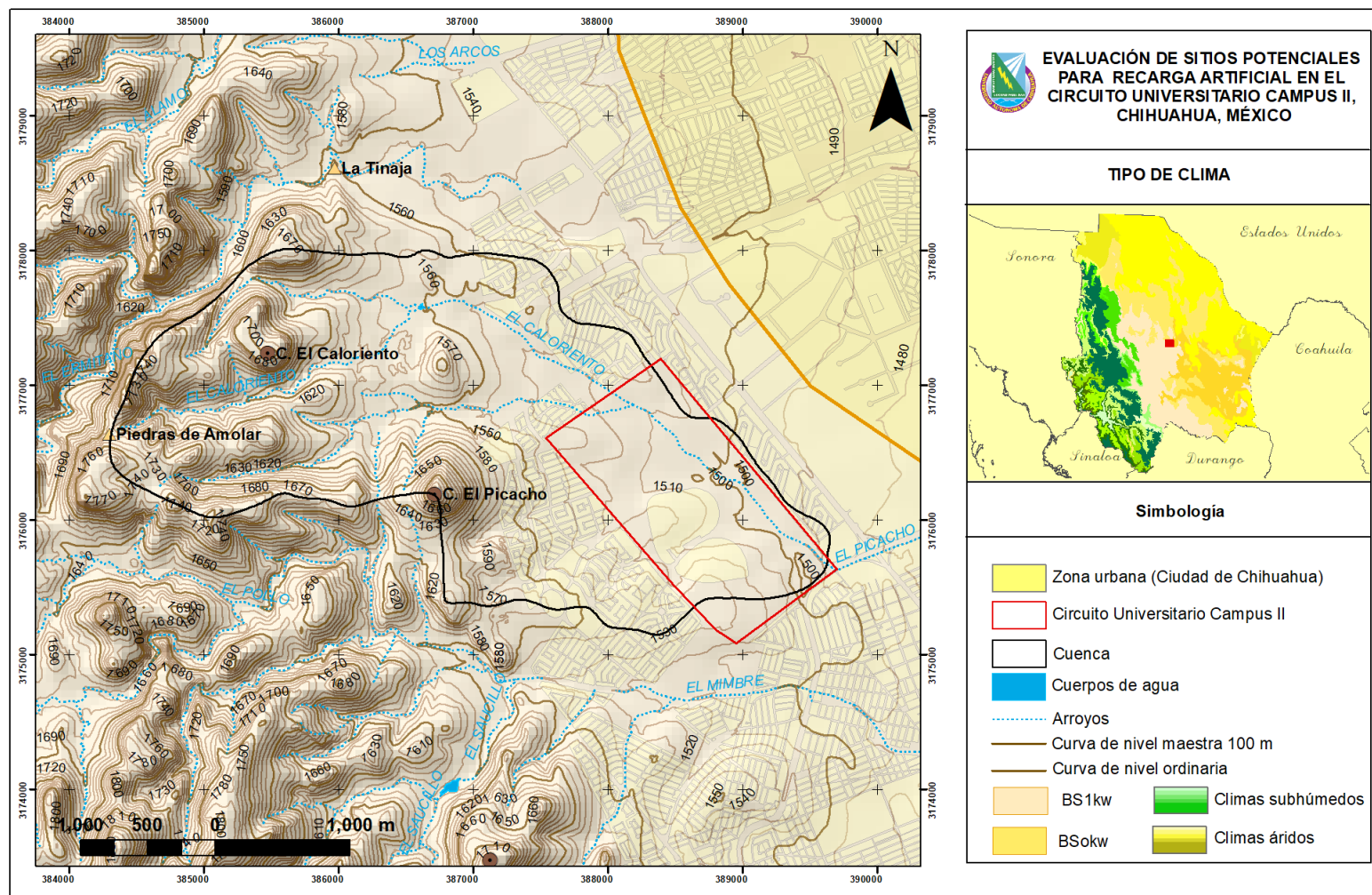


Figura 16. Mapa el tipo de clima (INEGI, 1984)

3.5 Precipitación

De acuerdo con los registros de precipitación del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el área de estudio tiene una precipitación media anual de 372 mm. Teniendo los registros de precipitación más altos en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre con valores que oscilan entre 30 y 104 mm. El periodo con menor precipitación comprende los meses de noviembre a mayo, con precipitaciones que oscilan entre 5 y 18 mm. Las Figuras 17 y 18 muestran que el periodo de lluvias comienza en junio y finaliza en octubre. En la Tabla 2 se muestran los registros de la precipitación media mensual de las estaciones climatológicas 8040 y 8185.

Tabla 2. Precipitaciones medias mensuales

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Estación 8040	5.7	4.0	4.6	7.1	13.2	34.3	86.2	82.8	59.3	21.1	10.3	9.6
Estación 8185	14.2	5.7	6.3	8.4	17.5	30.5	95.8	103.7	77.7	28.1	7.2	10.2

Es importante mencionar que el IMPLAN describe que las precipitaciones en la ciudad generalmente son lluvias torrenciales, las cuales provocan inundaciones y siniestros por las irregularidades del drenaje pluvial. Asimismo, las corrientes de agua son arroyos torrentosos, los cuales no permiten la infiltración del agua para la recarga del acuífero, si no que el agua sale de la ciudad hacia Aldama por medio del Río Sacramento

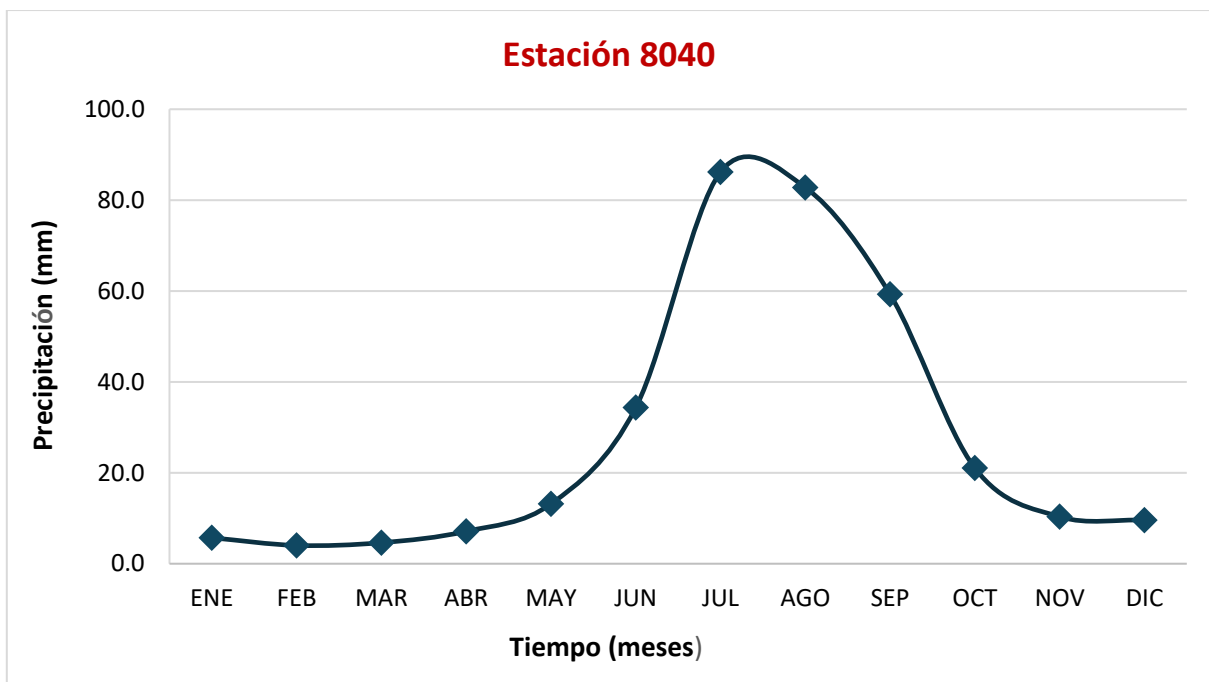


Figura 17. Grafica de precipitación media mensual de la estación 8040

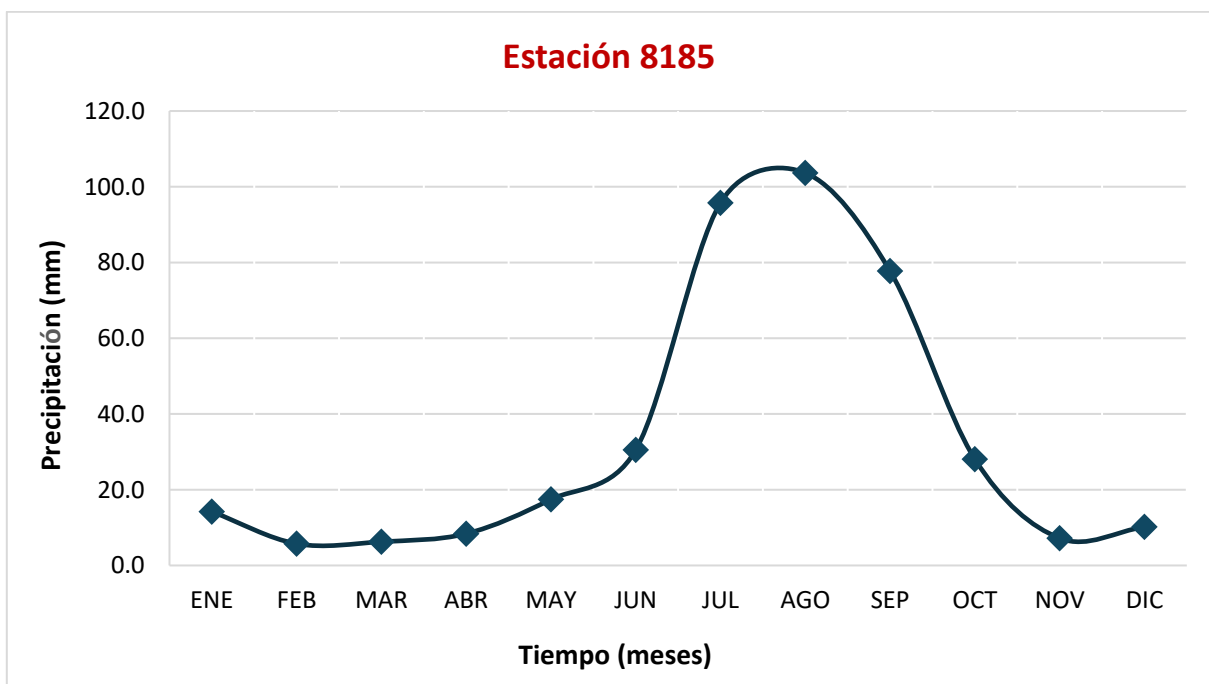


Figura 18. Grafica de precipitación media mensual de la estación 8185

3.6 Uso de suelo y vegetación

El área de estudio está formada por 52 % de zona urbana y del 48 % de matorral xerófilo (Figura 19). El INEGI (2003) describe a los matorrales como una vegetación arbustiva formada por ramificaciones que comienzan desde la base del tallo (cerca del suelo) y con alturas inferiores a 4 m. Los matorrales xerófilos logran adaptarse y resistir a la sequía y presentan una extensa variedad de formas, como el matorral desértico micrófilo y el matorral desértico rosetófilo. Un ejemplo de este tipo de matorral es la gobernadora, el cual es capaz de soportar largos periodos de sequía por su capacidad de cubrir sus hojas con un tipo de cera o resina para protegerlas de la deshidratación (CONABIO, 2014).

Dentro de la clasificación de los matorrales xerófilos se encuentran la gobernadora (*Larrea tridentata*), el mezquite (*Prosopis glandulosa*), el hojazen (*Flourensia cernua*), el sotol (*Dasyllirion texanum*), el ocotillo (*Fouquieria splendens*), la candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*), la jojoba (*Simmondsia chinensis*), el guayule (*Parthenium argentatum*), el sangregado (*Jatropha dioica*) y la palmilla (*Yucca spp*). Cada uno de ellos es utilizado para diferentes propósitos, unos como herramienta medicinal o construcción, y algunos otros como industrial y ceras (CONABIO, 2014).

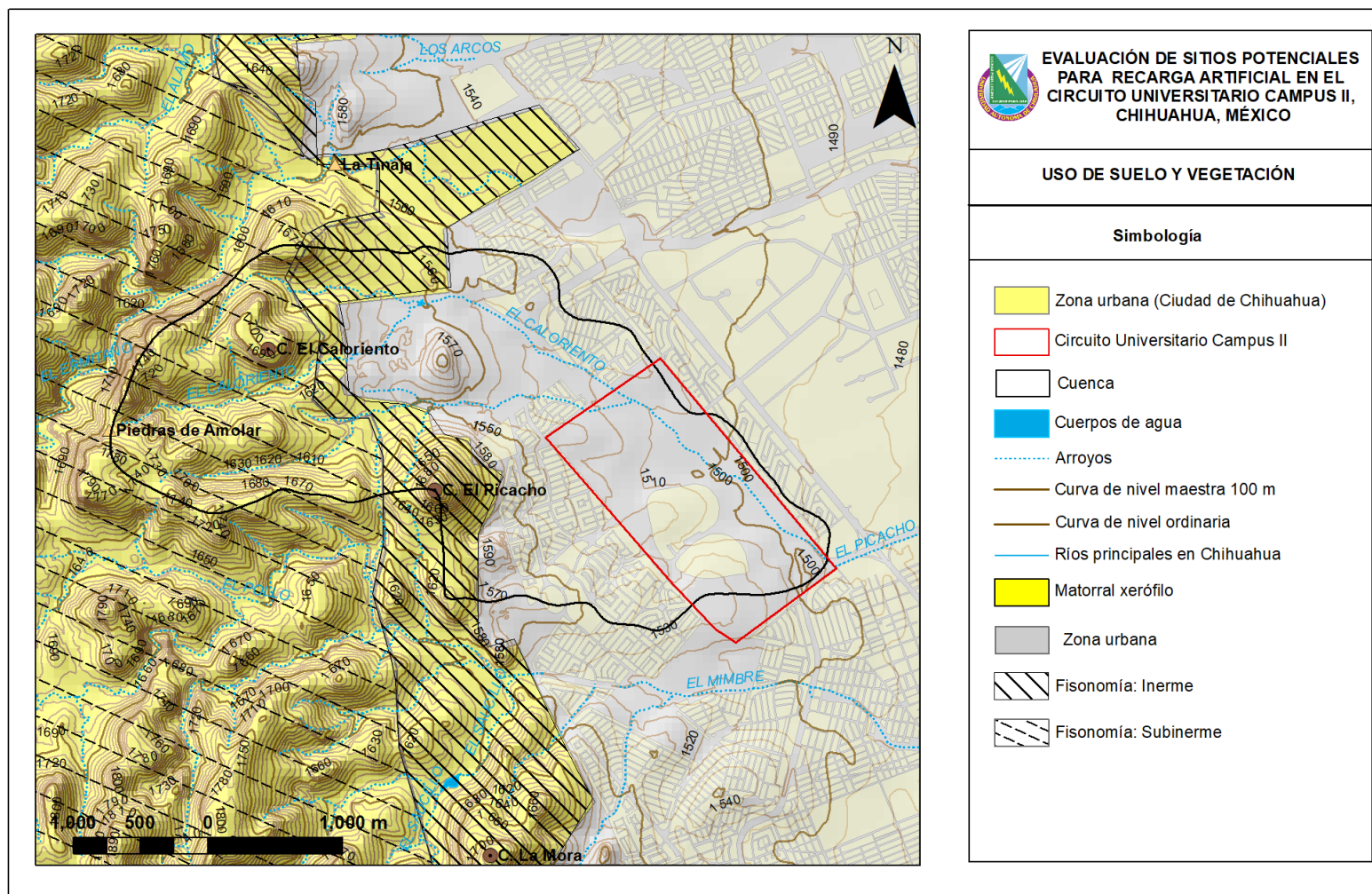


Figura 19. Mapa del tipo de suelo y vegetación del área de estudio (INEGI, Serie VI)

3.7 Edafología

El tipo de suelo del área de estudio está conformado por Cambisol en la parte central, Leptosol cubriendo mayormente la porción oriental y Luvisol en una pequeña fracción en el centro (Figura 20).

Los Cambisoles son suelos jóvenes con acumulaciones de calcio, hierro, aluminio, manganeso, arcilla y materia orgánica. Se forman a partir de materiales de textura media a fina y derivados de distintos tipos de rocas. El intemperismo es de ligero a moderado (INEGI, 2014; CONABIO, 2014).

El Leptosol está formado por más del 80% de piedras o gravas. Son suelos someros, ya que su espesor es menor a 25 cm. Al ser suelos poco profundos limita el uso de la agricultura, por lo cual es más conveniente mantenerlos con la vegetación de origen. Generalmente se encuentra al pie de la sierra madre occidental y en el Desierto Chihuahuense (INEGI, 2014; SEMARNAT, 2019).

Los Luvisoles se forman a partir de una gran diversidad de materiales no consolidados (terrazas aluviales, depósitos glaciales, eólicos, aluviales y coluviales). Son de color rojos, grises o pardos claros. Generalmente tienen un alto contenido de arcilla, producto de la migración de arcilla de alta actividad. Se clasifican dentro de los suelos más fértiles (INEGI, 2014; CONABIO, 2014; SEMARNAT, 2019).

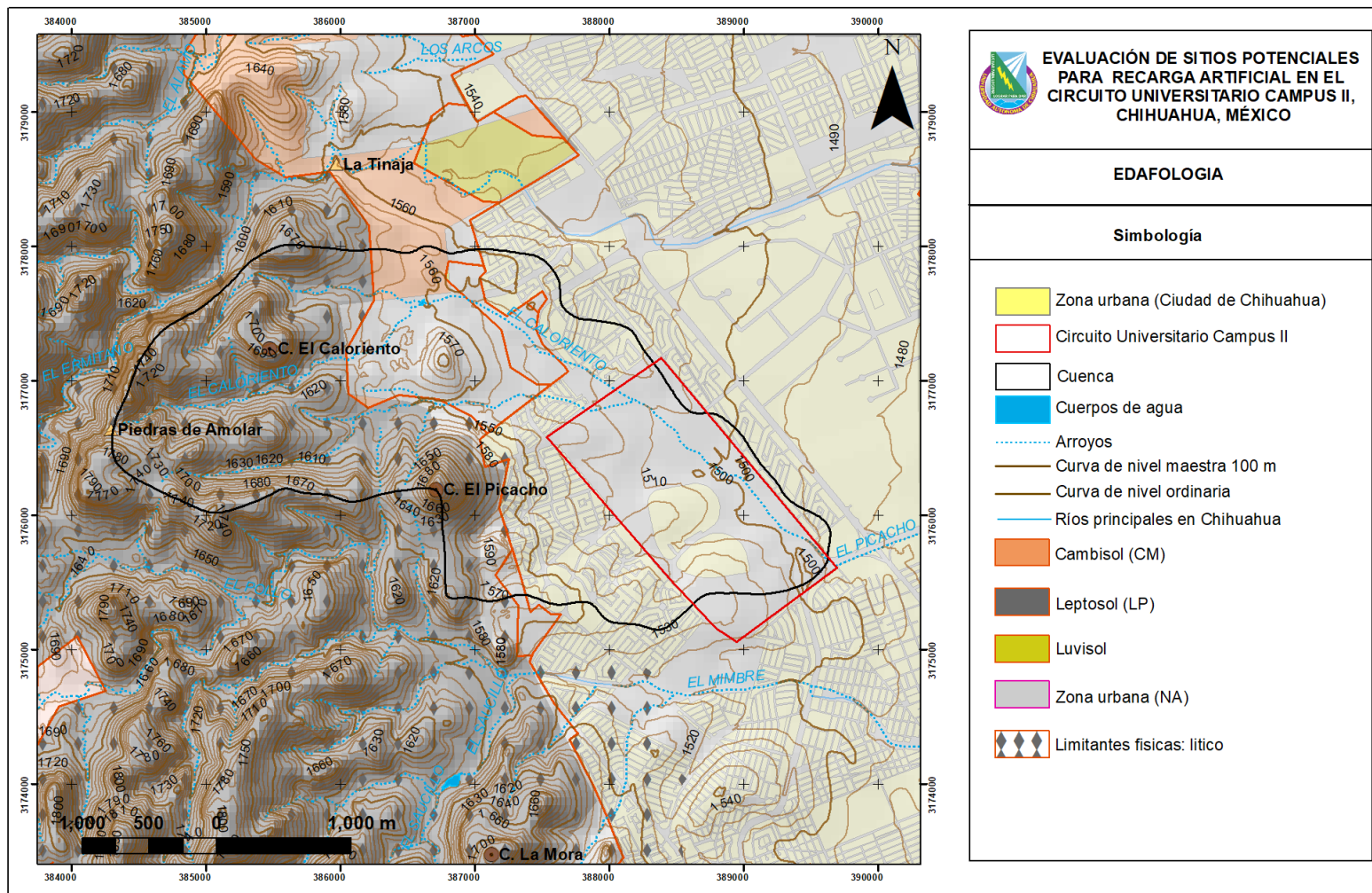


Figura 20. Mapa de la edafología del área de estudio (INEGI, Serie II)

3.8 Fisiografía

La zona de estudio se encuentra en las 2 provincias fisiográficas que dividen al estado de Chihuahua, la Sierra Madre Occidental y Sierras y Llanuras del Norte.

La Sierra Madre Occidental se divide en 5 subprovincias, Sierras y Cañadas del Norte, Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses, Gran Meseta y Cañadas Duranguenses, Sierras y Llanuras de Durango y Sierras y Llanuras Tarahumaras. En esta última subprovincia se encuentra el área de estudio. La provincia Sierras y Llanuras del Norte se divide en 4 subprovincias, Llanuras y Médanos del Norte, Llanuras y Sierras Volcánicas, Sierras Plegadas del Norte y Del Bolsón de Mapimí. La zona de estudio se ubica en esta última subprovincia (Figura 21).

Provincias fisiográficas

La Sierra Madre Occidental es un gran sistema montañoso que cubre de forma diagonal la zona occidental del estado de Chihuahua. La forma material volcánico con espesores que varían entre 1,500 a 1,800 m. Hacia la porción occidental alcanza elevaciones de hasta 3,300 m, mientras que en la porción orientan descende gradualmente hacia las zonas planas del centro del estado. Hacia el oeste predominan las mesetas y las mesetas con cañones (INEGI, 1997; 2003).

La Provincia Sierras y Llanuras del Norte se caracteriza por tener sierras bajas y abruptas. Estas sierras están separadas por bajadas y llanuras con relleno aluvial. Esta está formada por bolsones, esto quiere decir que los drenajes de las cuencas son internos. Las cuencas están rodeadas de sierras de las cuales se despliegan las bajadas aluviales sobre las llanuras centrales (INEGI, 1997; 2003).

Subprovincias fisiográficas

La Subprovincia Sierras y Llanuras Tarahumaras se forma por tres grupos de sierras, el primero abarca desde Nuevo Madera hasta la Laguna Los Mexicanos, el segundo grupo está formado por las sierras La Montosa-Las Tunas-El Rosal y al tercer grupo lo conforma la sierra El Nido. Las topoformas de esta subprovincia se han clasificado como sierra alta asociada con mesetas y separadas entre sí por valles y llanuras (INEGI, 2003).

La subprovincia Del Bolsón de Mapimí se caracteriza por estar formada por llanuras aluviales y las bajadas son el tipo de relieve que predominan en la subprovincia, aunque también se presentan pequeñas sierras escarpadas y plegadas, al igual que lomeríos

escarpados y ramificados con orientación norte-sur. Aunque las fuentes superficiales de agua son muy escasas en esta subprovincia, el río Florido y sus afluentes, tributarios del río Conchos recorren la parte central de la subprovincia. Los sistemas de topoformas en el área de estudio es llanura aluvial de piso rocoso o cementado (INEGI, 2003).

