UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO DEL DISTRITO DE RIEGO BUENAVENTURA, CHIHUAHUA, MÉXICO.

POR:

ING. KARLA GUILLERMINA ROMERO VEGA

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO **JUNIO DE 2019**

Estudio hidrológico e hidrogeoquímico del distrito de riego Buenaventura, Chihuahua, México. Tesis presentada por Karla Guillermina Romero Vega como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:

M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado

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

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Director(a) de Tesis

Junio 2018

Fecha

Comité:

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Dra. María Socorro Espino Valdés
Dr. Adán Pinales Munguía
M.I. Rodrigo De la Garza Aguilar

© Derechos Reservados
Karla Guillermina Romero Vega
Circuito No.1, Campus Universitario 2 Chihuahua, Chih. México

Junio 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

11 de junio de 2019

ING. KARLA GUILLERMINA ROMERO VEGA

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Alejandro Villalobos Aragón** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **"ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO DEL DISTRITO DE RIEGO BUENAVENTURA, CHIHUAHUA, MEXICO."**.

ÍNDICE

1. Generalidades
- 1.1 Introducción
- 1.2 Antecedentes
- 1.3 Justificación
- 1.4 Objetivo

2. Marco físico
- 2.1. Localización y vías de acceso
- 2.2. Provincias fisiográficas
- 2.3. Hidrografía
- 2.4. Climatología
- 2.5. Uso de suelo y cubierta vegetal
- 2.6. Edafología
- 2.7. Geomorfología
- 2.8. Geología
- 2.9. Estratigrafía y tectónica
- 2.10. Historia del Distrito de Riego 042, Valle Buenaventura A. C.

3. Geofísica
- 3.1. Introducción
- 3.2. Resistividad
- 3.3. Trabajo de campo

4. Hidrogeología
- 4.1. Tipo de Acuífero
- 4.2. Clasificación de las aguas subterráneas por su origen y tiempo de contacto con el acuífero
- 4.3. Piezometría
- 4.4. Muestras de suelo analizadas por microondas
- 4.5. Disponibilidad del acuífero

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

5. Hidrogeoquímica
- 5.1. Búsqueda y análisis de información
- 5.2. Muestreo de campo
- 5.3. Análisis hidrogeoquímicos

6. Resultados y discusión
- 6.1. Geofísica
- 6.2. Hidrogeología
- 6.3. Hidrogeoquímica

7. Conclusiones
- 7.1. Geofísica
- 7.2. Hidrogeología
- 7.3. Hidrogeoquímica

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

A T E N T A M E N T E
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE INGENIERÍA U.A.CH. DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

Dedicatoria

A las dos mujeres más importantes de mi vida.

A mi hija, que es mi más grande fuente de energía, motivación e inspiración, tú me haces querer ser mejor persona. Que nunca nada ni nadie te detenga, siempre estaré ahí para apoyarte.

A mi madre, que me ha demostrado que no existe guerra que la pueda vencer, tus ganas de vivir son admirables, gracias por impulsarme al cielo y enseñarme que la voluntad es la herramienta más importante para hacer las cosas; sin ti esto hubiera sido imposible.

Agradecimientos

A mi familia, David y Ana Carolina que quienes sacrificaron tiempo y espacio para que yo pudiera concluir con esta etapa.

A mis padres y hermano, que me apoyaron en cada momento con el desarrollo de esta investigación.

A mis Maestros, Dra. Espino, M.I. Ing. De la Garza, Dr. Villalobos, y el Dr. Adán Pinales, sus clases hacen que cualquier persona se enamore de las ciencias y sus aplicaciones. Gracias por defender la razón primordial de la Universidad, el generar y transmitir conocimiento.

En especial a la Dra. Maria Socorro Espino, que me demuestra que ser mujer, madre y excelente profesionista es posible.

A mis compañeros y amigos que encontré a lo largo de la Maestría, Iván, Cesar, Joaquín, Oswaldo, Brenda y María, que tantas veces me ayudaron a sacar adelante cada una de las tareas que me facilitaron concluir esta etapa.

A mis amigas, que siempre son apoyo y soporte, gracias por todas esas veces me impulsaron con palabras de aliento.

Al personal de CONAGUA Buenaventura y del Distrito de Riego 042, en especial al Ing. Samuel Nevárez R. y el Ing. Jose Luis Miranda S., que me facilitaron información y acceso los pozos para que esta investigación pudiera llegar a su fin.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1: Generalidades 1
1.1 Antecedentes 1
1.2 Justificación 4
1.3 Objetivo 5
Capítulo 2: Marco Físico 6
2.1 Localización y vías de acceso 6
2.2 Provincias fisiográficas 7
2.3 Hidrografía 8
2.4 Climatología 10
2.5 Uso de suelo y cubierta vegetal 14
2.6 Edafología 18
2.7 Geomorfología 21
2.8 Geología 23
2.9 Estratigrafía y Tectónica 26
2.10 Historia del Distrito de Riego 042, Valle Buenaventura, A.C. 26
Capítulo 3: Geofísica 28
3.1 Introducción 28
3.2 Resistividad 28
3.3 Trabajo de campo 34
Capítulo 4: Hidrogeología 37
4.1 Tipo de acuífero 40
4.2 Clasificación de las aguas subterráneas por su origen y tiempo de contacto con el acuífero 41
4.3 Piezometría 41
4.4 Muestras de suelo analizadas por microondas 50
4.5 Disponibilidad del acuífero 52
Capítulo 5: Hidrogeoquímica 56
5.1 Búsqueda y análisis de información 56
5.2 Muestreo de campo 56
5.3 Análisis efectuados 62
5.4 Análisis hidrogeoquímico 68
Capítulo 6: Discusión de Resultados 71
6.1 Geofísica 71
6.2 Hidrogeología 82
6.3 Hidrogeoquímica 94
Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones 135
7.1 Geofísica 135
7.2 Hidrogeología 136
7.3 Hidrogeoquímica 136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih. 7
Figura 2. Mapa fisiográfico del Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih. 9
Figura 3. Mapa con Rio Santa María y red de drenaje del Distrito de Riego 042 y áreas circundantes. 11
Figura 4. Mapa de Clima según W. Köppen, del Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih. 13
Figura 5. Mapa de uso de suelo y vegetación del Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih. 15
Figura 6. Mapa de edafología del Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih. 20
Figura 7. Mapa con rasgos geomorfológicos del DR 042 y áreas aledañas. 22
Figura 8. Geología superficial correspondiente al área del Distrito de Riego 042 25
Figura 9. Secuencia lógica de una campaña geofísica (Olmo y Lopez, 1999). 29
Figura 10