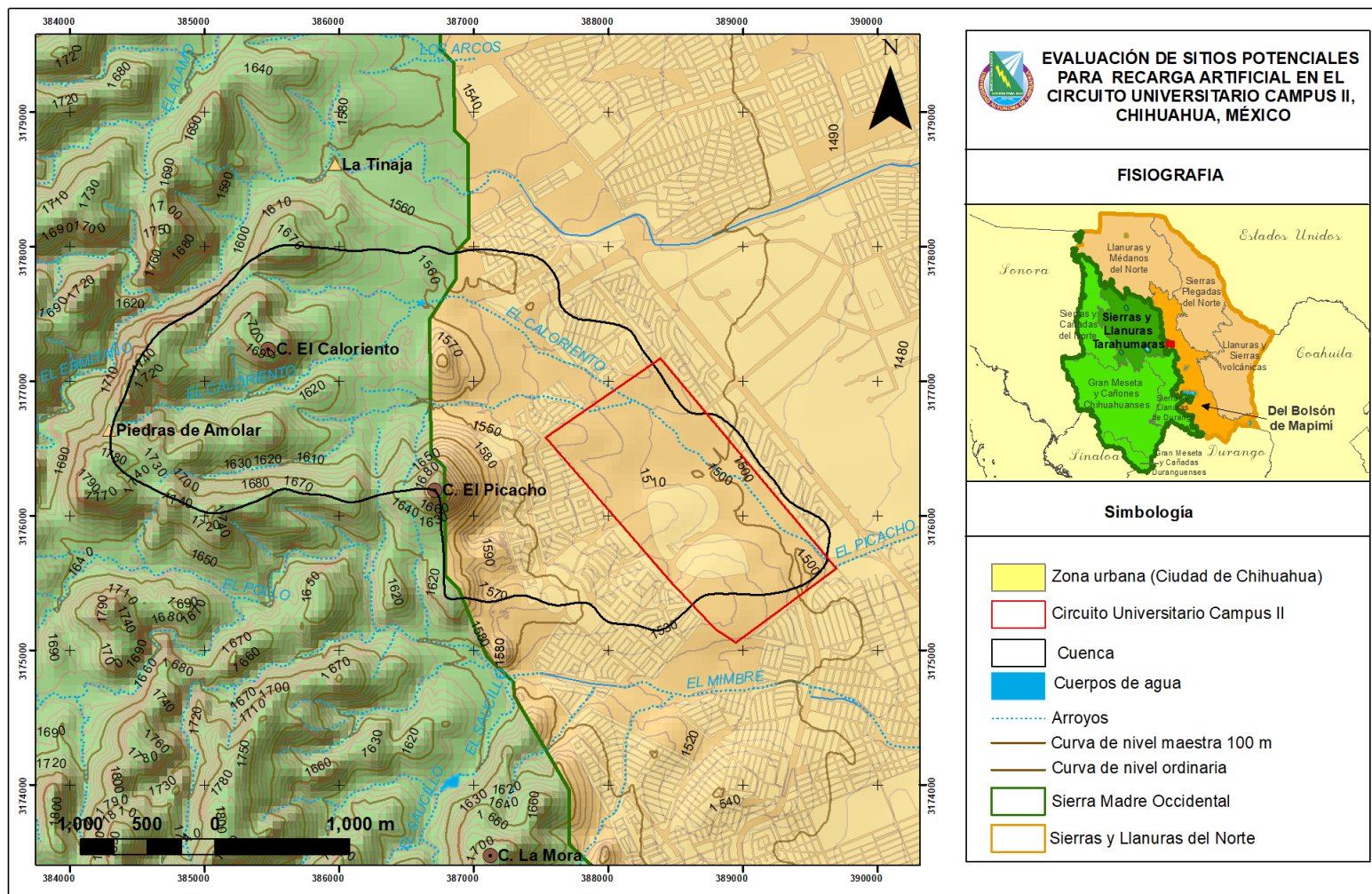


Figura 21. Mapa de la fisiografía del área de estudio (INEGI, 1981)

3.9 Geología

La carta geológica H13-C66 Chihuahua escala 1:50 000 muestra que la geología del área de estudio está conformada en superficie por material de origen sedimentario como Conglomerado (**Qho Cgp**) arena y limo (**Qho ar-lm**) del Cuaternario en la porción oriental de la zona de estudio, la cual pertenece al área urbana, mientras que en la sección occidental afloran rocas de origen ígneo, tales como Ignimbrita (**Ig**) Riolita (**ToR**), Toba Riolítica (**ToIg**), Basalto-Andesita (**TmB-A**) y Porfido Riolítico (**ToPR**). En la Figura 22 se muestran estas unidades.

En la carta geológica del área de estudio, el SGM trazo una sección geológica que atraviesa de manera transversal en sentido SW-NO desde La Boquilla hasta Loma Larga con una longitud de 6 km. En esta sección se pueden observar unidades de origen sedimentario, tales como la Formación Las Vigas Lutita-Arenisca (**Kvh Lu-Ar**), Formación La Virgen Dolomita-Yeso (**Khb Do-Y**), Formación Cupido Caliza (**Kbap-Cz**), Formación Peña Lutita-Caliza (**Kap LuCz**), Formación Walnut Caliza – Lutita (**Ka CzLu**), Formación Edwards Caliza (**Kas Cz**) y Conglomerado oligomíctico. Formación Sacramento (**Km Cgo**). Estas unidades se presentan en superficie a 20 km al suroriente de la ciudad de Chihuahua, en la Sierra Azul. En las inmediaciones meridionales de Los Ojos del Chuvíscar. Algunas también se pueden apreciar en la Sierra Nombre de Dios y en la localidad Sacramento.

Mesozoico

Cretácico inferior

La unidad más antigua es **Lutita-Arenisca Formación Las Vigas (Kvh Lu-Ar)**, a la cual Burrows (1910) describe como una alternancia de areniscas calcáreas y lutitas de color gris, verde y rojizo, con estratos de espesor medio. Está formada por una alternancia de lutitas de 10 cm de espesor promedio, con intercalaciones de estratos de calcarenitas de color gris verdoso en capas de 20 cm de espesor. La unidad se puede apreciar en la porción central del estado de Chihuahua. Se estima que el depósito de esta Formación sucedió sobre mares someros epicontinentales, muy cercanos a tierras emergidas (SGM, 2001).

Humphrey (1956), detallo la **Formación La Virgen Dolomita-Yeso (Khb Do-Y)** como una secuencia de yeso, anhidrita y caliza del Cretácico inferior. La localidad tipo es el Potrero de la Virgen, el cual se encuentra a 10 km al noreste de Cuatro Ciénegas, Coahuila, en la parte centro oriental del estado de Coahuila. Esta Formación se caracteriza por estar compuesta por estratos de dolomitas de color oscuro con estratos de 30 a 60 cm de espesor con

delgados horizontes de yeso. La sobreyace la Formación Cupido y la subyace la Formación Las Vigas (SGM, 2001).

Imlay (1937) describió la **Formación Cupido Caliza (Kbap-Cz)** como una caliza de color gris de estratificación gruesa, media y delgada, que esta sobre la Formación Taraises y por debajo de la Formación La Peña. La localidad tipo fue descrita en la pared norte del cañón del Mimbre a 60 km al sureste de Parras de la Fuente, Coahuila. Esta unidad está formada por calizas de color gris a gris oscuro, en capas de estratificación media de 50 cm de espesor con gran contenido fosilífero y en algunas partes se encuentran bandas de pedernal. La Formación tiene un espesor de 100 m aproximadamente. Este tipo de sedimentación es característica de un área dominada por los mares y que tuvo una ligera subsidencia en la cual se depositaron sedimentos calcáreos, por lo que se estima que su depósito ocurrió en mares someros, cálidos, muy agitados y con una basta cantidad de oxígeno que dio origen al desarrollo de bancos biógenos (SGM, 2001).

La **Formación Peña Lutita-Caliza (Kap LuCz)** se caracteriza por estar conformada por un cuerpo litológico formado por dos unidades, el superior compuesto por lutitas y calizas y el inferior por calizas de plataforma (Imlay, 1936). Sin embargo, Humprey (1949), propuso que sólo se usara este nombre, para la parte superior de la unidad. Está formada por lutitas grises y negras con intercalaciones de calizas de color oscuro en estratos delgados de 10 cm de ancho (SGM, 2001).

Hill (1981) describió la **Formación Walnut Caliza – Lutita (Ka CzLu)** como una secuencia de lutitas y calizas laminares con coquinas de *Exogyra Texana* y *Gryphaea, sp.*, que se encuentran sobre las areniscas de la Formación Paluxy (Glen Rose). Esta unidad se puede observar en las inmediaciones orientales de la ciudad de Chihuahua, en la Sierra de Sacramento, donde es sobreyacida de forma discordante por andesitas (TeA) y tobas riolíticas (ToTR). Esta formación también se puede apreciar en la localidad Minillas (20 km al oeste de la ciudad de Chihuahua). En esta área la formación está cubierta de manera discordante por andesitas (TpaA) y brechas volcánicas andesíticas (TpaBvA). Esta formación se caracteriza por estar conformada por una caliza de color gris con bioclastos, peletoides y ostrácodos. Los estratos van desde 20 hasta 30 cm y se conforman con intercalaciones de horizontes de lutitas calcáreas de color gris oscuro o de limolitas calcáreas de color gris verdoso en capas de 5 cm de espesor. El espesor máximo reconocido es de 120 m. Esta formación sobreyace de forma concordante a las calizas de la Fm. Tamaulipas Superior (KaCz) y subyace a las calizas de la Fm. Edwards (KaCz). Por la existencia de calizas arcillosas en capas delgadas y margas laminares con contenido de amonitas y equinoideos, se estima

que el depósito de la Formación Walnut se desarrolló en mares de cuenca pelágicos con escasos niveles energéticos (SGM, 2001).

La **Formación Edwards Caliza (Kas Cz)** fue propuesta por Hill y Vaughan (1988), quienes describieron un potente cuerpo de rocas carbonatadas de aguas someras, definiendo como localidad tipo los afloramientos de Boston Creek en Austin, Texas. Esta unidad se observa al oriente de la ciudad de Chihuahua, en la sierra Nombre de Dios. Está formada por una caliza de color pardo, que intemperiza a color gris claro. Se encuentra en estratos gruesos a masivos con presencia de nódulos y lentes de pedernal. A esta unidad la subyace de manera concordante la Fm. Walnut (KaCz-Lu) y la sobreyace de forma discordante el conglomerado oligomítico (KmCgo), andesitas (TeA), riolitas (del Paleoceno (KmTpa(?) R) y del Oligoceno (ToR) y tobas riolíticas (ToTR). Por sus características litológicas, tiene origen en un ambiente de depósito de plataforma abierta (SGM, 2001).

Hacia el sureste del Cerro El Picacho, cubierto por tobas riolíticas del Paleógeno (ToTR) se encuentra un **Conglomerado oligomítico Formación Sacramento (Km Cgo)**, el cual Torres J. A. (1991) informalmente da el nombre de Conglomerado Sacramento. Esta unidad se observa a 10 km al noreste del Poblado Sacramento, Chihuahua y está formada solamente por fragmentos de rocas calcáreas que van de subredondeados a subangulosos con tamaños que oscilan entre 1 a 20 cm de diámetro. Los estratos van de 1 a 1.5 m de ancho y su espesor máximo reconocido es de 50 m. En la sierra de Sacramento sobreyace a la Formación Edwards (KaCz) y la cubre de manera discordante material piroclástico (TpaPc) y riolitas del Cretácico (KmTpa(?) R) y del Oligoceno (ToR). Esta formación es propia de un depósito de facies continentales (SGM, 2001).

Oligoceno

La **toba riolítica (ToTR)** comprenden tobas de ceniza y tobas líticas de composición riolítica. Se encuentra distribuida en la porción oriental de la zona de estudio. Esta unidad se encuentra aflorando en la localidad La Tinaja, en la porción centro-oeste del área de estudio. La roca principal que forma esta unidad está representada por tobas de ceniza de composición riolítica de color blanco lechoso a gris claro, de textura piroclástica y estructura compacta y masiva. El análisis petrográfico realizado por el SGM muestra vidrio volcánico con un contenido total del 75% de la roca, el cual está formando la matriz de la roca y esta desvitrificándose a tridymita y alterándose a montmorillonita. Mineralógicamente se presentan en micro y fenocristales (menor al 5%) cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa sódica y magnetita. En esta unidad también se encuentran tobas líticas, las cuales se pueden observar de color café oscuro, de estructura masiva y compacta, con fragmentos líticos

ocupando el 20 % total de la roca (aproximadamente) en tamaños de 5 mm a 3 cm de largo y en formas subredondeados a subangulosos, con cristales de micas, cuarzos y feldespatos (algunos caolinizados). Forman estratos de 40 cm de espesor. En esta unidad se encuentran depósitos de pumicita y de minerales arcillosos, los cuales son importantes dentro del ramo de la construcción (SGM, 2001).

El área de estudio se compone de rocas ígneas, teniendo mayormente **ignimbrita (Tolg)**, la cual se localiza en la porción occidental de la zona de estudio. Esta unidad se puede apreciar en el Cerro El Caloriento, El Picacho y La Mora. El SGM describe esta unidad como rocas de color gris claro, gris rojizo, café claro, café rojizo y violeta, de estructura compacta y masiva con textura piroclástica. El estudio petrográfico muestra contenidos de vidrio volcánico con un porcentaje superior al 75 % formando la matriz de la roca. El contenido de cristales es del 5 al 25 % siendo los principales feldespatos potásico (sanidina), cuarzo, biotita, plagioclasa sódica (albita-oligoclasa), magnetita y piroxeno, los feldespatos presentan alteración a montmorillonita, la mayoría de los cristales están rotos, la magnetita se altera en sus bordes a hematita. También se presentan fragmentos de pómez con un porcentaje menor al 5 % siendo alargados y desvitrificándose a cristobalita. Esta unidad tiene un espesor de 350 m aproximadamente, aunque conforma estratos de 0.40 a 0.80 m de espesor en las unidades fuertemente soldadas y en las unidades incipientemente soldadas el espesor varía entre 5 a 10 m. La ignimbrita se encuentra intercalada en el paquete tobáceo de composición riolítica, lo cual muestra flujos piroclásticos, haciendo que sus relaciones estratigráficas sean variadas (SGM, 2001).

La **Riolita (ToR)** se localiza en las altitudes de mayor elevación dentro del área de estudio. En la cima del Cerro El Picacho se presenta un afloramiento de esta unidad y en la localidad Piedras de Amolar. El color de estas rocas es gris, rosado y rojizo con estructura compacta y masiva. La textura es porfídica y porfiroafanítica. El estudio petrográfico realizado por el SGM muestra que del 25 al 50 % de los minerales son ortoclasa (5 al 25 %), plagioclasa sódica (menos del 5 %), vidrio volcánico (menos del 5 %) formando la matriz de la roca, desvitrificándose a tridymita, magnetita (menos del 5 %) alterándose a hematita y micro y fenocristales asociados con cuarzo. Esta unidad se encuentra formando pseudoestratos que varían entre los 20 cm hasta 3 m de espesor, aunque predomina la pseudoestratificación de media a masiva con pseudoestratos entre 1 a 3 m de espesor. Sobreyace de manera concordante a las ignimbritas (Tolg). A esta unidad se le ha asignado una edad correspondiente al Oligoceno, ya que durante el Oligoceno y el Mioceno se desarrolló la progresión del arco magmático continental, terminando con la explosión ignimbrita, la cual dio origen a la Sierra Madre Occidental (Demant et al., 1975 y Mc Dowell et al., 1977). Price

y Henry describen que en este intervalo de tiempo se dio origen a la emisión de grandes volúmenes de ignimbritas riolíticas, riolitas y andesitas basálticas asociadas a calderas dentro de un régimen distintivo moderado (SGM, 2001).

El **Porfido Riolítico (ToPR)** es parte de los cuerpos ígneos hipabisales de composición riolítica, los cuales se encuentran emplazados dentro de las unidades emplazadas durante el Oligoceno. El color de esta unidad es gris claro, de estructura compacta y masiva. Su textura es afanítica y aunque petrográficamente se ha clasificado como una riolita, las observaciones de campo muestran un origen intrusivo, por lo cual se ha descrito como un pórfido riolítico. Un análisis petrográfico realizado por el SGM muestra como minerales principales el cuarzo (25 al 50 %), en microcristales constituyendo la matriz de la roca, relacionados con fenocristales de feldespatos. En un 5 al 25 % se presentan en micro y fenocristales albita-oligoclasa alterándose a illita. Otro mineral que se encuentra alterándose a illita es la ortoclasa en micro y fenocristales, los cuales se presentan formando parte de la matriz de la roca. También se encuentra magnetita (menor al 5 %) alterándose a hematita. A esta unidad pertenece al Oligoceno, por las unidades que intrusión. El pórfido riolítico se relaciona a un evento de vulcanismo félsico calcoalcalino del Oligoceno-Mioceno del norte de México, el cual se ha relacionado a un plutonismo magmático emplazado a lo largo de trazas de falla y/o intersección de rupturas relacionadas con el basamento (Sumin *et al.*, 1980), y a una intensa actividad hidrotermal con mineralización económica (McDowell y Mauger, 1994; SGM, 2001).

Mioceno

La unidad **basalto-andesita (TmB-A)** se encuentra dentro de la mancha urbana, en la porción sur del área de estudio. Esta unidad es de origen ígneo extrusivo, su composición es tanto basáltica como andesítica. Es de color rojizo a gris oscuro, de estructura masiva y compacta; la textura es afanítica a micro porfídica y vesículas en superficie. De forma megascópica se observan plagioclasas. De manera discordante sobreyace a tobas riolíticas (ToTR), ignimbritas (ToIg) y riolitas (ToR). Mientras que subyace al conglomerado polimíctico del Holoceno (QhoCgp) (SGM, 2001).

Cuaternario Holoceno

El **Conglomerado polimíctico (QhoCgp)** está formado por conglomerados polimícticos escasamente consolidados. Estratigráficamente están localizados entre los basaltos del Mioceno y los limos-arenas del Holoceno (QhoLm-Ar). Dentro del área de estudio representa casi la totalidad de la porción oriental, cubriendo un 40 % de la zona. Se

encuentra dentro de la mancha urbana, pudiéndose observar en el Arroyo El Picacho. Está formado por material mal clasificado, en forma de bloques, fragmentos redondeados y subredondeados de riolitas, tobas riolíticas, andesitas y basaltos. El espesor máximo es de aproximadamente 100 m. Esta unidad cubre de manera discordante a basaltos-andesitas (TmB-A), tobas riolíticas (ToTR) y riolitas (ToR), mientras que los limos y arenas (Qholm-ar) y material aluvial (Qhoal) cubren de manera concordante al conglomerado polimíctico (QhoCgp), el cual es característico de un depósito de facies continentales (SGM, 2001).

El tipo de material **arena-limo (Qho Ar-Lm)**, es el producto de la erosión de rocas preexistentes transportados por corrientes fluviales y depósitos en las zonas de presas. En el área de estudio se localiza en la porción sureste dentro de la zona urbana. Esta unidad está formada por arenas y limos, así como por gravas. La forma de las arenas, limos y gravas varía de subredondeados a bien redondeado, pudiendo presentar localmente una degradación en el tamaño de los fragmentos líticos que componen a la unidad. Discordantemente cubre tobas riolíticas (ToTR). Por su posición estratigráfica y la litología, se considera del Holoceno. Esta unidad es característica de un depósito de facies continentales (SGM, 2001).

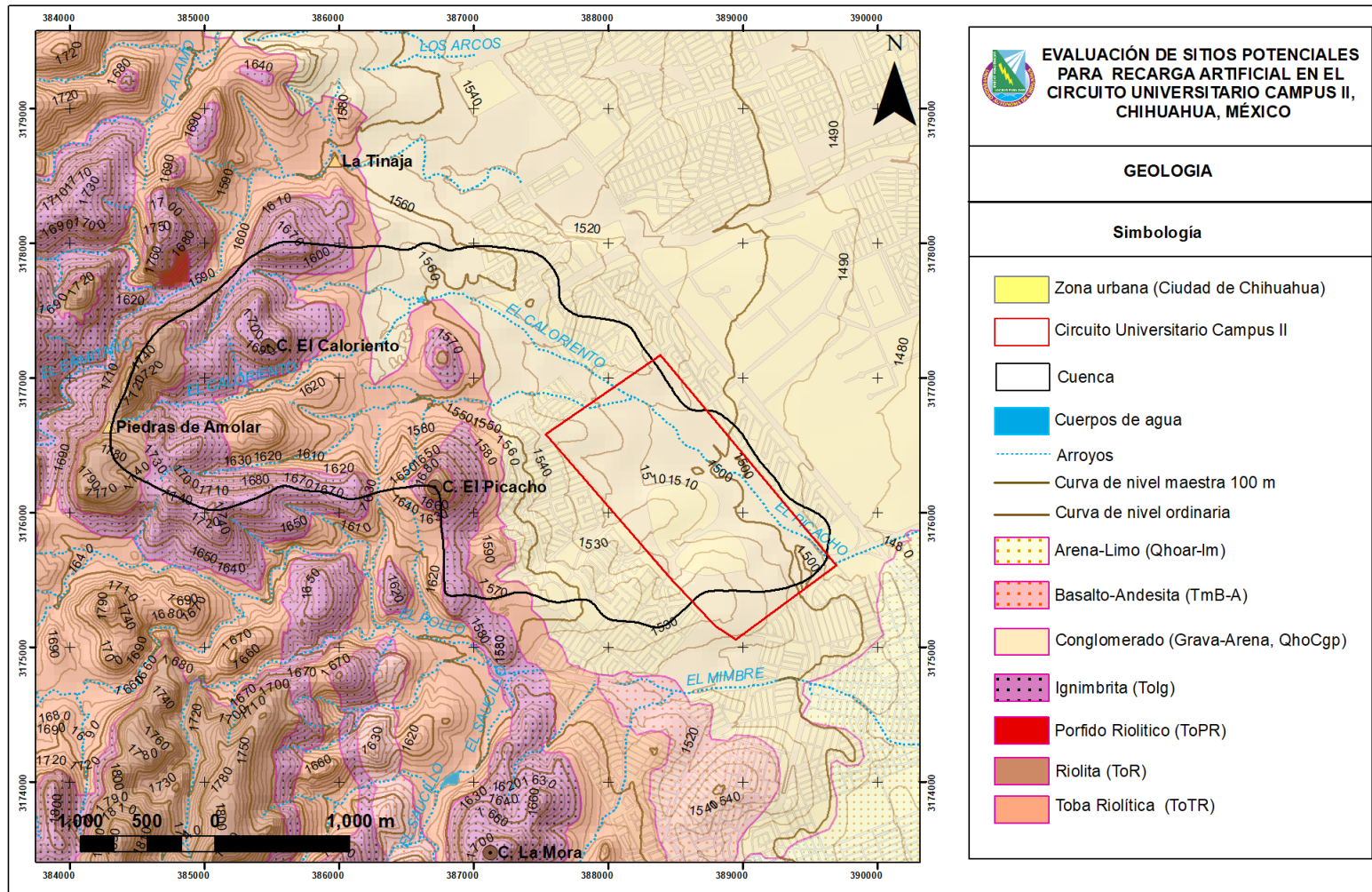


Figura 22. Mapa de la geología del área de estudio (SGM, 2002)

3.10 Geofísica

Bejar (2013) llevo a cabo una tesis donde se realizaron Sondeos Eléctricos Verticales (SEVS) dentro del Campus Universitario II. En la Figura 23 se observa la localización de cada uno de los sondeos. Para una mejor descripción y comprensión de la geología del subsuelo, el área de estudio se zonificó en 3 áreas, la zona Noroeste, donde se realizaron los SEVS 1, 2, 3 y 4. Esta zona se encuentra localizada al Oeste del Estadio Universitario y al Sur de del Fraccionamiento Quintas Sebastian, entre la Av. San Miguel El Grande, Calle San Miguel El Grande y Circuito Universitario. En la segunda zona se llevaron a cabo los SEVS 5 y 6 y se localiza en el centro del Circuito Universitario, en la Facultad de Contaduría y Administración. Y en la tercera zona se ejecutaron los SEVS 7 y 8; esta área se encuentra al sur del Circuito Universitario, donde se localiza el Centro Aeroespacial.

Zona noroeste: Los materiales descritos son gravas y arenas en los primeros 10 m de profundidad con espesores que varían entre 2 y 10 m y valores de resistividad de 100 a 160 Ohms-m. A esta capa de material granular le subyacen arenas finas con resistividades que oscilan entre 33 y 60 Ohms-m. Los espesores de este material varían entre 40 y 130 m, teniendo los mayores espesores en el centro del area. A este material lo subyacen gravas y arenas gruesas con resistividades que se encuentran en un rango de 120 a 200 Ohms-m y espesores entre 10 y 60 m. El material que subyace a esta secuencia se interpreta como arcilla o nivel de saturación por sus bajos valores de resistividad, los cuales se encuentran en un rango de 1 a 2 Ohms.

Zona centro: En esta porcion del área de estudio se encontraron arenas finas en los primeros 30 m de profundidad disminuyendo su espesor hacia el Este. Los valores de resistividad de esta capa varían entre 49 y 93 Ohms-m. A este material le subyace un estrato de arcilla, el cual tiene un espesor de 48 m en la porcion Oeste, ya que hacia el Este el espesor del estrato disminuye. El valor de resistividad para este material es de 28 Ohms-m. Debajo de esta capa se localiza una secuencia de arenas gruesas y arenas, gravas y arenas y arenas finas.

Zona sur: En esta área se encuentran gravas y arenas en los primeros 10 m de profundidad con resistividades de 200 a 230 Ohms-m y espesores que varían entre 70 y 120 m. A esta capa de material sedimentario le subyace una capa gruesa de arenas finas, teniendo espesores que oscilan entre 70 y 120 m y valores de resistividades de 90 a 110 Ohms-m. Debajo de este material se encuentran limos y arcillas con valores de resistividad de 16 Ohms-m. Este estrato tiene un espesor de 130 m y disminuye hacia el sur. Por debajo de

esta capa se tienen valores de resistividades muy bajos, de 0.413 Ohms-m, los cuales se han interpretado como arcillas o nivel de saturación.

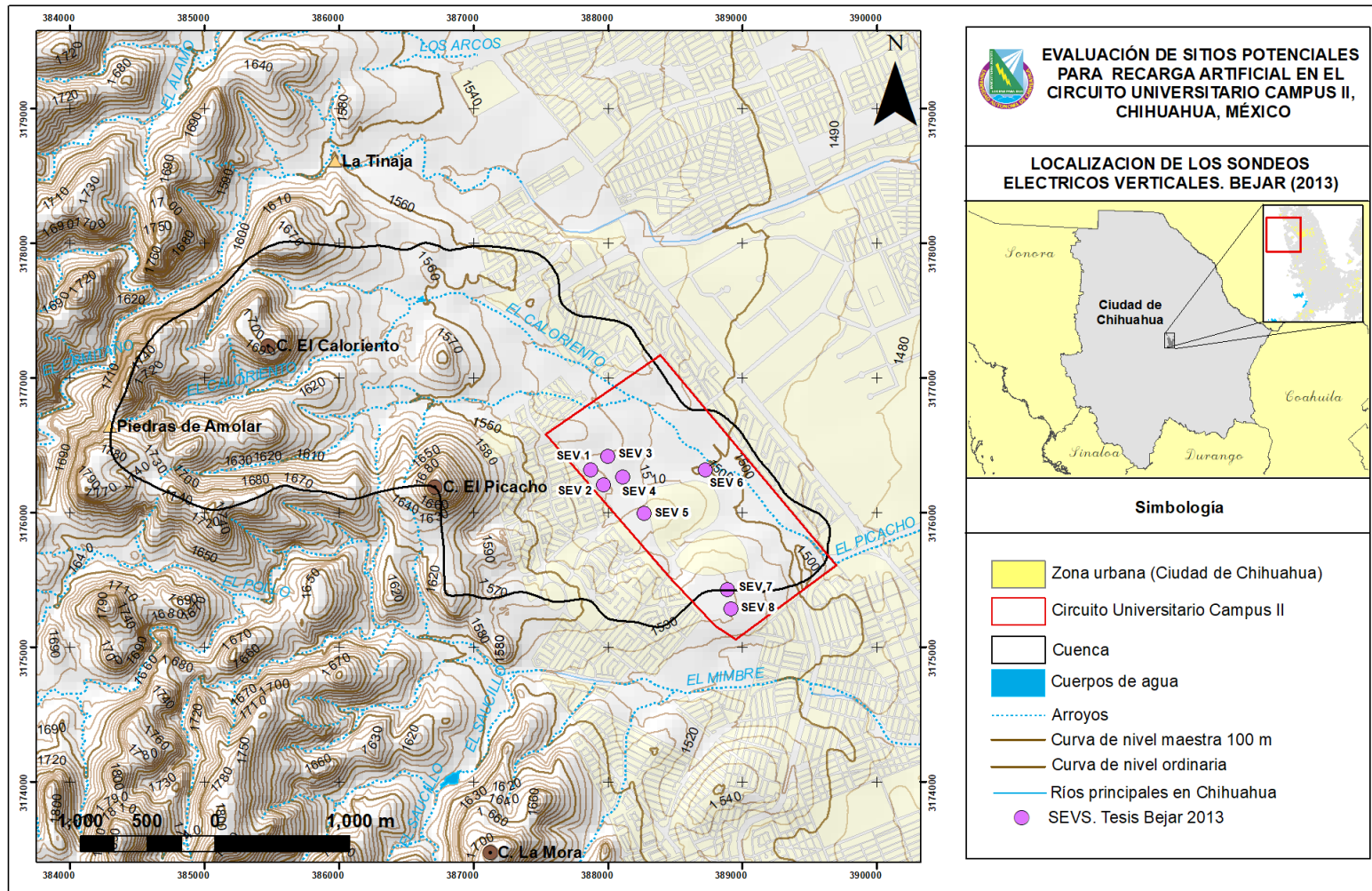


Figura 23. Mapa de localización de los SEVS (Bejar, 2013)

Capítulo 4. Metodología

4.1 Recopilación y análisis de la información

Para el presente estudio se recopiló información de diferentes instituciones gubernamentales como el INEGI, JCAS, JMAS, CONAGUA, CONABIO y de distintas fuentes bibliográficas como tesis y artículos científicos. Con tal información se describió el marco físico y se elaboraron mapas de cada uno de los apartados del marco físico.

4.2 Investigación y análisis de piezometría y calidad del agua

En este apartado se investigó y se analizó los datos de los niveles piezométricos de los pozos aledaños al área de estudio. Con dicha información se elaboró una serie de hidrógrafos para conocer la evolución del nivel piezométrico de los pozos. Como parte de la información de los pozos, también se investigó la calidad del agua mediante análisis fisicoquímicos de los pozos y se tomaron muestras de agua del arroyo y se analizaron en el laboratorio.

4.3 Identificación de sitios de recarga

Como parte del estudio, se realizó una serie de SEVS en el Circuito Universitario y se llevaron a cabo recorridos de campo a lo largo del arroyo El Picacho para conocer más a detalle la zona de estudio e identificar sitios de recarga.

4.4 Recomendación de un sitio y una posible obra de recarga

En base a los análisis y resultados de la investigación, se recomendó un sitio dentro del arroyo El Picacho y una obra de recarga de acuerdo a las características físicas e hidrológicas del arroyo.

Capítulo 5. Resultados

5.1 Piezometría

Para el presente estudio se tomaron los niveles estáticos de los pozos aledaños al área de estudio con la finalidad de conocer las variaciones en el nivel freático del acuífero. Los pozos se localizan en la porción oriental del área de estudio. La mayoría de los pozos se encuentran en el valle y algunos de ellos se ubican cerca de la sierra. En la Figura 24 se muestra la localización de cada uno de ellos.

Los datos de los niveles estáticos de los pozos fueron tomados en los años 2011 y 2023 (Tabla 3). El pozo que ha tenido el mayor abatimiento es el pozo Arroyos 3, con una diferencia de -37.07 m en 12 años. El pozo Campus Universitario tiene un descenso de 7.39 m en este periodo de tiempo. Es importante mencionar que este pozo fue perforado en el año 2000 y se utilizó por 4 años, ya que el gasto del pozo fue insuficiente para la red de distribución de agua potable de la ciudad. Por lo que se muestra que los pozos cercanos a este han tenido una influencia negativa en cuanto al nivel estático del pozo.

Tabla 3. Profundidad al nivel estático de los pozos de los años 2011 y 2023

ID	Nombre	Estado	Coordenadas UTM		Profundidad (m)	
			Este	Norte	2011	2023
1	Los Arcos	En operación	389166.00	3179350.00	85.55	101.35
2	20 Aniversario 1	En operación	388643.00	3178431.00	94.00	110.52
3	20 Aniversario 2	En operación	388825.00	3178980.00	94.00	108.03
4	Los Arroyos 1	En operación	387653.00	3178262.00	105.40	109.30
5	Los Arroyos 2	En operación	387198.00	3178623.00	117.80	134.45
6	Los Arroyos 3	En operación	387498.00	3178872.00	99.00	136.34
7	Los Arroyos 4	Fuera de operación	386662.00	3178626.00	112.40	136.07
8	Picacho 1	En operación	387494.00	3175999.00	132.70	146.03
9	Picacho 2	En operación	388030.00	3175542.00	112.00	136.89
10	Picacho 3	En operación	388083.00	3175975.00	115.70	125.70
11	Picacho 5	Negativo	386719.00	3177466.00	ND	138.94
12	Campus Universitario	Fuera de operación	389499.00	3175822.00	85.00	92.39
13	Villa Dorada 1	En operación	388915.00	3174437.00	ND	111.42
14	Villa Dorada 2	En operación	388524.00	3173974.00	ND	139.46

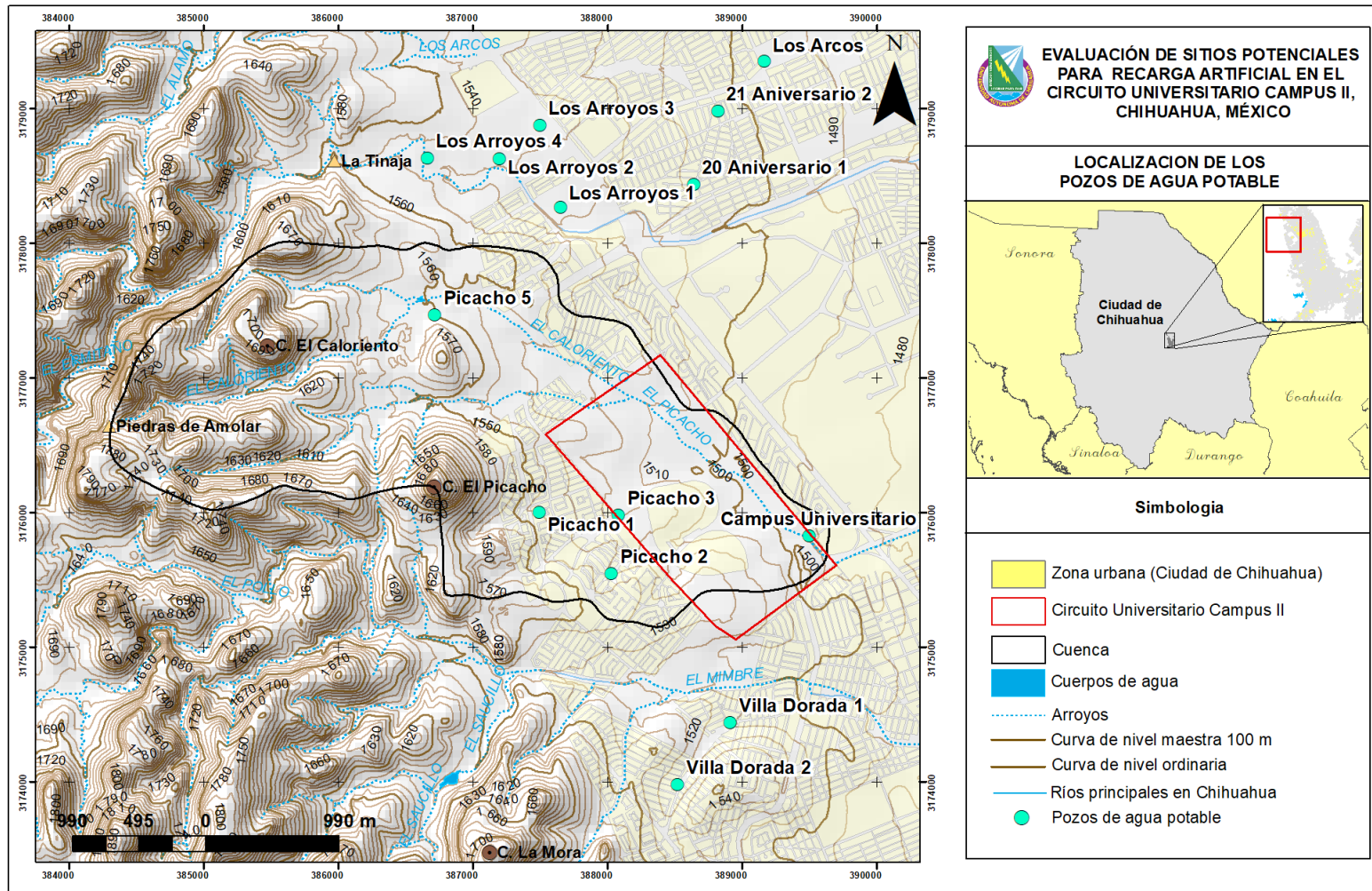


Figura 24. Mapa de localización de los pozos de agua potable

5.2 Mapas de configuración piezométrica

Profundidad del nivel estático

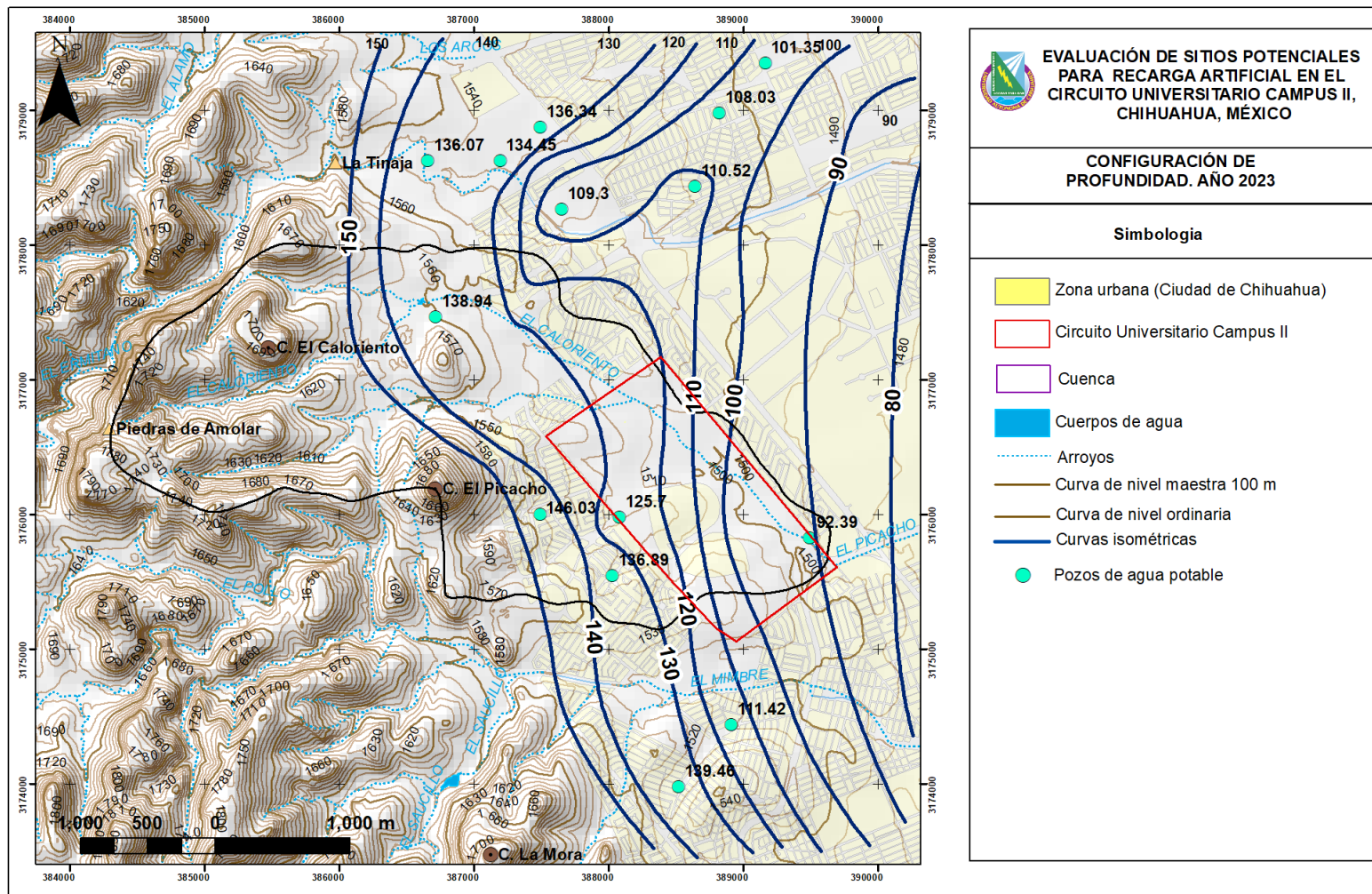
De acuerdo con los niveles estáticos tomados en el año 2023, se elaboró un mapa de configuración de profundidad (Figura 25) donde se puede observar que las mayores profundidades se encuentran en la porción central del área de estudio, cercas de la sierra, específicamente en las inmediaciones del cerro El Picacho y el cerro El Caloriento, teniendo niveles entre 140 y 150 m. En el Circuito Universitario Campus II las profundidades varían entre 100 y 130 m, mientras que en la zona del valle (dentro de la ciudad) las curvas muestran profundidades entre 80 y 120 m.

Elevación del nivel estático

El mapa de configuración de elevación del nivel estático (Figura 26) muestra que los mayores valores se encuentran en las cercanías de la sierra con elevaciones que varían entre 1420 y 1400 msnm, y conforme se van alejando de la sierra van disminuyendo hacia el valle. Las elevaciones que se encuentran en el valle oscilan entre 1350 y 1390 msnm. Las líneas de flujo muestran que el flujo subterráneo va desde la sierra hasta el valle.

Evolución del nivel estático

Para la elaboración del mapa de configuraciones de evolución se tomó un periodo de tiempo de 12 años, del 2011 al 2023. En la Figura 27 se observa un descenso en los niveles piezométricos tanto en el valle como en las cercanías de la sierra. En la porción norte del área de estudio se aprecia un descenso de 20 a 30 m, mientras que, en las cercanías de la sierra, donde se localiza el Cerro El Picacho, los niveles tienen descensos desde 20 hasta 40 m.



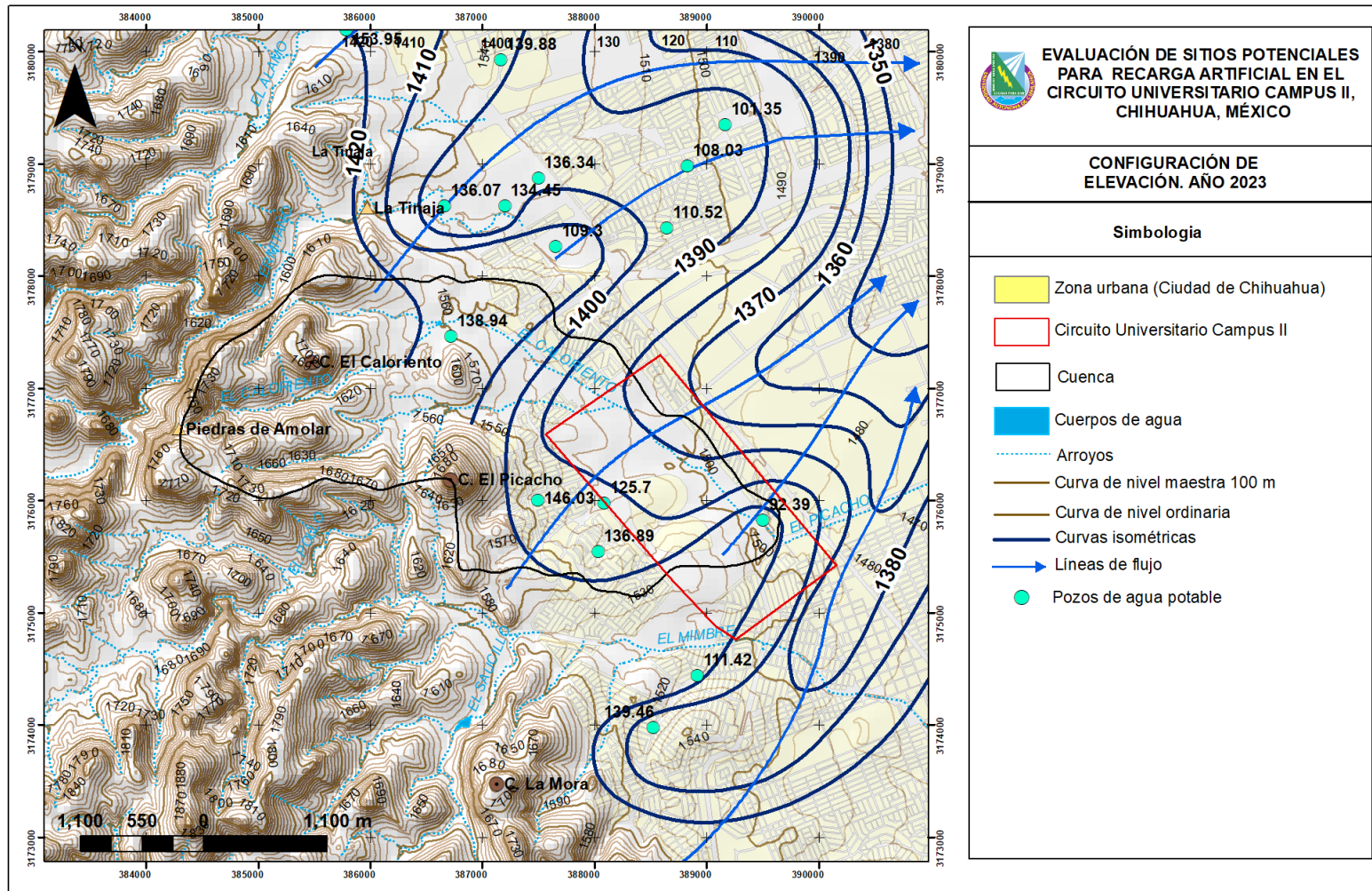
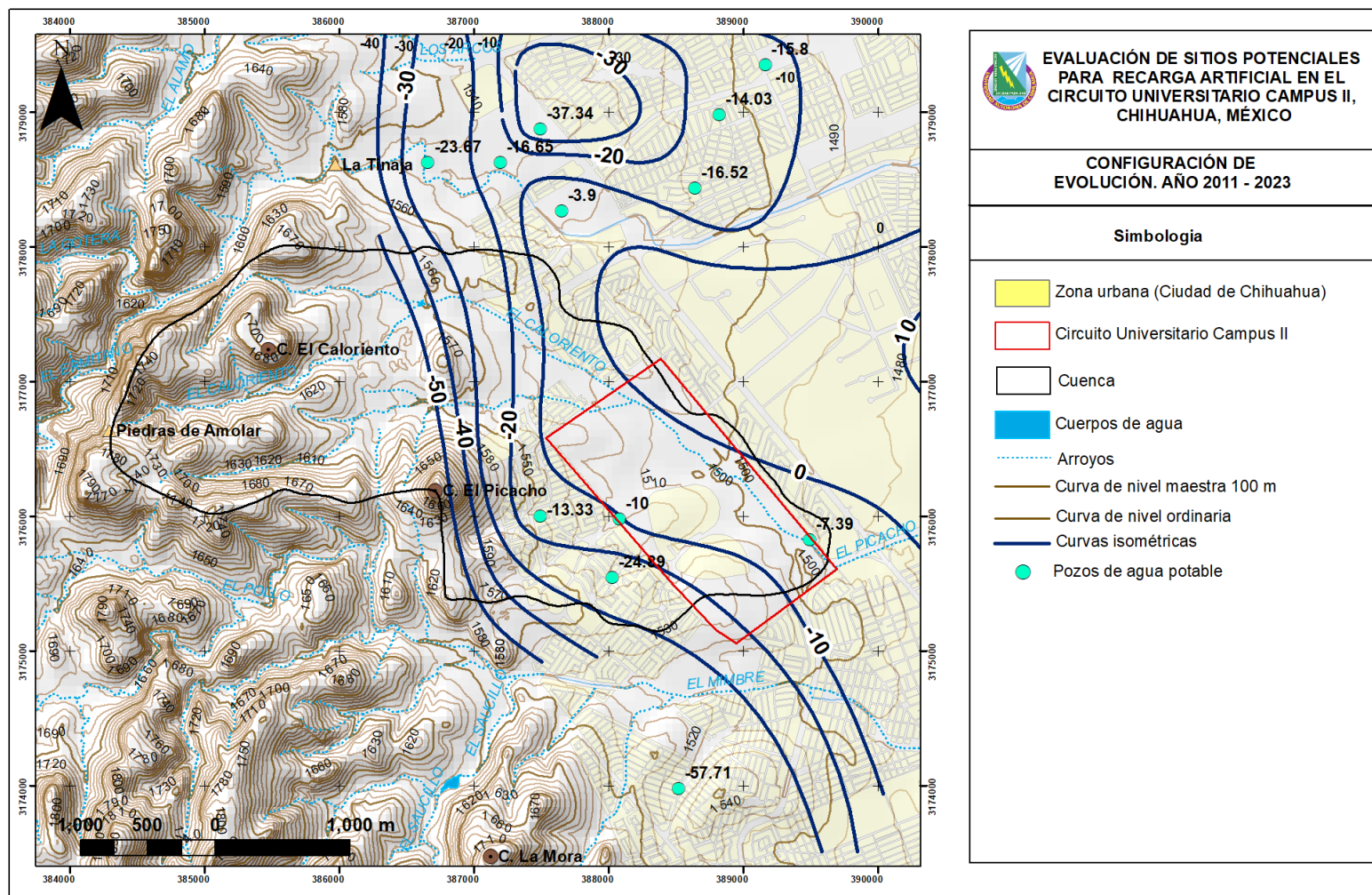


Figura 26. Mapa de configuración de elevación del NE (2023)



5.3 Hidrógrafos

Dentro del área de estudio se localizan 14 pozos de agua potable, operados por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS). Para el presente estudio se han graficado los niveles estáticos históricos de cada pozo. El área de estudio se ha dividido en 5 zonas, la primera zona es la zona norte, la segunda la zona noroeste, la tercera la centro-noroeste, la cuarta la centro y la quinta la sur.

En la primera zona (zona norte) el nivel estático ha variado entre 70 y 110 m, en un lapso de 28 años. Aunque en el pozo 20 Aniversario 2 se observa un dato anómalo en el año 2004, donde el nivel estático desciende hasta 130 m y al siguiente año se recupera hasta alcanzar los 90 m. En este mismo pozo se observa una recuperación de 60 m para luego descender a 90 m el siguiente año. El pozo Los Arcos se perforó en el año 2004, con un nivel estático de 71 m, el último dato registrado en el presente estudio es de 101 m, teniendo un abatimiento de 30 m en un lapso de 20 años (Figura 28).

En la segunda zona (noroeste) se localizan los pozos Los Arroyos 1, Los Arroyos 2, Los Arroyos 3 y Los Arroyos 4. Esta zona se ha mantenido en un rango de 100 a 130 m, no ha habido cambios considerables en estos pozos. Los hidrógrafos de esta zona se muestran en la Figura 29.

La tercera zona (centro-noroeste) corresponde al pozo Picacho 5, el cual se encuentra a una altitud de 1560 msnm, es el más elevado de todos los pozos. Este pozo alcanza los 140 m. El primer dato que se tiene de este pozo es de 104.26 m en el año 2007 y el último dato es de 138.94 m a finales del año 2023. A lo largo de 16 años este pozo ha descendido 34.68 m (Figura 30).

La zona centro es la cuarta zona, donde se localizan los pozos Picacho 1, Picacho 2, Picacho 3 y el pozo Campus Universitario. De este conjunto de pozos, el primer pozo que fue perforado es el Campus Universitario en el año 2000 iniciando con un nivel estático de 70.94 m. Los otros pozos fueron perforados en los años 2002 y 2003. El pozo Picacho 2 comenzó con un nivel estático de 88.5 m y el Picacho 3 con 99.5 m. Los últimos niveles tomados a finales del año 2023 son de 136.8 m para el Picacho 2 y 125.7 m para el Picacho 3. El Picacho 2 ha tenido un descenso de 48 m y el Picacho 3 26.2 m. El pozo Campus Universitario solo operó durante 4 años, del 2000 al 2004, esto debido al poco caudal que aportaba este pozo. En el hidrógrafo se observan datos anómalos, niveles que descienden hasta casi 120 m y se recuperan 40 m. hasta alcanzar los 80 m (Figura 31).

La quinta zona identificada como sur corresponde a los pozos Villa Dorada 1 y Villa Dorada 2. Estos pozos fueron perforados en el año 2000 y 2001, con niveles estáticos de 86.6 m y 105.2 m. El pozo Villa Dorada 1 ha mantenido sus niveles entre 80 y 110 m. mientras que el Villa Dorada 2 sus niveles han estado entre 80 y 140 m. El pozo Villa Dorada 1 ha tenido un abatimiento de 25 m, en 23 años y el Villa Dorada 2 se ha abatido 34 m en 22 años. Los hidrografos de esta zona se muestran en la Figura 32. Es importante mencionar que el pozo Villa Dorada 1 se localiza mas cercas del valle mientras que el Villa Dorada 2 se encuentra en altitudes mas elevadas.

Haciendo una comparación entre las 5 zonas, la zona centro y la centro-noroeste donde pertenecen los pozos Picachos, han tenido los mayores descensos en comparación de los pozos los Arroyos y los 20 Aniversario. Los pozos más antiguos son los 20 Aniversario, con registros de 1995 y 1997. El pozo Picacho 5 no se encuentra en operación, ya que se determinó como negativo, al igual que el pozo Campus Universitario, debido al bajo caudal que se mostró en el aforo, el gasto fue de 9 lps a una profundidad de 142 m.

La zona con los menores abatimientos es la noroeste donde se localizan los pozos Arroyos, ya que en dicha zona no se observan anomalías, aunque el pozo 4 tiene más de 3 años fuera de operación.

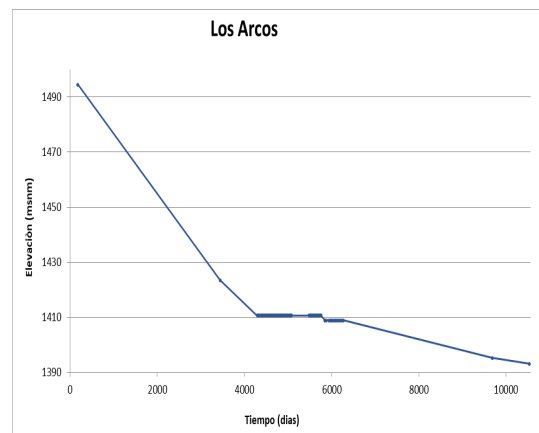
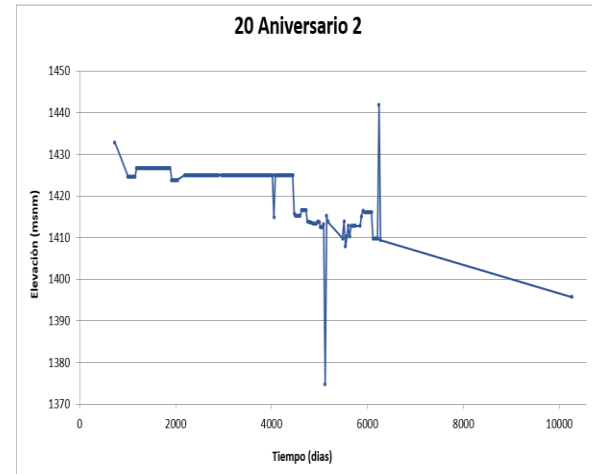
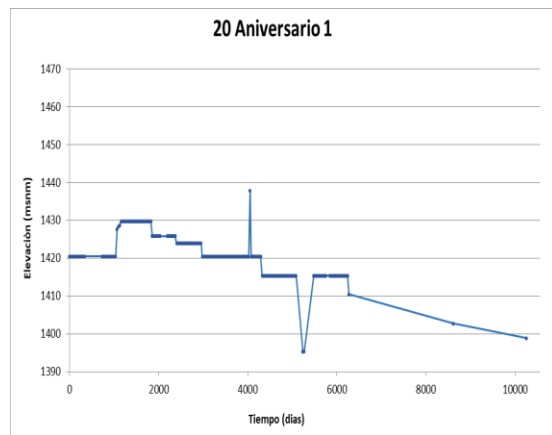


Figura 28. Hidrógrafos de la zona norte

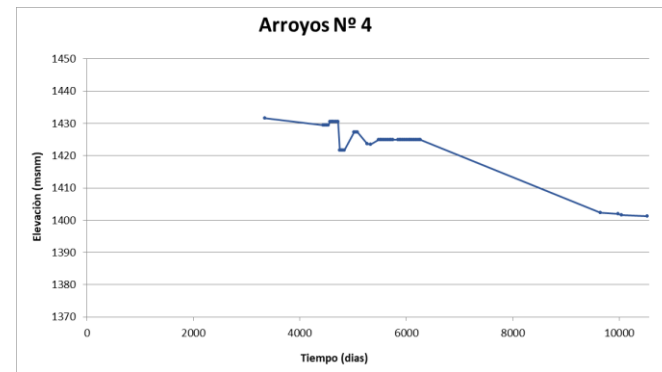
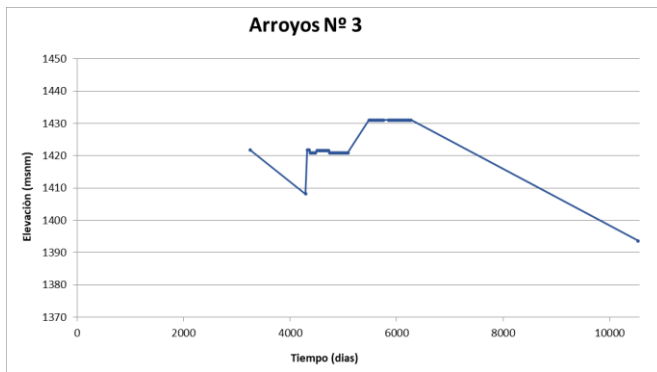
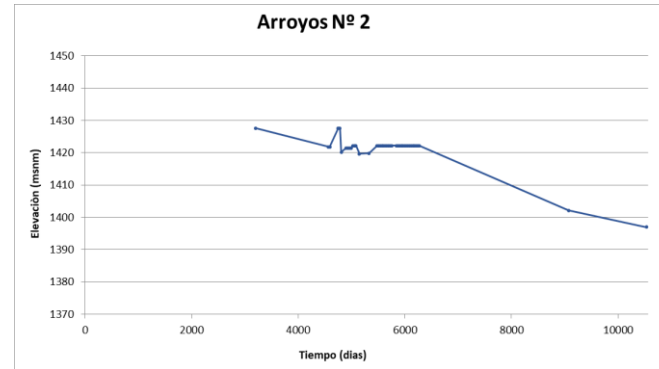
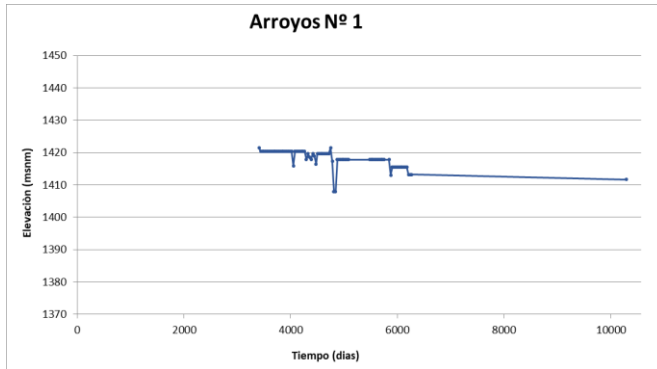


Figura 29. Hidrógrafos de la zona noroeste

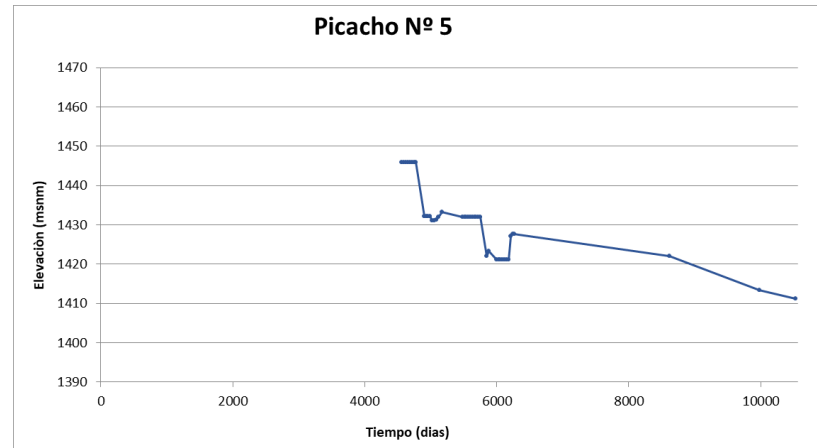


Figura 30. Hidrógrafo de la zona noreste

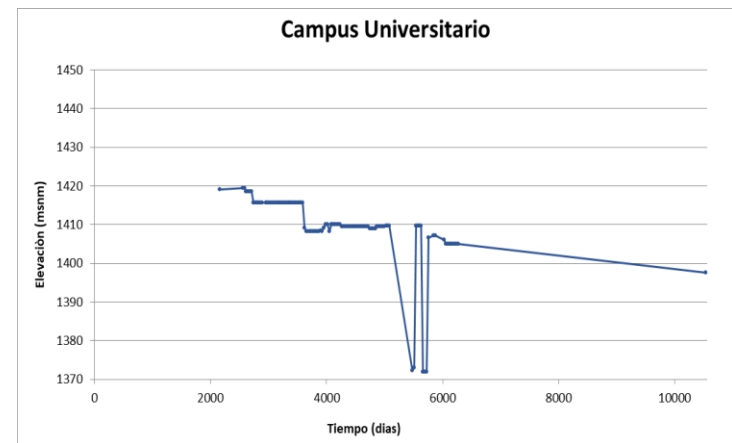
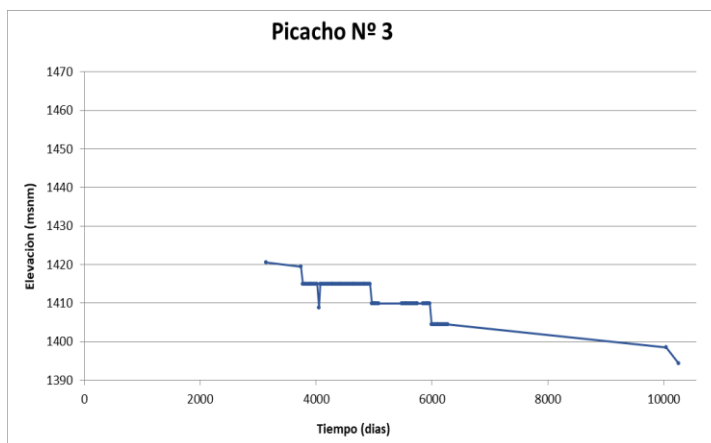
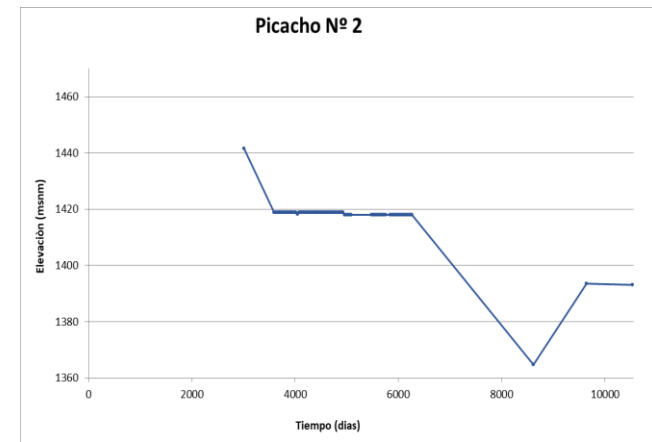
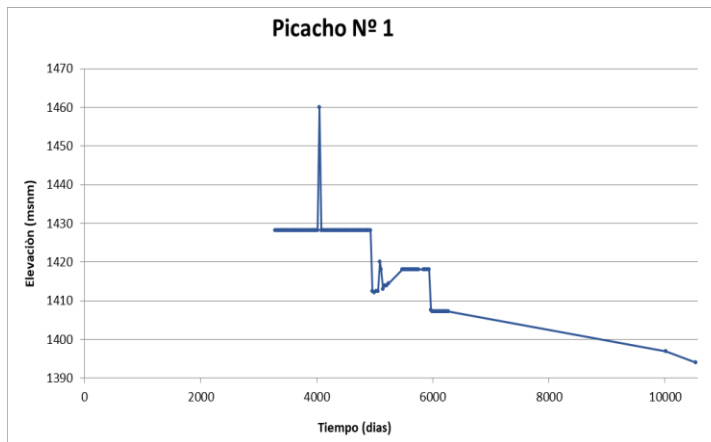


Figura 31. Hidrógrafos de la zona centro

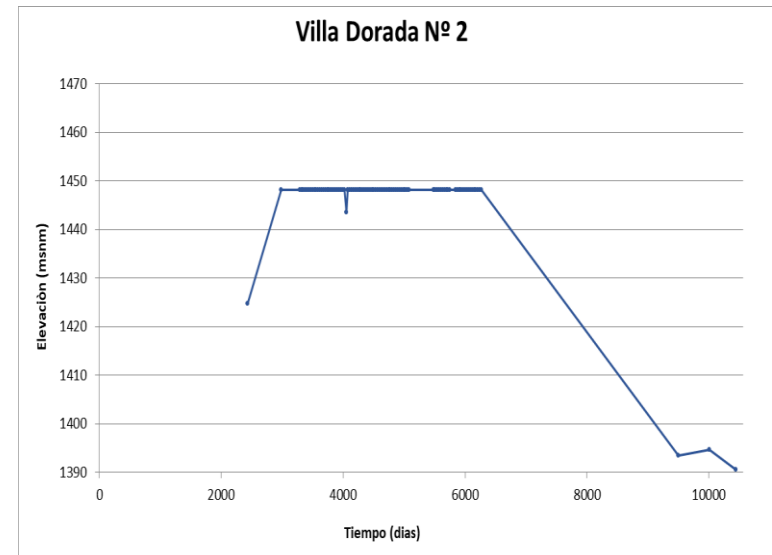
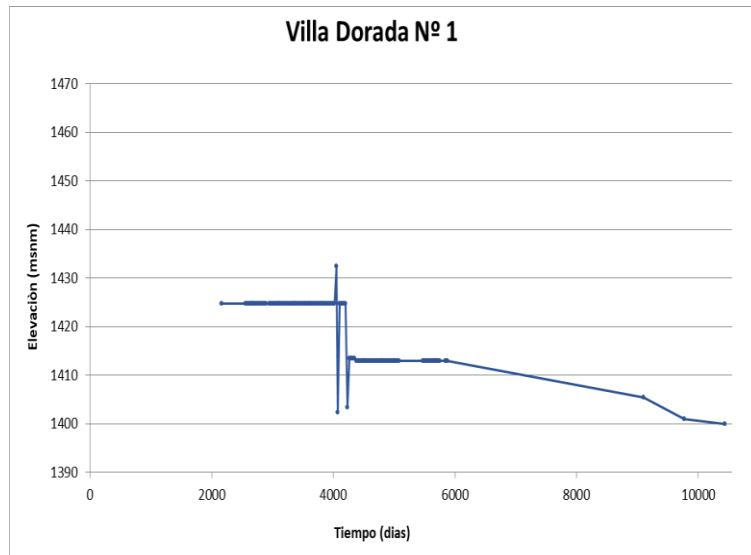


Figura 32. Hidrógrafos de la zona sur

5.4 Calidad del agua

Un estudio realizado por la UACH en coordinación con la JCAS (2013) muestra que los pozos aledaños al área de estudio presentan concentraciones de flúor que sobrepasan el límite establecido por la NOM-127-SSA1-2021. El límite es 1.5 mg/l y el valor del flúor en los pozos oscila entre 2.17 y 3.3 mg/l. La zona que tiene mayor concentración de flúor se localiza al noroeste del área de estudio. Espino (2023) define que la concentración de flúor en el agua subterránea se debe a la interacción con las rocas extrusivas félsicas, las cuales constituyen el material geológico donde se localizan los pozos con mayor concentración. En la Tabla 4 se muestran los valores de algunos parámetros que caracterizan la química del agua.

Las concentraciones de sulfatos y de la dureza total se encuentran dentro de los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021. La norma establece un límite de 500 mg/l para la dureza total y de 400 mg/l para los sulfatos. El rango de concentraciones de dureza total varía entre 102 y 126.1 mg/l, los cuales se encuentran dentro del límite. Las concentraciones de los sulfatos son muy bajas respecto a la norma, ya que las concentraciones oscilan entre 58 y 114 mg/l.

Para conocer la calidad del agua que descarga al arroyo El Picacho, se tomaron dos muestras de agua en las coordenadas 389401.84 m E 3175841.25 m N. La muestra 1 se recolectó en octubre del año 2023 y la muestra 2 se tomó en noviembre del mismo año. Los valores que se tomaron en la primera muestra son muy elevados en comparación de la segunda muestra. El valor del pH no varía mucho, pero los valores de conductividad, alcalinidad total, bicarbonato, cloruro, calcio, sodio y sulfatos tienen una diferencia muy marcada.

Los valores de conductividad eléctrica en ambas muestras indican de baja a moderada mineralización. Los valores de bicarbonatos representan valores de bajo a moderado. Lo que muestra que el agua de escorrentía ha sido enriquecida con CO₂ del suelo. Los valores de cloruro tienen una diferencia bastante significativa por la evaporación de la zona. Al igual que las muestras tomadas en los pozos, el nivel de flúor sobrepasa el límite permisible en la muestra 1. En la Tabla 5 se presentan los valores de cada una de las muestras.

Tabla 4. Análisis físicoquímicos de los pozos

	20 Aniversario 1 (2011)	21 Aniversario 1 (2009)	Los Arcos (2011)	Arroyos 1 (2011)	Arroyos 2 (2011)	Arroyos 3 (2011)	Arroyos 4 (2008)	Campus Univ. (2009)	Picacho 1 (2010)	Picacho 2 (2010)	Picacho 3 (2010)	Picacho 5 (2010)	Villa Dorada 1 (2010)	Villa Dorada 2 (2010)
pH	6.9	7.9	7.8	8.1	7.7	7.9	7.8	7.8	7.84	7.8	7.9	7.72	7.76	7.77
Cond. E. (μS/cm)	531	442	448	555	548	540	558	501	428	427	485	609	536	470
Alcalinidad (mg/l CaCO₃)	104.8	146.5	145.8	168.4	162.3	163.7	163.0	153.5	138	136.3	145.4	165	164	144
Dureza total (mg/l CaCO₃)	124.1	113.4	108.4	126.1	120.2	122.2	121.4	113.4	88.7	86.7	102.5	104	114	102
Dureza calcio (mg/l CaCO₃)	110.3	101.5	98.5	114.3	108.4	108.4	111.4	103.5	84.7	84.73	100.5	104	106	98.5
Dureza magnesio	13.8	11.9	9.9	11.8	11.8	13.8	9.9	10.0	3.94	1.97	1.971	0	7.88	3.94
Cloruro	42.4	5.9	6.0	8.3	8.2	7.6	9.6	11.0	4.35	4.831	6.763	9.66	8.7	6.76
Sulfato	67.6	63.0	58.7	85.8	87.4	84.5	102.8	69.4	58.3	60.11	78.62	114	79.7	68.4
Fluoruro	2.4	2.3	2.2	3.2	3.5	3.3	3.5	2.9	2.17	2.08	2.33	3	3.22	2.25

Tabla 5. Análisis físicoquímicos del arroyo El Picacho

	Muestra 1	Muestra 2
Fecha	Oct. 2023	Nov. 2024
pH	7.41	6.06
Conductividad (µs/cm)	516	138
Alcalinidad Total	297	94.5
Bicarbonato HCO ₃ (mg/l)	362.34	115.29
Cloruro (mg/l)	43.43	2.98
Calcio (mg/l)	52.94	20.03
Magnesio (mg/l)	2.8	0.722
Sodio (mg/l)	96.79	25.63
Flour (mg/l)	2.01	0.46
Sulfatos (mg/l)	71.02	24.18

5.5 Cortes litológicos

Se analizaron los cortes litológicos de los pozos Campus Universitario, Picacho 2, Picacho 3, Picacho 4, Arroyos 1 y Arroyos 2.

La geología del pozo Campus Universitario se describe los primeros 10 m, como conglomerado arcilloso-arenoso con escasos cantos rodados. Los siguientes 100 m, se clasifican como cantos rodados de roca ígnea heterogénea y en los últimos metros (204 a 232 m) se clasifica como arenisca de grano grueso.

De acuerdo con los cortes litológicos de los pozos Picacho 2, Picacho 3 y Picacho 4, la geología de la porción central del área de estudio está formada por conglomerado, riolita y tobas. La parte superior se encuentra formada por conglomerado de gravas gruesas y cantos rodados, los siguientes metros están formados por riolitas y en los metros posteriores se localiza toba. El espesor del conglomerado aumenta hacia la sierra y hacia la ciudad, el espesor comienza a disminuir.

En la porción centro-norte del área de estudio, se localizan los pozos Arroyos 1 y Arroyos 2, en los cuales se describen en los cortes litológicos como una intercalación de tobas riolíticas con riolita, teniendo en la parte superior gravas gruesas y cantos rodados como parte del material de relleno. El pozo Arroyos 2 muestra gravas y arenas hasta los 200 m. A partir de los 200 m la geología presenta toba arenosa y riolita.

5.6 Estudio geofísico

Localización de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVS)

Como parte del trabajo de campo, se realizaron 8 SEVS los cuales se localizan dentro de las instalaciones del Campus Universitario II. El SEV 1 se realizó en el Centro Aeroespacial, los SEVS 2 y 3 se desarrollaron a 140 m hacia el noroeste de Soriana Juventud y a 40 m del pozo Campus Universitario. El SEV 4 se llevó a cabo a un costado de la Facultad de Medicina Y Ciencias biomédicas. Los SEVS 5 y 6 al Suroeste del Estadio Universitario en el terreno que se encuentra entre la Av. San Miguel El Grande, Calle San Miguel El Grande y el Circuito Universitario. El SEV 7 se realizó a 80 m al noreste del Estadio Universitario y finalmente el SEV 8 se desarrolló a 90 m al norte del estacionamiento de la Facultad de Contaduría Y Administración. En la Figura 33 se muestra la ubicación de cada uno de los SEVS.

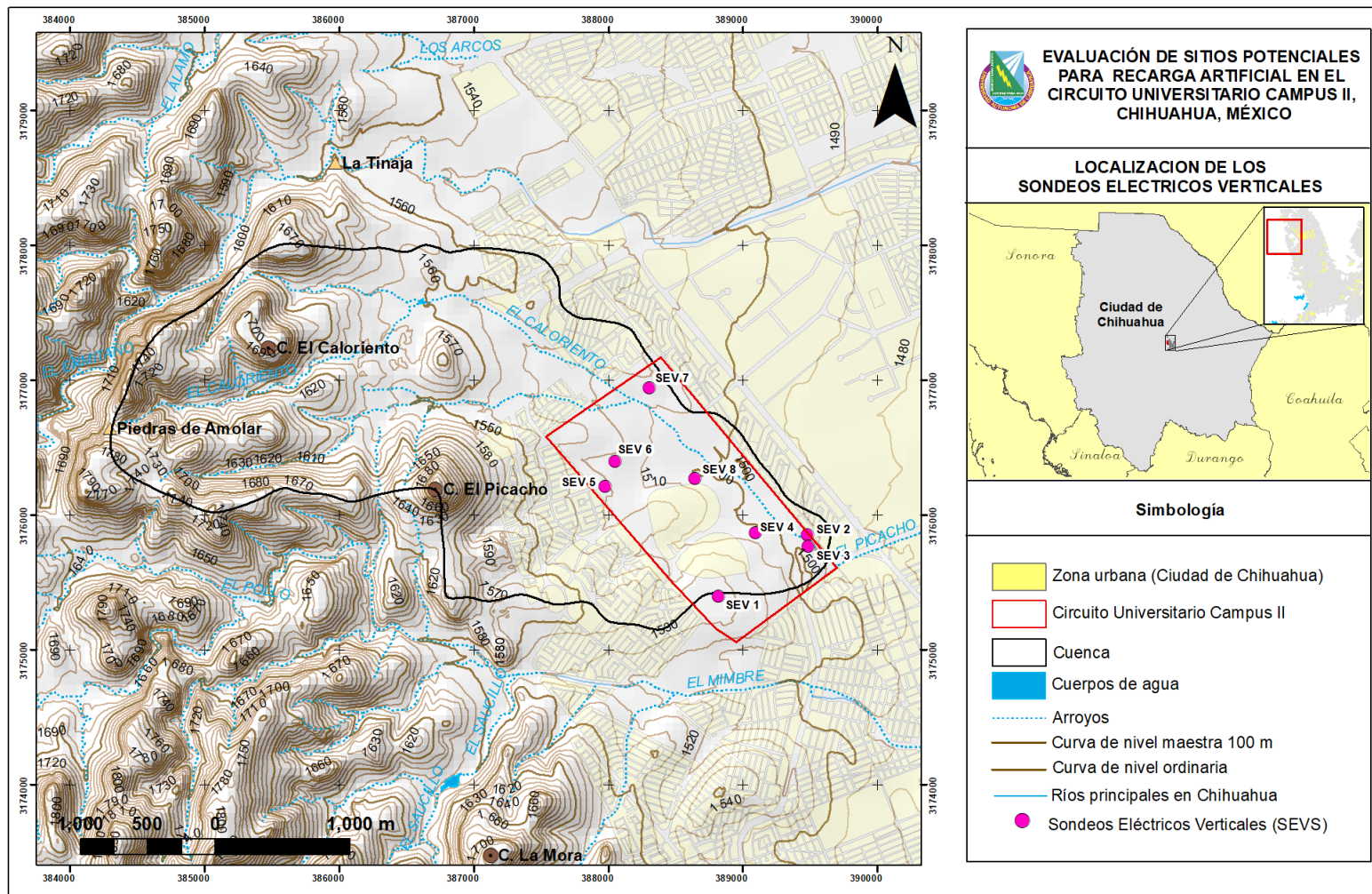


Figura 33. Mapa de localización de los SEVS

Interpretación de los SEVS

El SEV 1 alcanzó una profundidad de 71.86 m. En este sondeo se identificaron 4 capas, de las cuales, dos de ellas se unificaron. En la Figura 34 se muestra la interpretación de este sondeo y en la Tabla 6 se presentan la interpretación geológica del sondeo.

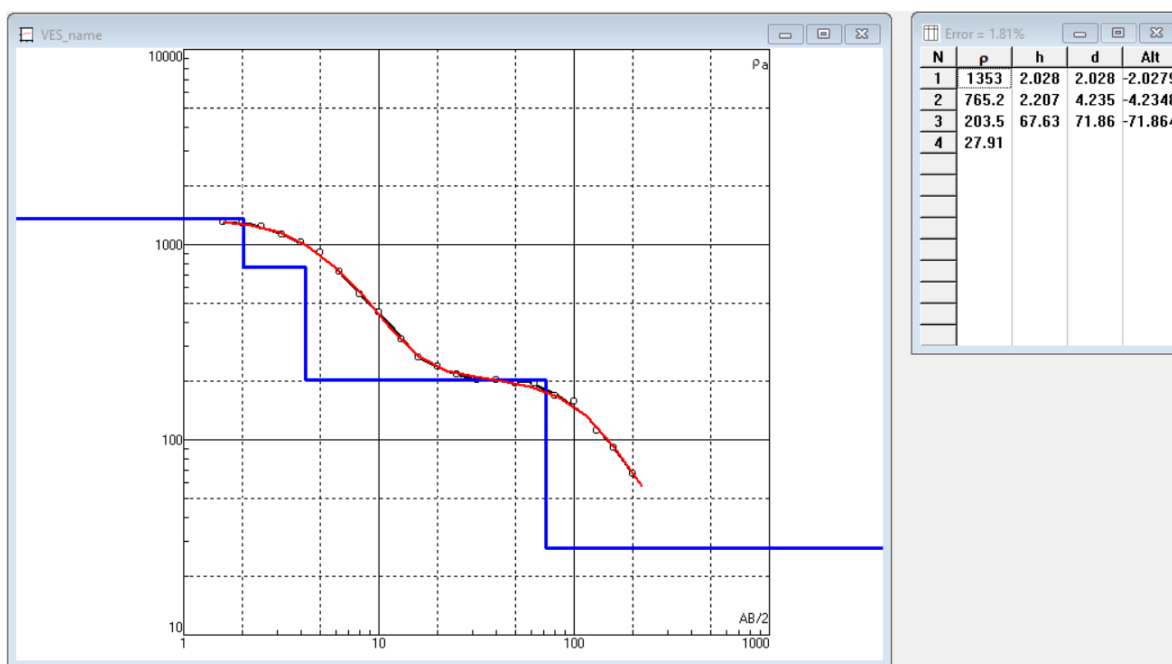


Figura 34. Interpretación del SEV 1

Tabla 6. Interpretación geológica del SEV 1

Material	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Profundidad (m)
Aluvión	4.23	765.2 - 1353	4.23
Conglomerado	67.63	203.5	71.86
Toba fracturada	Infinito	2.91	Infinito

En el SEV 2 se encontraron 5 capas, de las cuales se unificaron dos. La profundidad máxima que se identificó en este sondeo fue de 120 m. La interpretación de este sondeo se muestra en la Figura 35 y en la Tabla 7 se presenta la caracterización geológica del sondeo.

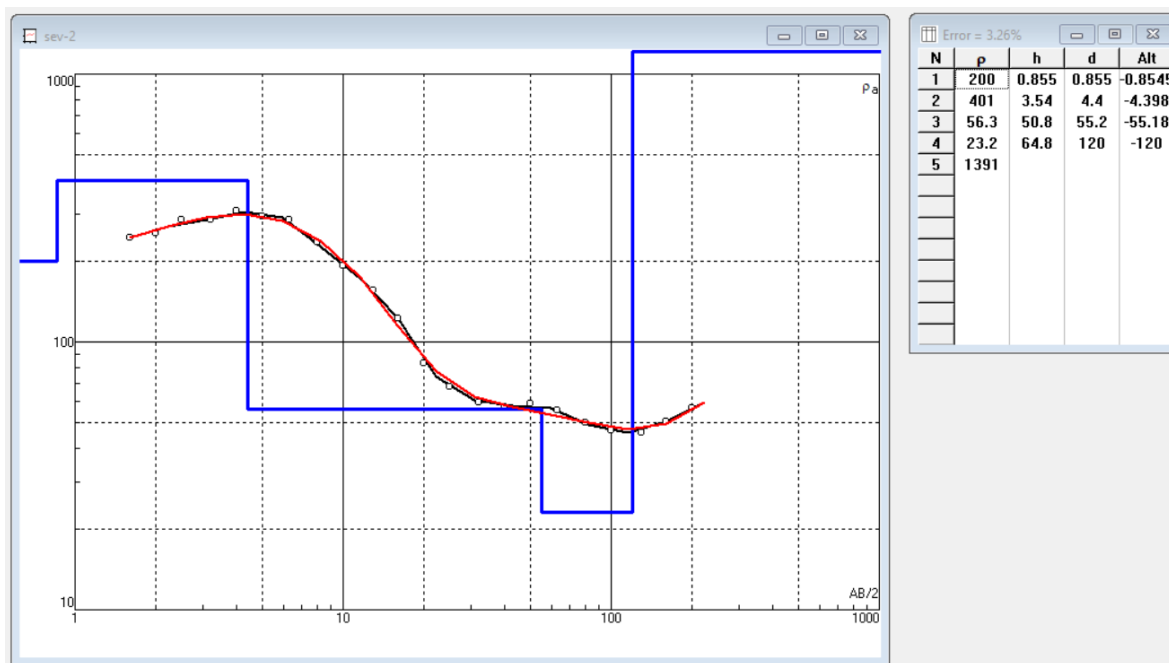


Figura 35. Interpretación del SEV 2

Tabla 7. Interpretación geológica del SEV 2

Material	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Profundidad (m)
Conglomerado	4.4	200 - 401	4.4
Arenas finas	50.8	56.3	55.2
Arenas - arcillas	64.8	23.2	120
Arenisca	Infinito	1391	Infinito

En el SEV 3 se identificaron 5 capas y al igual que en los sondeos anteriores, las primeras dos capas se unificaron por sus altas y variadas resistividades, las cuales son propias del

suelo. En este sondeo la profundidad máxima alcanzada fue de 33.9 m. En la Figura 36 se muestra la interpretación del sondeo y en la Tabla 8 la interpretación geológica.

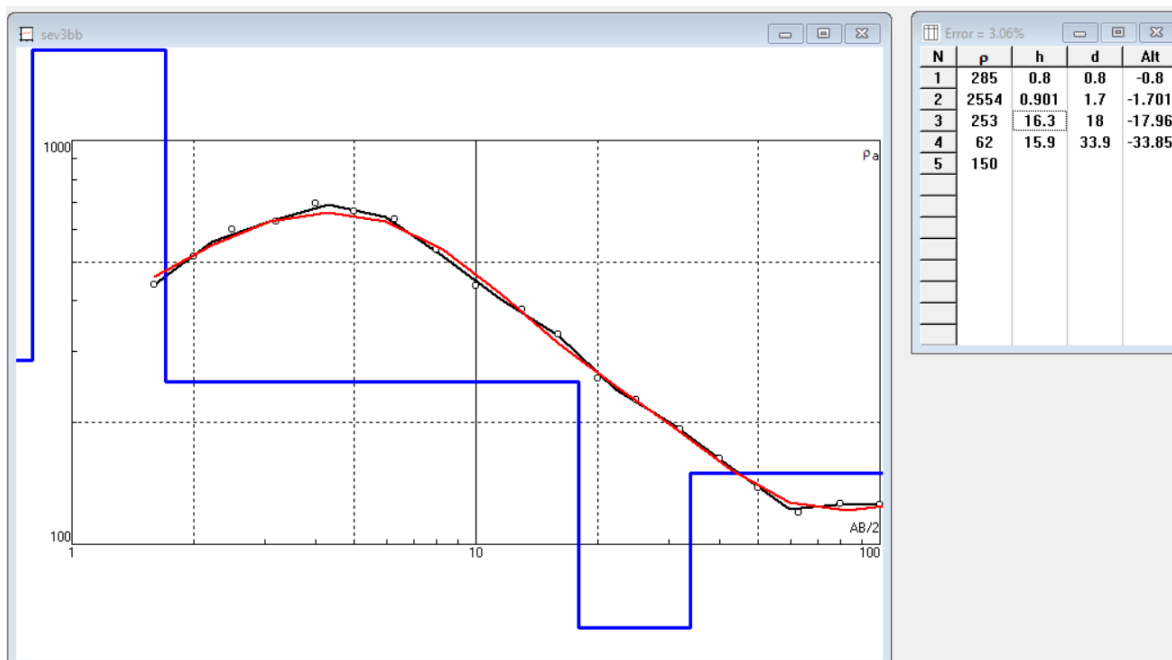


Figura 36. Interpretación del SEV 3

Tabla 8. Interpretación geológica del SEV 3

Material	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Profundidad (m)
Suelo compacto	1.7	285 - 2554	1.7
Conglomerado	16.3	253	18
Arenas finas	15.9	62	33.9
Conglomerado	Infinito	150	Infinito

El SEV 4 se detectaron 5 capas, alcanzado una profundidad máxima de 31.5 m. Al tener resistividades altas y variadas en las primeras capas, se decidió unificarlas para una mejor

interpretación geológica. La interpretación de este sondeo se muestra en la Figura 37 y en la Tabla 9 se presenta la caracterización geológica del sondeo.

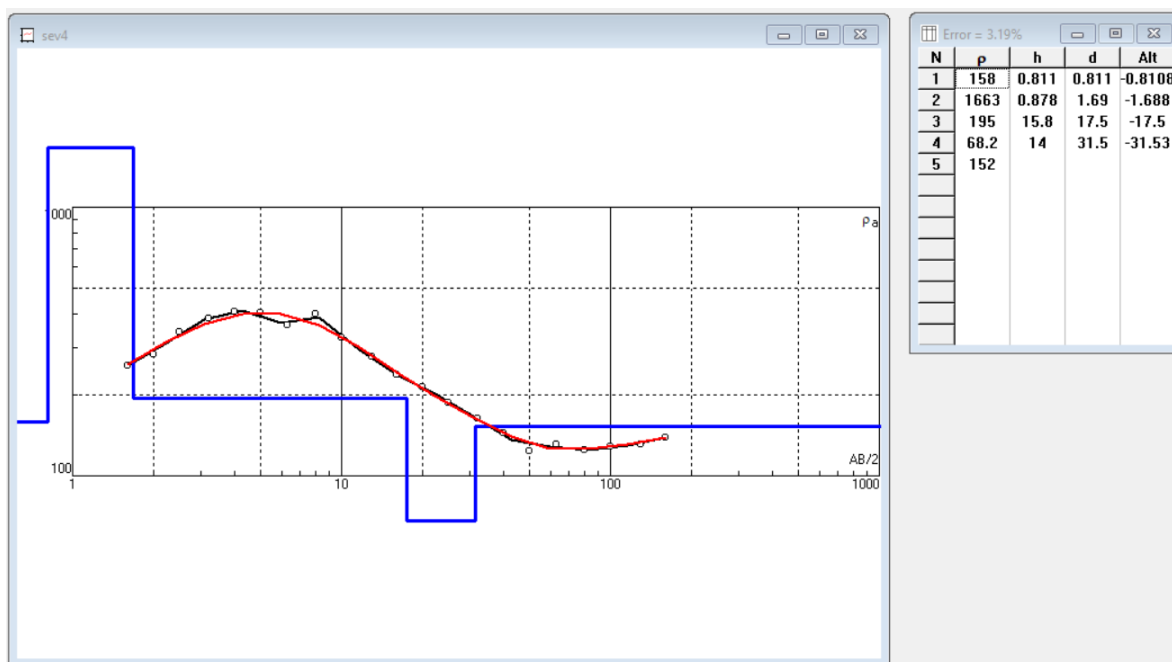


Figura 37. Interpretación del SEV 4

Tabla 9. Interpretación geológica del SEV 4

Material	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Profundidad (m)
Suelo compacto	1.68	158 - 1663	1.68
Conglomerado	15.8	195	17.5
Tobas arenosas	14	68.2	31.5
Conglomerado	Infinito	152	Infinito

En el SEV 5 la máxima profundidad alcanzada fue de 60.4 m y al igual que en los sondeos anteriores, también se encontraron 5 unidades. La Figura 38 muestra la interpretación del sondeo y en la Tabla 10 se muestra el material asignado para cada capa.

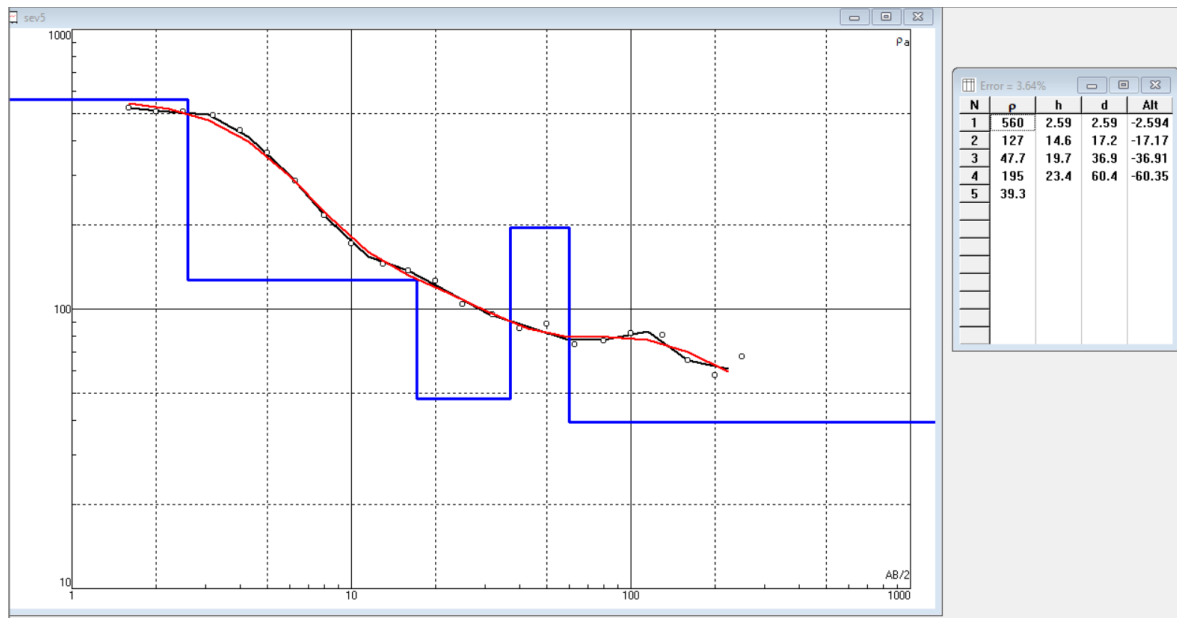


Figura 38. Interpretación del SEV 5

Tabla 10. Interpretación geológica del SEV 5

Material	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Profundidad (m)
Aluvión	2.59	560	2.59
Conglomerado	14.6	127	17.2
Toba arenosa	19.7	47.7	36.9
Conglomerado	23.4	195	60.4
Toba fracturada	Infinito	39.3	Infinito

El SEV 6 alcanza 6 capas y la profundidad máxima fue de 143 m. La última capa muestra una resistividad de 0.804 Ω m, la cual es propia de materiales arcillosos o saturados. De acuerdo con los niveles estáticos de los pozos tomados en la zona de estudio, esta unidad se puede

interpretar como un material saturado. La interpretación de este sondeo se muestra en la Figura 39 y en la Tabla 11 se presenta el material asignado para cada una de las unidades.

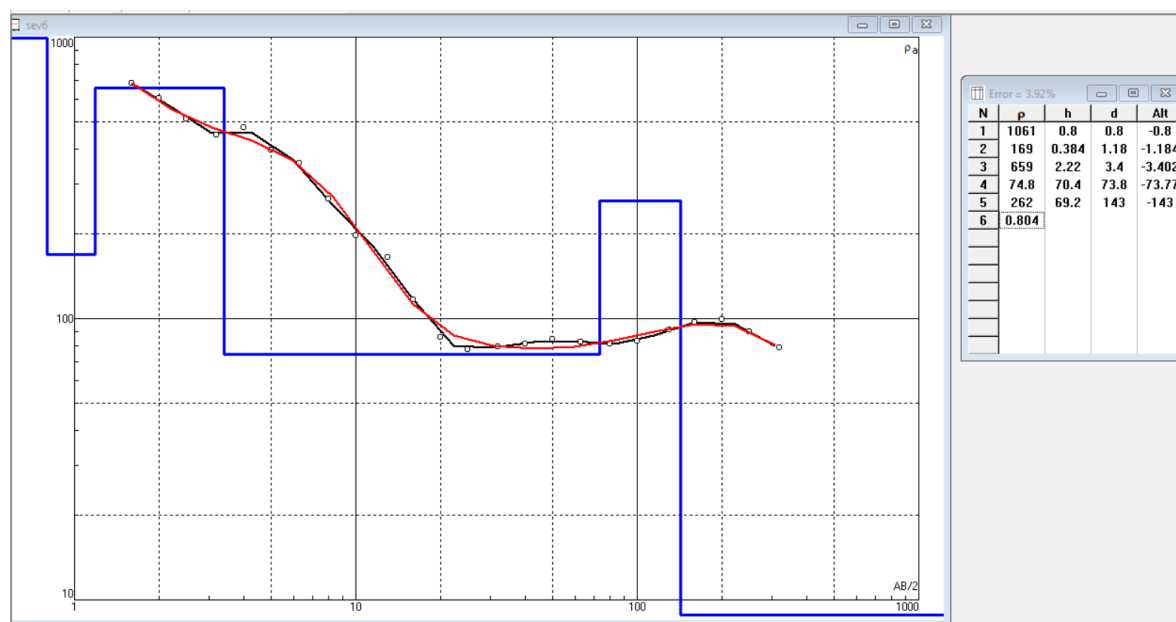


Figura 39. Interpretación del SEV 6

Tabla 11. Interpretación geológica del SEV 6

Material	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Profundidad (m)
Aluvión	3.4	169 - 1061	3.4
Toba arenosa	70.4	74.8	3.4
Riolita	69.2	262	143
Toba fracturada sat.	Infinito	0.804	Infinito

El SEV 7 fue interpretado con 5 capas, de las cuales dos de ellas fueron unificadas para una mejor interpretación geológica. En este sondeo la máxima profundidad fue de 156 m. Después de esta profundidad, se interpretó una resistividad de 1.98 Ω m, la cual es propia de materiales arcillosos, pero de acuerdo con los cortes litológicos de la zona y al nivel

estático de los pozos, se ha interpretado como una toba fracturada saturada. En la Figura 40 se muestra la interpretación del sondeo y en la Tabla 12 se presenta la interpretación geológica de cada uno de los materiales.

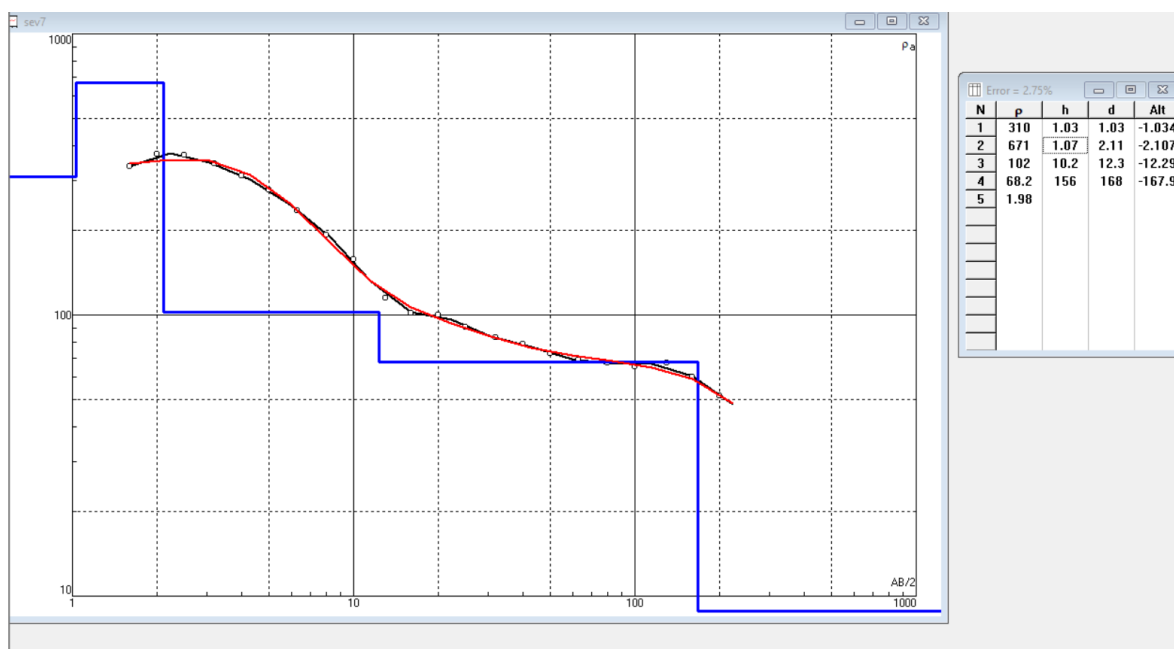


Figura 40. Interpretación del SEV 7

Tabla 12. Interpretación geológica del SEV 7

Material	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Profundidad (m)
Suelo compacto	2.11	310 - 671	2.11
Conglomerado	10.2	102	12.3
Toba arenosa	156	68.2	168
Toba fracturada sat.	Infinito	1.98	Infinito

En el SEV 8 se identificaron 4 capas alcanzando una profundidad máxima de 21.5 m. Este sondeo se realizó en una zona de caliche, donde el suelo es duro y no permitió profundizar más. La interpretación de este sondeo se muestra en la Figura 41 y en la Tabla 13 se presenta la interpretación geológica para cada una de las unidades.

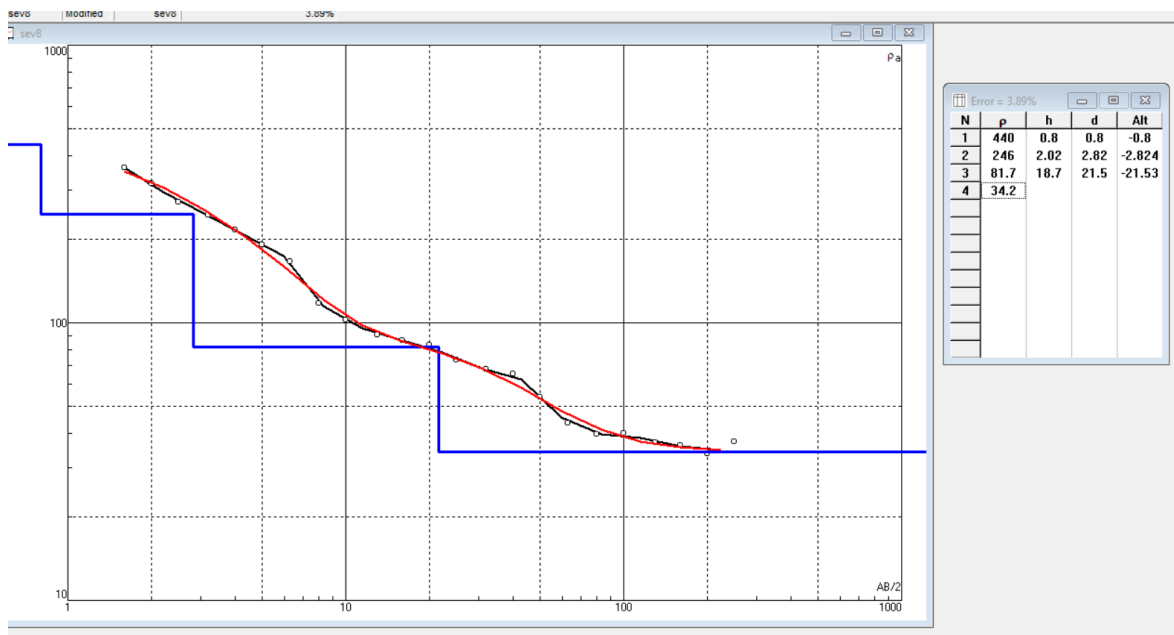


Figura 41. Interpretación del SEV 8

Tabla 13. Interpretación geológica del SEV 8

Material	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Profundidad (m)
Suelo compacto	0.8	440	0.8
Conglomerado	2.02	246	2.82
Toba arenosa	18.7	81.7	21.5
Toba fracturada	Infinito	34.2	Infinito

Perfiles geo eléctricos

La interpretación de las unidades geo eléctricas fue hecha en base a los cortes litológicos de la JCAS, los SEVS realizados por Bejar (2013) y los niveles estáticos de los pozos. Con la información obtenida se elaboraron 3 perfiles geo eléctricos.

El perfil geo eléctrico 1 se elaboró con el SEV 4, SEV, 8 y SEV 7. En este perfil se presentan 6 unidades, la capa superior está formada por suelo compacto (caliche), el cual se aprecia en campo. A esta unidad se le asignaron resistividades superiores a 300 Ω -m y un espesor de 2 metros. A esta capa le subyace un estrato de conglomerado, el cual tiene un espesor de aproximadamente 10 m. Las resistividades para esta capa varían entre 100 y 250 Ω -m. La siguiente unidad es la toba arenosa a la cual se le asignaron resistividades que oscilan entre 65 y 85 Ω -m. Esta capa aumenta hacia el hacia el norte, ya que en el SEV 4 y SEV 8 el espesor es de 18 m y en el SEV 7 es de 156 m. En las últimas unidades el espesor es desconocido, ya que fue la última capa en cada uno de los SEVS. En el SEV 4 se encontró conglomerado al cual sobreyace la toba arenosa. En el SEV 8 se presentó toba fracturada con resistividades de 34 Ω -m y en el SEV 7 se encontró una unidad con resistividades inferiores a 2 Ω -m la cual se interpretó como toba fracturada saturada con base a los niveles estáticos de los pozos aledaños. En la Figura 42 se muestra la interpretación del perfil geo eléctrico 1.

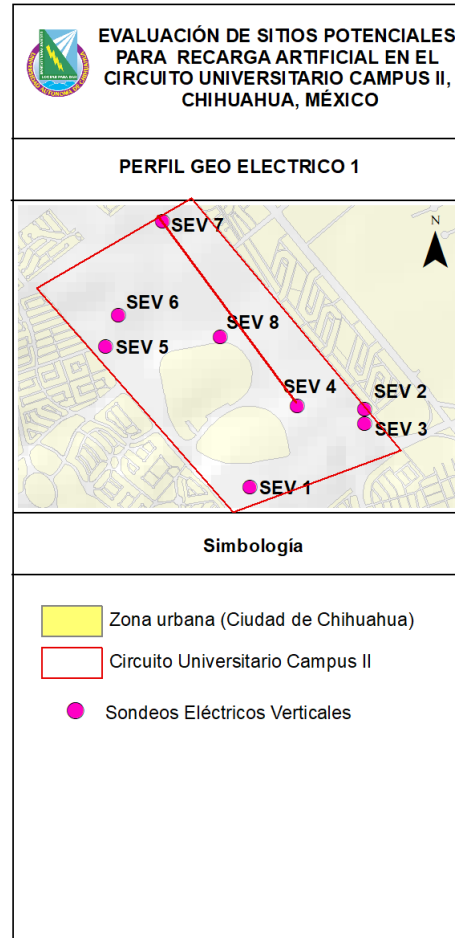
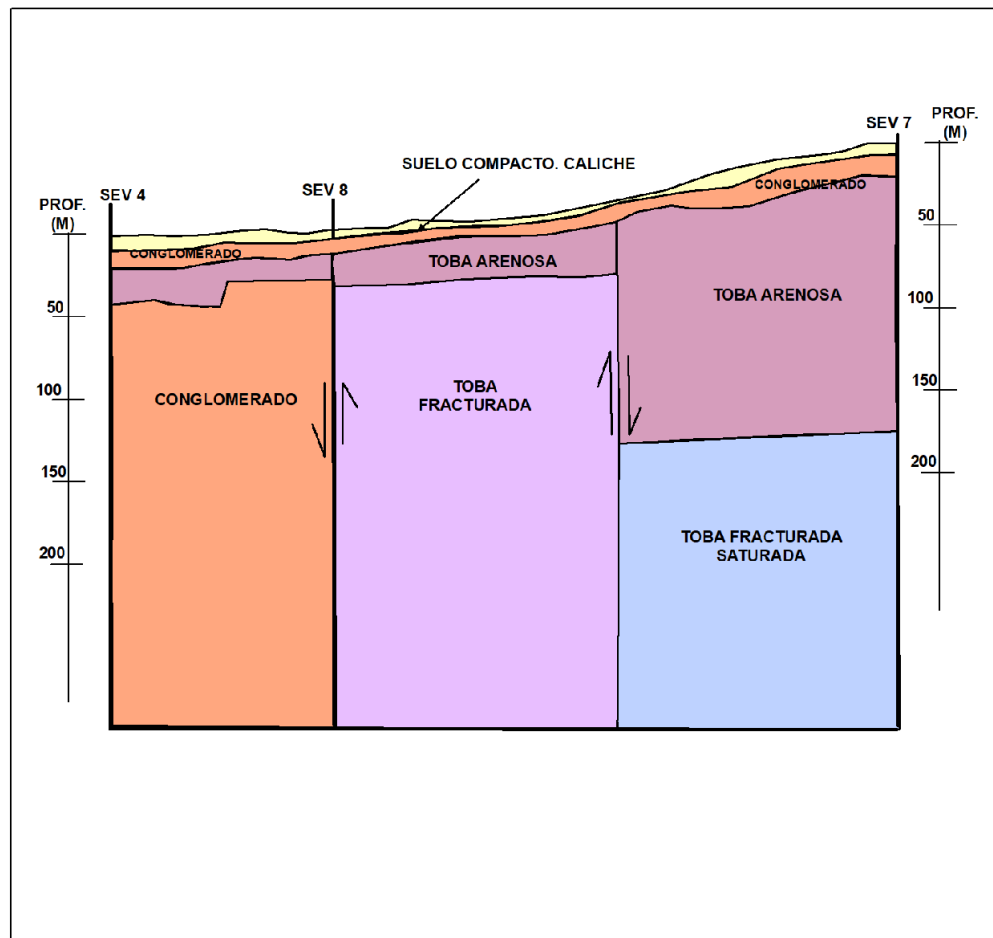


Figura 42. Perfil geo eléctrico 1

El perfil geo eléctrico 2 (Figura 43) se desarrolló con el SEV 1, SEV 5 y SEV 6. A este perfil se le asignaron 6 unidades. La primera unidad es el aluvión, el cual disminuye hacia el norte, ya que comienza con 6 m en el SEV 1 y se degrada a 1 m en el SEV 6. Las resistividades para esta capa oscilan entre 500 y 1500 Ω -m. A este estrato lo subyace el conglomerado con resistividades que varían entre 127 y 204 Ω -m, el cual se identificó en el SEV 1 con un espesor de 68 m y en el SEV 5 con 14 m y 24 m de espesor. La siguiente unidad es la toba fracturada, a la cual se le asignaron resistividades entre 28 y 40 Ω -m. Esta unidad se encontró al final de los SEVS, por lo cual no se le asignó un espesor. En el SEV 6 la resistividad en esta unidad disminuyó a 0.804 Ω -m por lo cual se interpretó como toba fracturada saturada, en base a la profundidad del nivel estático de los pozos aledaños. En el SEV 5 y SEV 6 se encontró una toba arenosa con resistividades que varían entre 47 y 75 Ω -m. El espesor aumenta hacia el SEV 6 con un espesor de 70 m. La última unidad interpretada en este perfil es una riolita con 69 m de espesor y resistividad de 262 Ω -m.

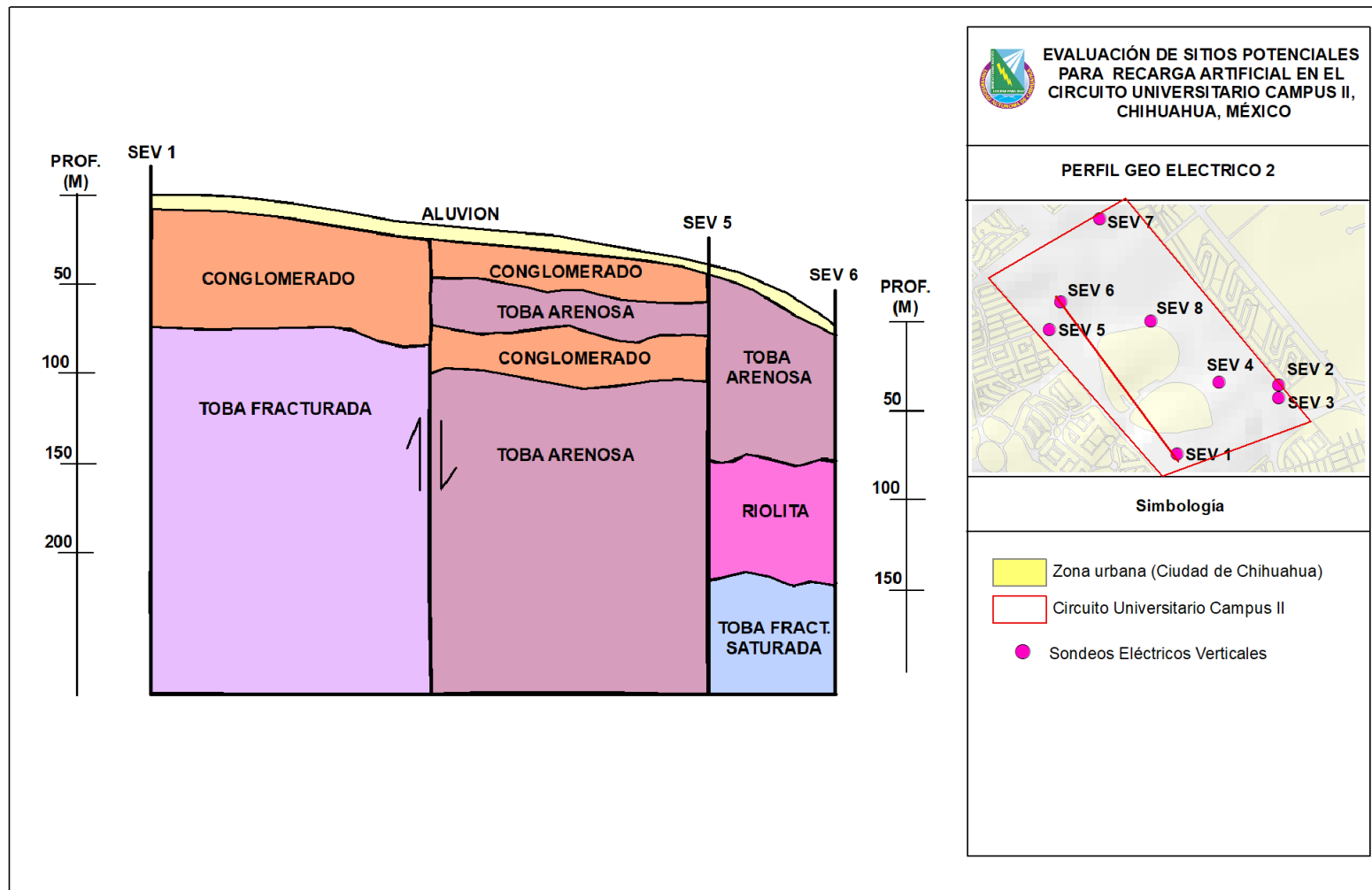


Figura 43. Perfil geo eléctrico 2

El perfil geo eléctrico 3 se realizó con el SEV 2 y SEV 3 (Figura 44). Para este perfil se interpretaron 5 unidades. La primera capa es suelo compacto (caliche), el cual se aprecia en campo. Esta unidad tiene un espesor de 2 m y resistividades que varían entre 150 y 2500 Ω -m. A esta unidad la subyace el conglomerado, el cual tiene un espesor que oscila entre 4 y 16 m y las resistividades varían entre 200 y 400 Ω -m. Esta unidad también se presentó en la última capa del SEV 3 por lo cual no es posible identificar el espesor. Al conglomerado lo sobreyace un estrato de arenas finas, el cual se identificó con resistividades de 56.3 Ω -m y un espesor que aumenta hacia el norte, ya que en el SEV 3 tiene 16 m de espesor y en el SEV 2 se incrementó a 50 m. En el SEV 2 también se identificó una capa de arenas y arcillas con un espesor de 65 m y resistividad de 23 400 Ω -m. La última unidad localizada en el SEV 2 se interpretó como arenisca por el alto valor de la resistividad (1391 Ω -m). En el Anexo III se muestran algunas fotografías del trabajo realizado en campo.

5.7 Reconocimiento del arroyo El Picacho

Para la presente investigación se llevó a cabo un recorrido de campo a lo largo de arroyo El Picacho con el objetivo de conocer en qué condiciones se encuentra el arroyo.

- **Inicio del recorrido**

El recorrido del Arroyo El Picacho comenzó a un costado de Cinemex, en la Avenida Homero y Lateral del Periférico de la Juventud. En las coordenadas 389602.74 m E 3175676.28 m N. El reconocimiento se realizó sobre el arroyo en dirección NE. En los primeros 35 m se observa el canal en buen estado (Figura 45).



Figura 45. Fotografía del inicio del recorrido

- **Segmento destruido**

En los siguientes 37.90 m la acción del agua rompió y levanto el piso del canal, observándose fragmentos del canal como arenas, gravas y conglomerado (Figura 46). El conglomerado expuesto tiene un espesor de 11.70 m, el cual se localiza en las coordenadas 389584 m E 3175706 m N.



Figura 46. Fotografías del segmento destruido y conglomerado

- **Segmento canalizado (con desperfectos)**

En este segmento, hay varios hoyos y placas levantadas (Figura 47). Esta sección mide 50 m y se encuentra en las coordenadas 389562.58 m E 3175733.91 m N.



Figura 47. Fotografía del segmento canalizado

- **Segmento destruido y arcilla**

Esta sección del arroyo no está canalizada, en una parte se observa que el agua quebró la estructura, pero también hay partes donde parece que nunca estuvo canalizado. Este tramo tiene 60.5 m de largo y se observa el conglomerado en el piso y en las paredes del canal. También se observan lentes de arcilla. Después de las lluvias, el agua se queda estancada en esta área, localizándose en las coordenadas 389435.50 m E 3175828.08 m N (Figura 48).



Figura 48. Fotografía del segmento destruido y arcilla

- **Espacio en buen estado**

En este punto inician 256 m del arroyo en buen estado (Figura 49). Existe una entrada de agua al arroyo por medio del periférico de la Juventud. En las coordenadas 389212.36 m E 3175982.59 m N hay dos entradas de agua, una viene de la Facultad de Medicina y la otra viene de un canal que pasa por en medio de la Facultad de Contaduría y Administración (FCA), la Facultad de Ingeniería (FING) y la Facultad de Medicina. FCA, FING y Medicina.



Figura 49. Fotografías del segmento en buen estado

- **Segmento con maleza**

En este punto se observan hierbas dentro del arroyo como “maleza”. Son 16 m de maleza, seguido de 9 m de agua estancada con materiales de arrastre y 28 m más de maleza (Figura 50), en total son 53 m. En la coordenada 389177.30 m E 3176026.91 m N hay una bajada de agua y arriba del arroyo a un costado de Medicina se observan grietas de desecación.



Figura 50. Fotografías del segmento con maleza y agua estancada

- **Fracción de agua estancada**

En este punto se observa agua estancada (Figura 51), pero no se ve tan sucia como en el punto anterior. De esta agua se observan 24.5 m de largo. Se termina debajo del puente. Del puente hacia el norte, el canal esta sin agua, con arrastre de arenas y gravas y se encuentra en buen estado.



Figura 51. Fotografía de la fracción con agua estancada

- **Canal en buen estado**

A partir de este punto el canal se encuentra en buen estado y tiene 6 entradas de agua, la primera se encuentra a 2 m del puente de medicina, la segunda entrada a 97 m del puente, la tercera a 124 m del puente, la cuarta a 147 m del puente y la quinta a 228 m del puente. En estas 5 entradas el agua proviene de los dos estacionamientos de la Facultad de Medicina y la sexta entrada de agua viene de un arroyo. Este arroyo se localiza a 288 m del puente de medicina. A un costado de la Facultad de Educación Física se observó una entrada de agua por medio de tres tubos (Figura 52).



Figura 52. Fotografías del canal en buen estado

- **Concreto levantado y entrada de agua dañada**

En los siguientes 37 m se observó el piso del canal levantado y una entrada de agua dañada. En la Figura 53 se muestran dos fotografías de este segmento.



Figura 53. Fotografías del concreto levantado

- **Acumulaciones de arena y entrada de agua por tubos**

En este tramo es de 175 m se observaron dos entradas de agua por medio de tubos y sobre la pared del canal se encuentran acumulaciones de arena fina y arena gruesa en los costados, teniendo entradas de agua por escurrimientos (Figura 54).



Figura 54. Fotografías de acumulaciones de arena

- **Concreto abierto y levantado**

En este segmento del canal, las paredes del canal están abiertas, aumentado el ancho del canal de 2 a 4 m. En 130 m más adelante, el canal se vuelve a cerrar y el piso esta levantado. Este tramo se localiza al norte del Estadio Universitario (Figura 55).



Figura 55. Fotografías del concreto abierto y levantado

5.8 Estudio hidrológico

Una cuenca hidrográfica es el área que aporta al escurrimiento y que este es descargado en un mismo punto, en otras palabras, es el área drenada por un sistema de cauces. El área de una cuenca es la superficie en proyección horizontal, delimitada por su divisoria (parteaguas) (Campos, 1998). El área de la cuenca del presente estudio es de 9.07 km² y el perímetro es de 13.96 km. Campos (1998) clasifica esta cuenca como pequeña, ya que el autor define como cuenca pequeña cuando es menor a 25 km².

Parámetros de forma

- **Índice de forma**

Este parámetro da a conocer cómo se puede comportar una cuenca dependiendo de las crecidas. Se calcula con el ancho promedio de la cuenca y la longitud axial, como se expresa en la ecuación (1), propuesta por Raghunath (2006).

$$IF = Ap/La \quad (1).$$

El valor para el área de estudio es de 0.31 lo que significa que es una cuenca alargada. En este tipo de cuencas las precipitaciones son diferentes en las distintas áreas de la cuenca (Camino *et al.*, 2018).

- **Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc)**

El índice de Gravelius o coeficiente de compacidad es el valor que relaciona el límite de la cuenca con el perímetro de un círculo de igual superficie que el de la cuenca. La fórmula utilizada es propuesta por Campos (2018), ecuación (2),

$$Kc = 0.282 * P / \sqrt{A} \quad (2)$$

Este parámetro tiene como objetivo describir la geometría de la cuenca y está estrechamente vinculado con el tiempo de concentración del sistema hidrológico, ya que proporciona información de las fuerzas y ondas de las crecidas, por lo cual,

permite estimar el tiempo que tarda en llegar el agua desde donde comienza el cauce principal hasta donde finaliza.

Para el área de estudio el valor de este parámetro es de 1.30, el cual es representativo de cuencas alargadas e indica menor peligrosidad en las crecidas, ya que distribuyen el escurrimiento durante más tiempo. (Camino *et al.*, 2018).

- **Relación de elongación (Re)**

Este parámetro expresa la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la cuenca y la longitud máxima de la cuenca. Expresa la relación que existe entre el área de la cuenca con el cauce principal que la drena. La ecuación (3) es propuesta por Campos (2018),

$$Re = D / Lc = 1.1284\sqrt{A}/Lc \quad (3)$$

El valor de la cuenca es de 0.63, lo que Campos (1998) describe cuencas alargadas con relieves fuertes y pendientes pronunciadas del terreno.

Parámetros del relieve

Las propiedades del relieve de la cuenca juegan un papel importante dentro del área, ya que estos factores dependen la velocidad del escurrimiento y los procesos de infiltración. De estas características también depende el tiempo de concentración y la dimensión de los caudales durante la precipitación.

- **Altura máxima de la cuenca:** 1790 msnm
- **Altura mínima de la cuenca:** 1487 msnm
- **Altura media de la cuenca:** 1639 msnm
- **Desnivel absoluto de la cuenca:** 303

Pendiente de la cuenca

Otro parámetro importante dentro de la cuenca es la pendiente, ya de esta depende el tipo de drenaje, el diseño de los cauces, la velocidad y el tipo de escorrentía. Para el presente estudio, la pendiente se estimó mediante 3 criterios: Alvord, Horton y Nash.

- **Criterio de Alvord**

Campos (1998) define que la pendiente de la cuenca es igual a la longitud total de las curvas de nivel dentro de ella, multiplicada por el desnivel constante entre estas y dividida entre el tamaño de la cuenca. Lo cual se expresa con la siguiente ecuación (4),

$$S_c = (D * L) / A \quad (4)$$

Para el área de estudio la pendiente es de 17.59 %.

- **Criterio de Horton**

Campos (1998) describe el procedimiento de este criterio por medio de la creación de una malla de cuadrados sobre la cuenca (es mejor orientar la malla en el sentido del cauce principal). Una vez establecida la malla se mide la longitud de cada una de las líneas dentro de la cuenca y se cuentan las intersecciones de cada línea con las curvas de nivel. La pendiente de la cuenca en ambas direcciones X y Y, se calculan de acuerdo con las siguientes ecuaciones (5 y 6):

$$S_x = n_x(D)/L_x \quad (5)$$

$$S_y = n_y(D)/L_y \quad (6)$$

Para el área de estudio la pendiente es de 10.86 %.

- **Criterio de Nash**

Springall (s/f) define que es necesario trazar una malla de cuadrados por encima del plano topográfico de la cuenca (es necesario obtener 100 intersecciones). Por cada intersección se mide la distancia mínima entre las curvas de nivel y la pendiente en ese punto, se estima como la relación entre el desnivel de las curvas de nivel y la mínima distancia medida. De esta forma, se calcula la pendiente en cada una de las intersecciones y el promedio será la pendiente de la cuenca. En ocasiones, las intersecciones pueden ocurrir entre niveles del mismo valor, en este caso la pendiente se considera nula y no se toma en cuenta para el

promedio. En este criterio, se puede construir una gráfica de distribución de frecuencias de las pendientes medias y de esta forma conocer la distribución total de la pendiente de la cuenca.

Para el área de estudio la pendiente es de 17.64 %.

Parámetros de la red de drenaje

La red de drenaje es el conjunto de cauces que fluyen dentro de una cuenca, siendo estos de manera temporal o permanente. Este parámetro es importante, ya que proporciona información sobre las características del suelo y de la superficie de la cuenca (Campos, 1998).

Las corrientes se clasifican en tres tipos: perennes, intermitentes y efímeras. En el área de estudio las corrientes son efímeras, ya que solamente lleva agua en épocas de lluvia.

Orden de corriente

Campos (1998) describe el orden de corriente como una clasificación que muestra el grado de ramificación dentro de una cuenca. Para el área de estudio, se clasificó el orden de corriente como 3, ya que el cauce principal tiene varias ramificaciones. En la Tabla 14 se muestra el número y la longitud total de los cauces de acuerdo con el número de orden.

Tabla 14. Numero de orden de corriente

No. De orden	No. De cauces	Total de longitud Km
1	28	15.4
2	6	9.56
3	1	3.73
Suma	35	28.69

Densidad de drenaje

La densidad de drenaje ayuda a identificar zonas favorables para la infiltración, ya que cuencas con baja densidad de drenaje generalmente presentan mayor capacidad de

infiltración (Horton, 1945). Este parámetro se define como la longitud total de todos los cauces dividida entre el área de la cuenca. Campos (1998) propone la ecuación (7),

$$Dd = \frac{\sum L}{A} \quad (7)$$

Generalmente se tienen valores altos en zonas de rocas débiles o de suelos impermeables y muestra una red de drenaje bien desarrollada y una escorrentía torrencial capaz de ocasionar inundaciones intensas. Los valores bajos se encuentran en áreas de rocas resistentes o de suelos muy permeables, donde el suelo es débil e indica una escorrentía moderada y una alta permeabilidad del terreno (Raghunath, 2006; Campos, 1998). Para el área de estudio se tiene un valor de 3.16, lo que se clasifica como densidad alta, según la clasificación tomada de Camino (2018).

Densidad de corrientes

Campos (1998) describe este parámetro como “Frecuencia de corrientes”, el cual representa el número total de cauces entre el área de la cuenca. Este valor muestra el grado de desarrollo de la red de drenaje y de la fragmentación del relieve. La fórmula es propuesta por Campos (1998), ecuación (8)

$$F_c = \frac{\sum Nu}{A} \quad (8)$$

Los valores altos, generalmente muestran una respuesta hidrológica rápida y una mayor generación de escurrimiento superficial (Horton, 1932). Para el área de estudio el valor es de 3.86.

Cauce principal

Longitud del cauce

La longitud del cauce principal es la distancia que recorre el flujo de agua desde el punto más lejano de la cuenca hasta el punto de salida. Este parámetro está fuertemente

relacionado con el tiempo de concentración, ya que entre más largo sea el cauce principal, mayor será el tiempo de concentración. Para el presente estudio el valor de la longitud del cauce es de 7.58 km.

Pendiente del cauce

La pendiente del cauce principal controla la velocidad de escurrimiento dentro de la cuenca. Las pendientes elevadas incrementan la escorrentía y la capacidad erosiva del cauce y disminuye el tiempo de concentración, mientras que las pendientes bajas favorecen a la infiltración y los procesos de sedimentación. Para el área de estudio, este parámetro se calculó por medio de tres métodos, Taylor y Schwartz longitud constante (1952), Taylor y Schwartz elevación constante (1952) y recta equivalente.

- **Taylor y Schwartz longitud constante (1952)**

Este método consiste en dividir el cauce en segmentos con la misma longitud y conocer la elevación en cada uno de ellos para calcular la pendiente por segmentos y de esta manera calcular la pendiente del cauce mediante la formula propuesta por Taylor y Schwartz longitud constante (1952), ecuación (9),

$$S = \left(\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \frac{1}{\sqrt{S_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right)^2 \quad (9)$$

$$S_i = \frac{\Delta h}{L_i}$$

Para el área de estudio la pendiente del cauce principal mediante este método es de 1.97%.

- **Taylor y Schwartz elevación constante (1952)**

Este método consiste en conocer la distancia entre cada una de las elevaciones, en caso de que las longitudes en cada uno de los tramos no sean iguales. Por esta razón Taylor y Schwartz (1952) propusieron la siguiente ecuación (10),

$$S = \left(\frac{L}{\frac{I_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{I_2}{\sqrt{S_2}} + \frac{I_3}{\sqrt{S_3}} + \dots + \frac{I_m}{\sqrt{S_m}}} \right)^2 \quad (10)$$

El valor de la pendiente del cauce principal es de 2.33%.

- **Recta equivalente**

Para este método, la pendiente se obtiene mediante una línea recta que se coloca en al inicio y final del cauce principal, teniendo en consideración que el área debe de ser igual tanto arriba como abajo. La Figura 56 muestra un ejemplo de este método.

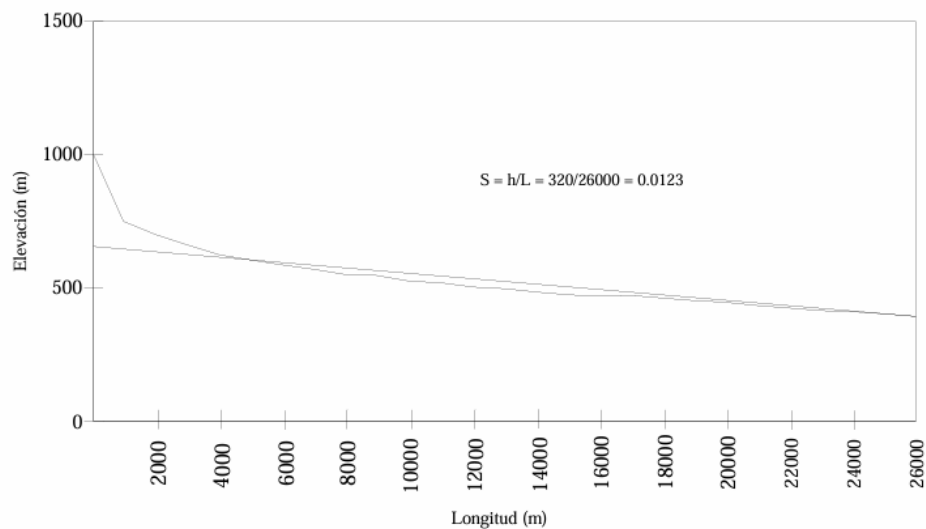


Figura 56. Pendiente del cauce principal mediante la recta equivalente

Para el área de estudio la pendiente del cauce principal mediante este método es de 2.09%.

Número de escurrimiento

El número de escurrimiento es un coeficiente adimensional que indica la capacidad de una cuenca para generar escurrimiento superficial. Este parámetro depende del tipo de suelo, la cobertura vegetal y uso del suelo, además de la pendiente del terreno y del contenido de humedad en la cuenca. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2016) desarrollo un informe con los números de escurrimiento de la República Mexicana

considerando la edafología, la cobertura vegetal y el uso del suelo. En la Tabla 15 se muestran los valores desarrollados por el IMTA para el matorral xerófilo y para la zona urbana, los cuales son parte del área de estudio. En la Tabla 16 se muestran los números de N para el área de estudio de acuerdo con el área de cada la cobertura vegetal y al uso de suelo.

Para el área de estudio se considera el número de escurrimiento con 89.35, de acuerdo con la tabla desarrollada por el IMTA. En el Anexo I se muestra la tabla con los datos desarrollados por el IMTA.

Tabla 15. Número de escurrimiento de acuerdo con la cobertura vegetal

Tabla 16.
de

Cobertura vegetal o uso de suelo	Grupo de suelo				Número
	A	B	C	D	
Matorral xerófilo	48	67	77	83	
Zona urbana	79	86	91	94	

escurrimiento del área de estudio

Cobertura vegetal o uso de suelo	Tipo de suelo	Grupo de suelo	Área km ²	N	N*Área
Matorral	Leptosol	D	3.5037	83	290.81
Matorral	Cambisol	C	0.2113	77	16.27
Matorral	Luvisol	C	0.0025	77	0.19
Zona urbana	Zona urbana	D	5.3595	94	503.79

Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento es un parámetro adimensional que muestra la proporción de la precipitación que se transforma en escurrimiento superficial. Este parámetro se estima mediante la adaptación de un coeficiente de escurrimiento con las características del área de estudio, tales como la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la pendiente (Raghunath, 2006).

El valor de este parámetro se calculó de acuerdo con la NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. En el Anexo II se muestra la tabla con los valores del coeficiente de escurrimiento de acuerdo con el tipo de suelo. En la Tabla 17 se muestran los valores para cada tipo de suelo del área de estudio. El valor de este coeficiente es de 0.54.

Tabla 17. Coeficientes de escurrimiento del área de estudio

Cobertura vegetal o uso de suelo	Tipo de suelo	Grupo de suelo	Área km²	C	C*Área
Matorral	Leptosol	C	3.5037	0.26	290.81
Matorral	Cambisol	B	0.2113	0.26	16.27
Matorral	Luvisol	B	0.0025	0.00	0.19
Zona urbana	Zona urbana	C	5.3595	0.80	503.79

Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda una gota de agua en llegar desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de descarga. Existen varios métodos para calcular este parámetro, pero para el presente estudio se calculó mediante la fórmula de Kirpich para tiempos de concentración menores de 10 horas, ecuación (11), Basso, ecuación (12) y Kirpich para pendientes entre 3 % y 10 %, ecuación (13). En la Tabla 18 se muestran los resultados del tiempo de concentración.

Tabla 18. Tiempo de concentración del área de estudio

Fórmula	Tiempo en horas	Tiempo en minutos
Kirpich	1.14 horas	68.32 min
Basso	1.15 horas	69.09 min
Kirpich	1.13 horas	68.06 min

$$T_c = 0.0003245 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (11)$$

$$T_c = 0.067 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (12)$$

$$T_c = 0.066 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (13)$$

Donde:

L, es la longitud del cauce principal en km

S, es la pendiente del cauce principal

Precipitación media anual

La precipitación media es el valor promedio de precipitación registrada en un área durante un periodo de tiempo específico. Para conocer este valor se puede calcular mediante varios métodos, isoyetas, Thiessen, algebraico y topográfico. Para el presente estudio se calculó por medio del método algebraico y por el método de topografía. Las estaciones seleccionadas para conocer la precipitación media fueron la Estación 8185 localizada al suroeste de la zona de estudio y la Estación 8040 ubicada al sur-sureste del área de estudio.

Método algebraico

La precipitación media de la estación 8185 es de 399.49 mm y de la estación 8040 es de 335.03 mm. El promedio de estas dos estaciones es de 367.26 mm.

Método topográfico

Para este método se tomaron las precipitaciones medias anuales de un periodo de 42 años (1981 al 2022). El objetivo de esta metodología es crear una estación compuesta con las estaciones cercanas al área de estudio. Para la presente investigación se dividió la cuenca en dos áreas, la zona alta y la zona baja de acuerdo con los valores de la topografía. A la zona alta le corresponde la estación 8185 y comprende el 35.60 % de la cuenca. Para la zona baja se tomaron los datos de la estación 8040 y cubre el 64.40 % de la cuenca. En la Tabla 19 se muestran los datos de precipitación de la estación 8185, estación 8040 y de la estación compuesta. La precipitación media anual para la estación compuesta es de 337 mm.

En la Tabla 20 se presenta un resumen de los parámetros obtenidos que caracterizan la cuenca.

Tabla 19. Datos de precipitación de la estación compuesta

	ZONA ALTA	ZONA BAJA	CUENCA
Año	ppt acum. (mm)	ppt acum. (mm)	Estación compuesta
1981	565.22	121.9	201
1982	245.75	69.9	70
1983	293.62	167.3	167
1984	425.39	224	224
1985	512.97	340	340
1986	757.02	414.2	414
1987	566.69	421.4	421
1988	336.71	209	209
1989	341.51	62.6	63
1990	899.22	156.7	157
1991	614.06	197.4	197
1992	493.97	227.2	227
1993	238.19	106.1	106
1994	178.52	104.8	105
1995	274.47	179	179
1996	385.69	240.3	240
1997	318.68	247	247
1998	199.7	325.34	325
1999	268.38	427.01	427
2000	120.93	551.25	551
2001	268.78	280.25	280
2002	428.39	427.45	427
2003	343.45	353.15	353
2004	648.9	708.43	708
2005	438.7	454.37	454
2006	305.99	339.81	340
2007	265.29	321.21	321
2008	490.16	507.73	508
2009	321.91	323.13	323

2010	436.51	487.66	488
2011		181.37	181
2012		344.51	345
2013		561.9	562
2014		399.1	399
2015		372.2	372
2016		563.2	563
2017		563.2	563
2018		563.2	563
2019		563.2	563
2020		166.3	166
2021		422.9	423
2022		374.6	375

Tabla 20. Resumen de los parámetros que caracterizan la cuenca

CARACTERISTICAS DE LA CUENCA

Área	9.07 km ²
Perímetro	13.96 km
Parámetros de forma	
Índice de forma	0.31
Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)	1.3
Relación de elongación (Re)	0.63
Parámetros del relieve	
Altura máxima de la cuenca	1790 msnm
Altura mínima de la cuenca	1487 msnm
Altura media de la cuenca	1639 msnm
Desnivel absoluto de la cuenca	303 msnm
Pendiente de la cuenca	
• Criterio de Alvord	17.59 %
• Criterio de Horton	10.86 %
• Criterio de Nash	17.64 %
Parámetros de la red de drenaje	
Número de orden	3
Densidad de drenaje	3.16
Densidad de corrientes	3.86
Cauce principal	
Longitud del cauce	7.58 km
Pendiente del cauce	
• Taylor y Schwartz longitud constante (1952)	1.97 %
• Taylor y Schwartz elevación constante (1952)	2.33 %
• Recta equivalente	2.09 %
Número y coeficiente de escurrimiento	
Número de escurrimiento	89.35
Coeficiente de escurrimiento	0.54
Tiempo de concentración	
• Kirpich	1.14 horas
• Basso	1.15 horas
• Kirpich	1.13 horas
Precipitación media anual	
Método algebraico	367.26 mm
Método topográfico	337.00 mm

Alturas de precipitación

Las curvas de Intensidad-Duración-Tiempo de retorno (IDTr) tienen como objetivo conocer la magnitud (intensidad) de la precipitación sobre un punto y sobre eso poder realizar el diseño de obras hidráulicas de protección y almacenamiento, tales como puentes, alcantarillas, drenaje urbano, presas, etc. Dichos valores son importantes para estimar costos de construcción y valorar riesgos en las obras (Aparicio, 1992; Rivera, 2013; Marquez, 2020). Cheng (1983) desarrolló una fórmula para conocer la intensidad de la lluvia en diferentes periodos de tiempo a partir de los registros de la precipitación máxima diaria y en 1 hora, ecuación (14).

$$R = \frac{P_{60}^2}{P_{1140}^2} \quad (14)$$

Donde:

P_{60}^{Tr} es la precipitación acumulada en una hora

P_{1140}^{Tr} es la precipitación acumulada en un día

El tiempo de retorno (Tr) para ambos coeficientes es 2

La fórmula del coeficiente de lluvia se utiliza en la ecuación de Cheng-Lung-Chen para calcular las alturas de precipitación con periodos de retorno iguales o mayores a diez años. Este coeficiente relaciona la precipitación de 1 día y un periodo de retorno de 100 años y la lluvia de 1 día con un periodo de retorno de 10 años ecuación (15).

$$F = \frac{P_{1140}^{100}}{P_{1140}^{10}} \quad (15)$$

Donde:

P_{1140}^{100} es la precipitación de 1 día (en minutos) con un periodo de retorno de 100 años

P_{1140}^{10} es la precipitación de 1 día (en minutos) con un periodo de retorno de 10 años

La ecuación 16 muestra la fórmula desarrollada por Chen (1983) para calcular la intensidad de la precipitación.

$$i_D^{Tr} = \frac{aP_{60}^{10} \log(10^{2-F} T_r^{F-1})}{(D + b)^c} \quad (16)$$

Donde:

i_D^{Tr} es la intensidad de la precipitación en mm/hora

P_{60}^{10} es la altura de precipitación en mm para un periodo de retorno de 10 años y una duración de 1 hora

D es la duración, min, $5 \leq D \leq 1,440$

T_r es el periodo de retorno en años

F es el cociente lluvia-periodo de retorno

a, b y c son coeficientes obtenidos a partir de las ecuaciones propuestas por Campos (2010).

Estos valores se calculan en función del coeficiente R (lluvia-duración), ecuación 17.

$$\begin{aligned} a &= -1028.902R^4 + 1256.228R^3 - 432.5438R^2 + 100.0389R - 2.297536 \\ b &= -598.7461R^4 + 757.9172R^3 - 341.4349R^2 + 96.94864R - 9.845761 \\ c &= -20.06288R^4 + 29.09596R^3 - 16.08111R^2 + 5.069294R - 0.064983 \end{aligned} \quad (17)$$

Para conocer el valor de la intensidad de lluvia (I) en función a la duración (D) y al tiempo de retorno (T_r) se necesita el registro de precipitación máxima en 24 horas y en 1 hora. Para la presente investigación, se utilizaron las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). En la Tabla 21 se muestran los valores de las precipitaciones máximas diarias, ordenadas de mayor a menor para conocer el tiempo de retorno.

La Tabla 22 muestra los resultados de la intensidad para el área de estudio y en la Figura 57 se muestran las curvas I-D- T_r . El tiempo de concentración es de 68.32 minutos, valor con el cual se estima que la intensidad de una tormenta para 2 años es de 22.73 mm. Para 5 años se calculan 26.70 mm y en 10 años se estima una intensidad de 29.70 mm.

Tabla 21. Precipitaciones máximas diarias

Año	Ppt. Max. (mm) Est. Compuesta	Ppt. Max. (mm) Est. Compuesta - Ordenados, de mayor a menor	m	T_r (años)
1981	50.5	101	1	43.00

1982	32	92	2	21.50
1983	40	91.5	3	14.33
1984	45	88.4	4	10.75
1985	56	72.6	5	8.60
1986	51	69.5	6	7.17
1987	69.5	64.7	7	6.14
1988	35	63.2	8	5.38
1989	50.5	62.5	9	4.78
1990	101	60	10	4.30
1991	51	59.1	11	3.91
1992	41	59.1	12	3.58
1993	30.2	57.7	13	3.31
1994	28.2	56.4	14	3.07
1995	88.4	56.4	15	2.87
1996	57.7	56.4	16	2.69
1997	28.6	56.4	17	2.53
1998	30.5	56	18	2.39
1999	54	55.2	19	2.26
2000	72.6	54	20	2.15
2001	63.2	51	21	2.05
2002	43.6	51	22	1.95
2003	62.5	50.5	23	1.87
2004	91.5	50.5	24	1.79
2005	59.1	50.5	25	1.72
2006	27	45	26	1.65
2007	29.6	43.6	27	1.59
2008	59.1	41	28	1.54
2009	27.5	40	29	1.48
2010	60	38.8	30	1.43
2011	38.8	35.7	31	1.39
2012	64.7	35	32	1.34
2013	92	35	33	1.30
2014	50.5	32	34	1.26
2015	35	30.5	35	1.23
2016	56.4	30.2	36	1.19
2017	56.4	29.6	37	1.16

2018	56.4	28.6	38	1.13
2019	56.4	28.2	39	1.10
2020	23.8	27.5	40	1.08
2021	55.2	27	41	1.05
2022	35.7	23.8	42	1.02

Tabla 22. Intensidad-Duración-Período de retorno

Intensidad - Duración - Período de Retorno I-D-TR mm										
Período de Retorno (Tr) años										
		2	5	10	20	50	100	500	1000	10000
Tiempo (min)	5	89.73	105.40	117.26	129.11	144.79	156.64	184.17	196.03	235.41
	15	59.40	69.78	77.63	85.48	95.85	103.70	121.93	129.78	155.85
	68.32	22.73	26.70	29.70	32.70	36.67	39.67	46.65	49.65	59.63
	60	25.02	29.38	32.69	36.00	40.36	43.67	51.34	54.65	65.63
	120	14.71	17.27	19.22	21.16	23.73	25.67	30.18	32.13	38.58
	180	10.60	12.45	13.85	15.25	17.10	18.50	21.75	23.15	27.80
	360	5.95	6.98	7.77	8.56	9.59	10.38	12.20	12.99	15.60
	720	3.22	3.78	4.20	4.63	5.19	5.61	6.60	7.03	8.44
	1140	2.22	2.60	2.90	3.19	3.58	3.87	4.55	4.84	5.82

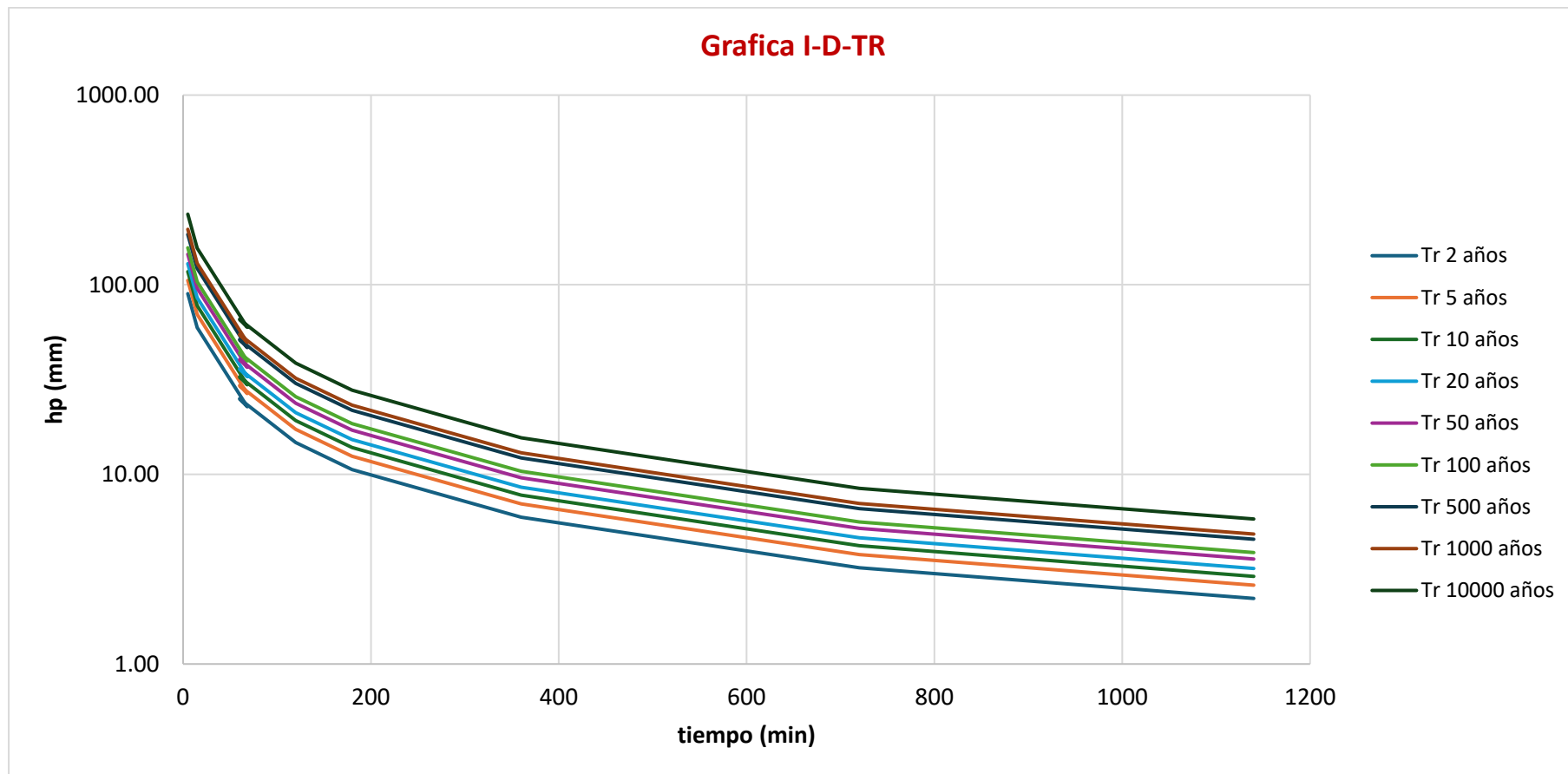


Figura 57. Curvas de Intensidad-Duración-Periodo de retorno

Gastos máximos

La magnitud de las obras hidráulicas es definida por los gastos máximos que puede aportar una cuenca. Para la presente investigación, los caudales máximos fueron calculados por métodos empíricos. Se utilizó la fórmula de U.S. Soil Conservation Service (SCS) y el método racional.

El método SCS utiliza algunos criterios establecidos por el SCS como el cálculo de la lluvia en exceso en base al Número es escurrimiento.

La ecuación 18 muestra la fórmula definida por el SCS.

$$Q = q \cdot (Pe) \cdot A \quad (18)$$

Donde,

Q es el caudal máximo (m³/seg)

q es el gasto unitario

Pe es la precipitación estimada (mm)

A es el área de la cuenca (km²)

El valor de q (gasto unitario) se obtiene a partir de la Tabla 23 y el valor de la precipitación estimada se calcula a partir de la ecuación 19.

$$Pe = \frac{\left[P - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (19)$$

Tabla 23. Gasto unitario en función del tiempo de concentración (SARH, 1982. Pág. 74)

Tiempo de concentración (hr)	Gasto unitario en m ³ /seg/mm/km ²	Tiempo de concentración (hr)	Gasto unitario en m ³ /seg/mm/km ²	Tiempo de concentración (hr)	Gasto unitario en m ³ /seg/mm/km ²
0.1 o menor	0.337	1.0	0.156	8.0	0.039
0.2	0.300	1.5	0.120	10.0	0.034
0.3	0.271	2.0	0.100	12.0	0.03
0.4	0.246	2.5	0.086	14.0	0.027
0.5	0.226	3.0	0.076	16.0	0.025
0.6	0.208	4.0	0.063	18.0	0.023
0.7	0.195	5.0	0.054	20.0	0.021
0.8	0.18	6.0	0.048	22.0	0.02
0.9	0.168	7.0	0.043	24.0	0.019

En la Tabla 24 se muestran los resultados obtenidos mediante el método de SCS.

Tabla 24. Gastos máximos obtenidos por el método de SCS

Tr (años)	Ppt (mm)	Pe (mm)	Q max (m3/seg)
2	27.03	23.71	26.35
5	33.55	30.17	33.53
10	38.47	35.06	38.97
25	43.40	39.96	44.42
50	49.91	46.45	51.63
100	54.84	51.36	57.08
200	66.27	62.77	69.77
500	71.20	67.69	75.23
1000	87.56	84.03	93.39

El método racional define que en una cuenca pequeña el máximo porcentaje de escurrimiento se da cuando la totalidad de la cuenca contribuye al escurrimiento y que el porcentaje de escurrimiento es igual a un porcentaje de intensidad de lluvia promedio (SARH, 1982). Para lo cual se utiliza la ecuación 20.

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (20)$$

Donde

Q es el caudal máximo (m³/seg)

C es el coeficiente de escurrimiento

I es la intensidad de la lluvia (mm)

A es el área de la cuenca (km²)

Para este método la SARH (1982) utilizo la siguiente fórmula,

$$Q = 0.278 \cdot C \cdot I \cdot A$$

En la Tabla 25 se muestran los resultados de los caudales máximos obtenidos mediante el método racional.

Tabla 25. Gastos máximos obtenidos por el método racional

Tr (años)	I (mm)	Q max (m3/seg)
2	22.73	30.94
5	26.70	36.35
10	29.70	40.44
25	32.70	44.53
50	36.67	49.93
100	39.67	54.02
200	46.65	63.51
500	49.65	67.60
1000	59.63	81.18

Los gastos máximos para el área de estudio oscilan entre 26 y 31 m³/seg para un periodo de retorno de 2 años. Para 10 años se estima un caudal entre 33 y 36 m³/seg, y para 50 años se calcula un caudal máximo de 49 a 52 m³/seg. En la Tabla 26 se muestra un resumen de los gastos máximos estimados por método SCS y el método racional.

Tabla 26. Resumen de los gastos máximos

Tr (años)	SCS Soil Conservation Service	Racional
	Q max (m3/seg)	Q max (m3/seg)
2	26.35	30.94
5	33.53	36.35
10	38.97	40.44
25	44.42	44.53
50	51.63	49.93
100	57.08	54.02
200	69.77	63.51
500	75.23	67.60
1000	93.39	81.18

5.9 Identificar sitios de recarga mediante recorridos de campo y SEVS distribuidos en el Circuito Universitario

En el arroyo El Picacho hay segmentos que no están canalizados (dentro de las instalaciones del Circuito Universitario), los cuales pueden servir como áreas para desarrollar una obra de recarga.

Al inicio del canal, el oeste de Soriana Juventud, hay un segmento de aprox. 33 m que esta destruido, dando paso a la infiltración. 170 m mas adelante, se encuentra otro segmento que no está canalizado, y en esta área el agua se acumula durante la época de lluvias, pudiendo ser otra área de recarga. A 200 m hacia el noroeste de la Facultad de Medicina también se encuentra un segmento bastante destruido, donde la acción del agua ha destruido parte de la canalización, lo cual contribuye a la infiltración. Una cuarta opción de un sitio para realizar una obra de recarga es al noroeste del Estadio Universitario, ya que a 40 m la porción del canal también se encuentra bastante destruida. En este segmento el piso del canal se levanto y fracturo, por lo cual esta fractura también da paso a la infiltración. En la Tabla 27 se muestran las coordenadas de cada uno de los sitios propuestos y en la Figura 58 se presenta la ubicación de los sitios.

De acuerdo con los SEVS distribuidos en el Circuito Universitario, la zona mas favorable para realizar una obra de recarga es la porción sur, donde se realizaron los sondeos 2 y 3, ya esa zona esta formada por material sedimentario como conglomerado, gravas y arenas finas. Además de que según Espino (2023) menciona que el alto contenido de flúor en el agua se debe a las rocas ígneas félsicas extrusivas, las cuales se localizan en la porción noroeste del circuito.

Tabla 27. Sitios propuestos para una obra de recarga artificial

Sitios propuestos	Coordenadas UTM	
	Este	Norte
Sitio 1	389568.00	3175717.00
Sitio 2	389385.00	3175847.00
Sitio 3	388905.00	3176357.00
Sitio 4	388256.00	3176912.00

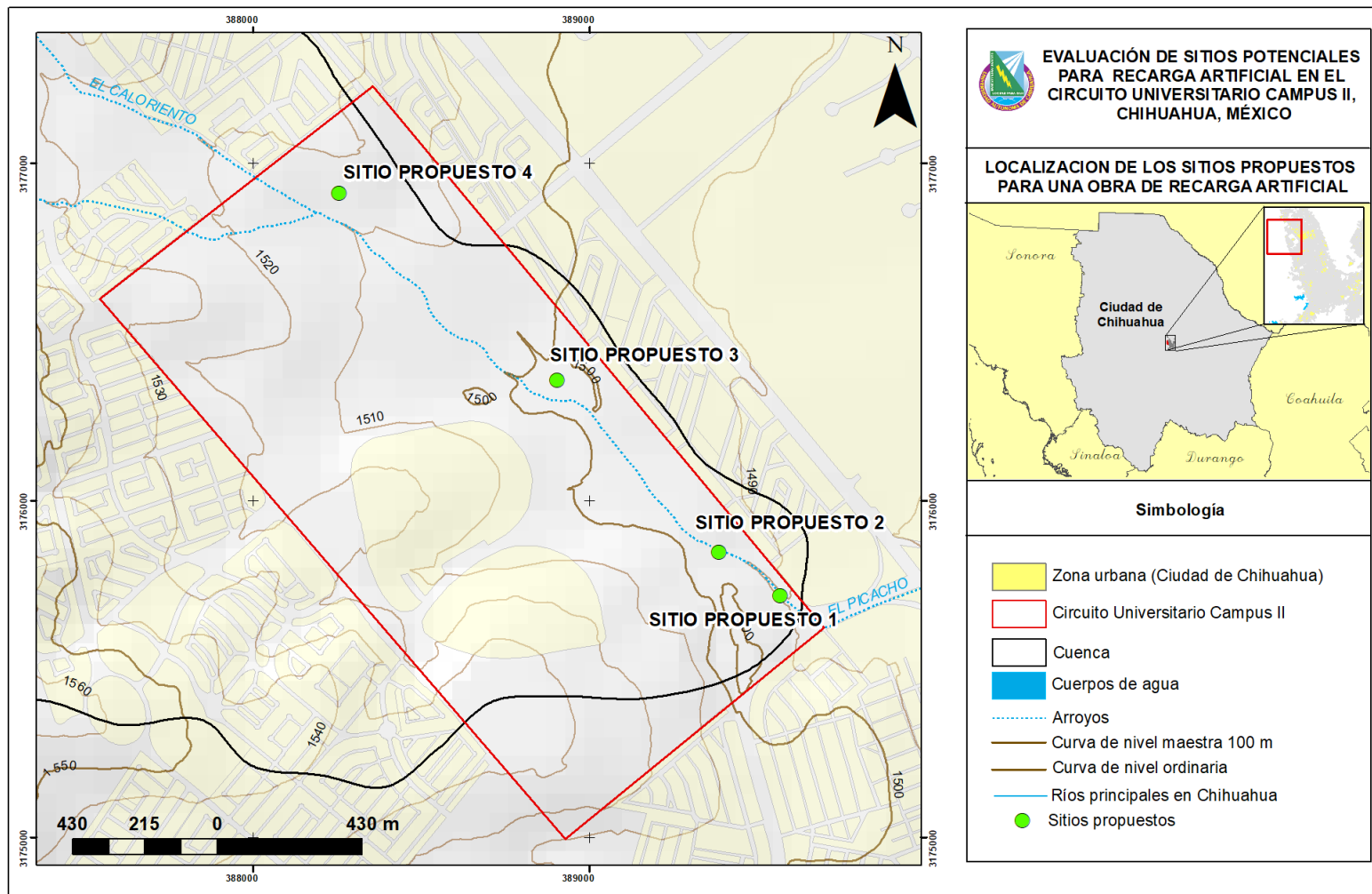


Figura 58. Mapa localización de los sitios propuestos para una obra de recarga artificial

5.10 Recomendar el sitio y una posible obra de recarga artificial a la Universidad Autónoma de Chihuahua.

En base a los recorridos de campo y a los SEVS el mejor sitio para realizar una obra de recarga es 70 m al noroeste del pozo Campus Universitario (sitio propuesto 2), ya que en este segmento el arroyo no está canalizado y se acumula el agua durante la época de lluvias. Además de que el material del subsuelo está formado por material sedimentario como conglomerado y arenas finas, que pueden ser utilizadas como un filtro natural. Otro punto importante para llevar una obra de recarga en este sitio es que tiene varias entradas de agua por medio de los estacionamientos de las facultades. Una segunda factible para realizar una obra de recarga es en el sitio propuesto 3, ya que en esta zona se podría llevar a cabo una balsa de infiltración (Figura 59).

Conforme a la literatura citada y a las características del área de estudio (tipo de materiales del subsuelo y espacio disponible), se recomiendan dos tipos de obras de recarga, una por el método de galerías de infiltración (Figura 60) y otra por el método de Tratamiento-Suelo-Acuifero (SAT). En los recorridos de campo se observó arcilla en la superficie y con el método de galerías de infiltración el agua de recarga pasaría directo al subsuelo y se disminuiría el porcentaje de evaporación. El método de Tratamiento-Suelo-Acuifero (Figura 61), se recomienda porque al infiltrarse el agua de manera natural, se mejoraría la calidad del agua, teniendo en cuenta que el agua de escorrentía se contamina al fluir por las calles, por lo cual, sería importante un tratamiento previo. En ambas metodologías el agua se filtraría a través de los materiales sedimentarios del subsuelo, pero con las galerías de infiltración la evaporación podría ser menos.

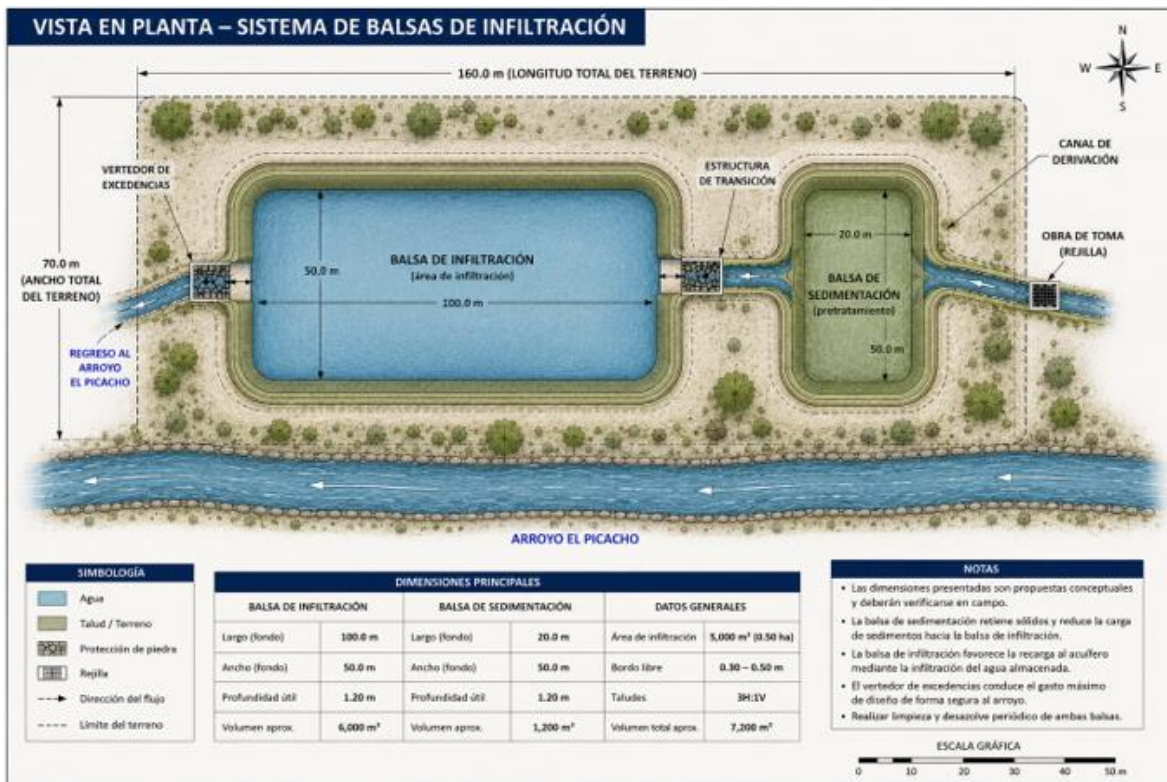


Figura 59. Balsa de infiltración

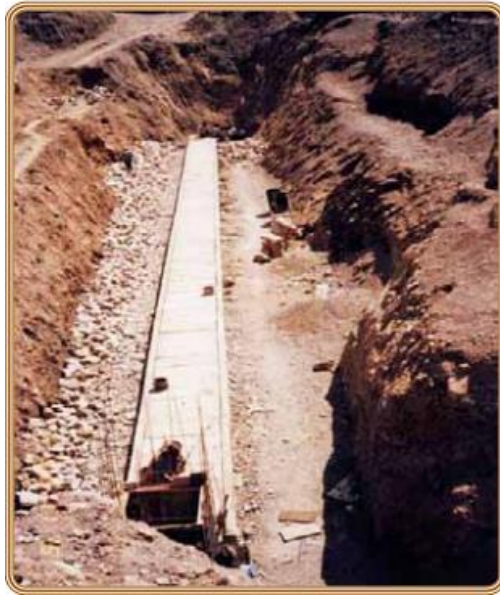


Figura 60. Galerías de infiltración. Imagen izq. (Viola, 2019). Imagen der. (PRONAR, 2004)

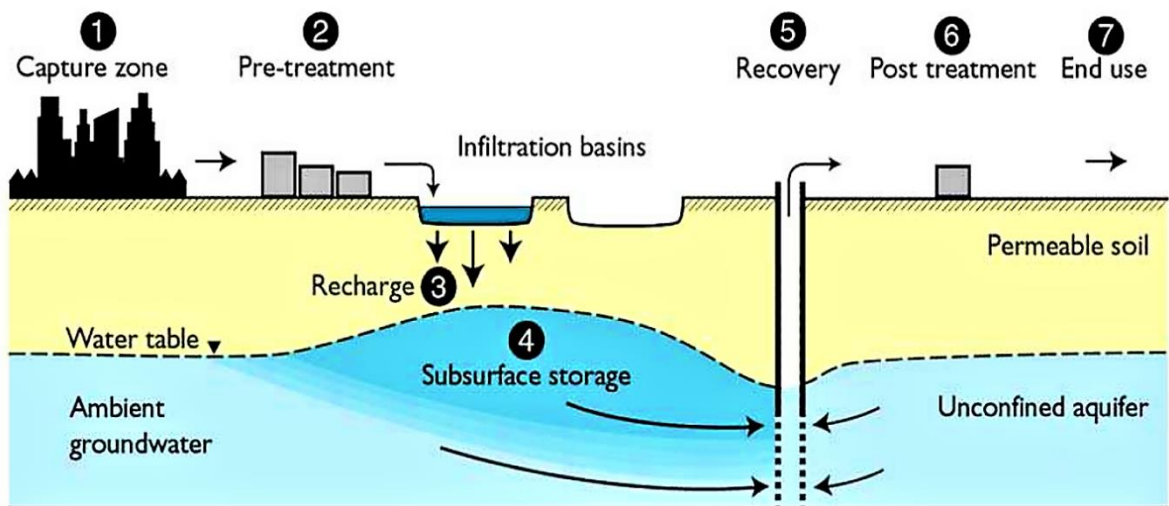


Figura 61. Método de Tratamiento-Suelo-Acuifero (SAT)

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

De acuerdo con la piezometría analizada, el área de estudio ha tenido un descenso de -10 a -50 m de profundidad en los niveles estáticos de los pozos

En base a los resultados fisicoquímicos de las muestras de agua tomadas en el arroyo, el agua tiene buena calidad para poder infiltrarse. Solo es necesario volver a tomar una muestra para monitorear los valores de flúor, ya que en la primera muestra el valor está por encima del límite permisible y en la segunda muestra está por debajo.

A partir del reconocimiento del arroyo El Picacho y al estudio geofísico, se podría llevar a cabo una obra de recarga de dispersión. El método de tratamiento-suelo-acuífero (SAT) es una opción, por el contenido de flúor en agua, ya que este método ayuda a mejorar la calidad del agua mediante la infiltración. Además de que el segmento del arroyo que se encuentra cerca del pozo Campus Universitario está formado por conglomerado, arenas finas y arcillas. Este material podría funcionar como un filtro natural para el agua de recarga. Una segunda opción de método de recarga es el método de galerías de infiltración. La ventaja de este método es que, al recargar el agua por medio de tuberías ranuradas en el subsuelo, disminuye el porcentaje de evaporación.

La ventaja de llevar a cabo una obra de recarga dentro del Circuito Universitario Campus II es que se podría monitorear, además de que el pozo Campus Universitario podría funcionar como pozo de observación.

6.2 Recomendaciones

Como parte del análisis de la calidad del agua, se recomienda realizar nuevos análisis fisicoquímicos en las primeras lluvias del año, a mediados de las lluvias y al final de la temporada de lluvias. De acuerdo con los registros de precipitación, la temporada de lluvias comienza en junio y termina en octubre. Para verificar el contenido de flúor en el agua superficial.

Anexo I. Valores del número de escurrimiento

Cobertura vegetal o uso de suelo	Grupo de suelo			
	A	B	C	D
Agrícola-Pecuaria	49	69	79	84
Agrícola-Pecuaria-Forestal	49	69	79	84
Agricultura de riego	62	71	78	81
Agricultura de temporal	67	78	85	89
Agua	90	90	90	90
Área sin vegetación	77	86	90	92
Asentamientos humanos	79	86	90	92
Bosque de Ayarín	40	62	76	81
Bosque de coníferas	36	55	70	77
Bosque de encino	36	60	73	79
Bosque de encino-pino	36	60	73	79
Bosque de oyamel	36	55	70	77
Bosque de pino	40	62	76	81
Bosque de pino-encino	36	60	74	80
Bosque de táscate	37	60	71	78
Bosque Latifoliado	26	52	62	69
Bosque mesófilo de montaña	36	60	70	77
Chaparral	50	69	79	84
Complementaria	30	8	71	78
Cuerpo de agua	95	95	95	95
Desprovisto de vegetación	77	86	90	92
Humedal con bosque	36	60	70	77
Manglar	36	60	70	77
Matorral desértico micrófilo	50	69	79	84
Matorral desértico rosetófilo	50	69	79	84
Matorral xerófilo	48	67	77	83
Otros tipos de vegetación	50	69	79	84
Palmar inducido	76	85	88	90
Pastizal	48	67	77	83
Pastizal cultivado	25	59	75	83
pastizal halófilo	48	67	77	83
Pastizal inducido	25	59	75	83
Pastos naturales	49	69	79	84
Popal	87	89	92	94
Sabana	39	61	47	80
Selva alta perennifolia	36	60	70	77
Selva alta superennifolia	36	60	70	77

Selva baja caducifolia	39	63	74	80
Selva baja perennifolia	46	68	78	84
Selva baja subcaducifolia	39	63	74	80
Selva baja subperennifolia	36	60	70	77
Selva caducifolia	39	61	74	80
Selva mediana subcaducifolia	39	63	74	80
Selva mediana subperennifolia	39	63	74	80
Semi-urbanizado	79	86	90	92
Sin vegetación aparente	68	79	86	89
Tular	90	90	90	90
Vegetación inducida	50	69	79	84
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	40	62	76	81
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	40	62	76	81
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	40	62	76	81
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	40	62	76	81
Zona urbana	79	86	91	94

Anexo II. Valores de K para obtener el coeficiente de escurrimiento

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

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

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

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

Anexo III. Fotografías del trabajo de campo



Referencias

Aparicio M., Francisco. 1992. Fundamentos de hidrología de superficie.

Bejar, G, Irving. 2013. Determinación de la resistividad eléctrica del suelo en la Universidad Autónoma de Chihuahua Campus II mediante sondeos eléctricos verticales. Tesis profesional presentada para obtener el grado de maestro en ingeniería por la Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

Camino, Mariana A.; Bó, María Juliana; Cionchi, José L.; Del Río, Julio L.; López de Armentia, Adriana; De Marco, Silvia G. Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires Revista Universitaria de Geografía, vol. 27, núm. 1, 2018 Universidad Nacional del Sur, Argentina Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383257036005>

Campos A., F. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. San Luis Potosí. S.L.P. Mexico.

Comisión Nacional para el Estudio de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. Cartas de Climas de la República Mexicana, escala 1 000 000, según el sistema de E. García.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2014. La biodiversidad en Chihuahua: Estudio de Estado. <https://www.cbd.int/doc/nbsap/study/mx-study-chihuahua-es.pdf>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2019. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales para la recarga artificial de acuíferos. Libro 38. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro38.pdf>

Comisión Nacional del Agua (2024). Actualización de la disponibilidad media de agua en el acuífero Chihuahua-Sacramento (0830), estado de Chihuahua. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/chihuahua/DR_0830.pdf

Custodio, E., y Llamas, M.R.1983. Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona, España.

Custodio, E. 2019. Recarga natural a los acuíferos, metodología y soporte de la isotopía del agua : aplicación a la planificación hidrológica y conocimiento de las aguas subterráneas en España : informe RAEMIA. DOI:[10.5821/ebook-9788498808148](https://doi.org/10.5821/ebook-9788498808148). ISBN: 9788498808148

Dillon, P., W. Alley, Y. Zheng, and J. Vanderzalm. 2022. Managed Aquifer Recharge: Overview and Governance. IAH Special Publication. <https://recharge.iah.org/>

Escolero F., Óscar; Gutiérrez O., Carlos y Mendoza C., Edgar Y. 2017. Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica. -- Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Espino, B., F. 2023. Geoquímica del fluoruro en el agua subterránea en la región de Chihuahua, Chih., México. Tesis profesional presentada para obtener el grado de maestro en ingeniería por la Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.

Fernández Escalante, Álvaro Enrique., García Rodríguez, Manuel., Villarroja Gil, Fermín. 2025. Inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo.

Heng Zhang, Yongxin Xu, Thokozani Kanyerere. 2020. A review of the managed aquifer recharge: Historical development, current situation and perspectives, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volumes 118–119.

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13(1), 350–361

Horton, R. E. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology*. Geological Society of America Bulletin, 56(3), 275–370.

Innovative Groundwater Solutions (INOWAS). Managed Aquifer Recharge. <https://www.inowas.com/mar/>

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua (IMPLAN). Ámbito Municipal. [https://implanchihuahua.org/Entorno.html#:~:text=Clima.,y%20semiseco%20semifr%C3%ADo%20\(0.9%25\)](https://implanchihuahua.org/Entorno.html#:~:text=Clima.,y%20semiseco%20semifr%C3%ADo%20(0.9%25))

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Normales Climatológicas por Estado. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=chih>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2016. Mapa Nacional de números de escurrimiento.

<http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1745>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. 1997. Estadísticas del Medio Ambiente

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/INF97.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. 2003. Síntesis de Información geográfica del estado de Chihuahua.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). Guía para la interpretación de cartografía : edafología : escala 1:250 000 : serie III / Instituto Nacional de Estadística y Geografía.-- México : INEGI, c2014.

Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua (JCAS)., Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH)., Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)., Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua (JMAS). 2013. Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria. Tomo 7.

Marquez, H. Marvin. 2020. Riesgos hidrológicos por inundación en la cuenca baja del arroyo los nogales sur en la ciudad de chihuahua. Tesis profesional presentada para obtener el grado de maestro en ingeniería por la Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.

<http://repositorio.uach.mx/404/1/Tesis%20Maestr%C3%ADa%20Marvin.pdf>

Olivas Chávez, R, 2022. Recarga inducida de acuíferos en fraccionamientos urbanos en la zona poniente de la ciudad de Chihuahua. Tesis profesional presentada para obtener el grado de maestro en ingeniería por la Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.

Orduño Torres, M. Á., 2015. Análisis del estado actual del abastecimiento de agua de la Ciudad de Chihuahua como base para impulsar esquemas de utilización de agua de lluvia.. Barcelona: s.n.

[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/76377/Ordu%20b1o%20Torres%20220615 doc final tesis V1ma.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/76377/Ordu%20b1o%20Torres%20220615%20doc%20final%20tesis%20V1ma.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Programa Nacional de Riego (PRONAR). 2004. Criterios de Diseño y Construcción de Galerías Filtrantes. Bolivia.

https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/PRONAR%20s.f.%20Galer%203%20ADas%20filtrantes.pdf

Programa Sectorial 2011-2016. El Agua de Chihuahua

https://chihuahua.gob.mx/atach2/sf/uploads/indtfisc/progSER2010-2016/ProgSec_JuntaCentral.pdf

Raghu Nath, H. M. (2006). *Hydrology: Principles, analysis and design* (2nd ed.). New Age International Publishers.

https://www.mlsu.ac.in/econtents/4167_Hydrology_Principles-H%20M%20RAGHUNATH%20.pdf

Ringleb, J., Sallwey, J., Stefan, C., 2016. Assessment of Managed Aquifer Recharge through Modeling—A Review. *Water* 8, 579. doi:10.3390/w8120579

Rivera, M. Sergio. 2013. Metodología para el análisis hidrológico de cuencas rurales de pequeñas dimensiones. Tesis profesional presentada para obtener el grado de ingeniero civil por la Universidad Nacional Autónoma de México.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3176/Metodolog%C3%ADa%20para%20el%20an%C3%A1lisis%20hidrol%C3%B3gico%20de%20cuencas%20rurales%20de%20peque%C3%B1as%20dimensiones.pdf?sequence=1>

Romero Martínez, E. 2020. La construcción social de la sobreexplotación de acuíferos en el estado de Chihuahua.

https://www.academia.edu/44048992/BORDERLANDS_AND_ORGANIZATIONS_La_construcci%C3%B3n_social_de_la_sobreexplotaci%C3%B3n_de_acu%C3%ADferos_en_el_estado_de_Chihuahua

Rozikulov, A., Drebenstedt, C., Stepanek, R. C., Shinwari, M., Sharipova, S. and Rozikulov, A. 2025. Managed Aquifer Recharge (MAR) as a Tool for Sustainable Groundwater Management in Semi-Arid Regions. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 13, 12-40. doi: [10.4236/gep.2025.1312002](https://doi.org/10.4236/gep.2025.1312002).

Sallwey, J., Bonilla Valverde, José P., Vásquez López F., Junghanns, R., and Stefan, C. 2019. Suitability maps for managed aquifer recharge: a review of multi-criteria decision analysis studies. *Environmental Reviews*. 27(2): 138-150. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0069>

Sánchez, N. David. 2024. Estudio que sirva como herramienta base para la elaboración del Plan Municipal Hidrico de largo plazo “Integracion del análisis de aguas subterráneas informe VIII Chihuahua, Chihuahua.”
https://implanchihuahua.org/proyectos/CentroEstudios/EstudioEPMH/pdf/8_Integracion_analisis_aguas_subterraneas.pdf

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1982. Manual para la estimación de avenidas máximas en cuencas y presas pequeñas.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2019. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018.

<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>

Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2001. Carta Chihuahua, Clave H13-C66, 1:50 000. Estado de Chihuahua.

https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T082001HENL0001_01.PDF

Viola Kirenda, Seith N. Mugume. 2019. Effectiveness of infiltration galleries in reduction of surface runoff and flooding in urban areas.

https://www.researchgate.net/publication/337305781_Effectiveness_of_infiltration_galleries_in_reduction_of_surface_runoff_and_flooding_in_urban_areas/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnNOUGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoieX2RpcmVjdCJ9fQ

Curriculum Vitae

Experiencia laboral

Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) – Julio de 2022 a Diciembre de 2022

Proyecto: Inventario Estatal de Pozos

Actividades realizadas: Medición y toma de datos de niveles estáticos y dinámicos de las fuentes de abastecimiento en diferentes localidades del estado de Chihuahua. Contacto

con organismos públicos y privados. Orden, clasificación y actualización de archivos del área.

Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado (JCAS) – Marzo de 2015 a Enero de 2022

Actividades realizadas: Creación, desarrollo y actualización de base de datos de las fuentes de abastecimiento del Estado de Chihuahua. Elaboración de mapas de ubicación de fuentes de abastecimiento de agua potable. Supervisión y elaboración de curvas de aforos. Llevar a cabo documentación requerida previa a la perforación de pozos por parte de la JCAS. Elaboración de solicitudes para modificación administrativa y técnica de los títulos de concesión y decreto para facilidades administrativas para el otorgamiento de nuevas concesiones. Ejecución de estudios geofísicos (SEV, TER y TEM) para la ubicación de puntos de perforación para el abastecimiento de agua potable y elaboración de informes técnicos de los estudios geofísicos realizados en campo. Supervisión del proyecto "Recarga de acuíferos por la recarga del acuífero Chihuahua-Sacramento." Elaboración de reportes de video-inspección de los pozos de las diferentes localidades del estado de Chihuahua.

Grutas Nombre de Dios – Junio de 2025 a Enero de 2015

Actividades realizadas: Guia de turistas.

Formación académica

Maestría en Ingeniería en Hidrología (UACH) – 2020 - 2023

Licenciatura Ingeniería en Geología (UACH) – 2010 - 2014

Domicilio Permanente: Chihuahua, Chihuahua, 31200

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por Laura Leticia Castillo Quintana.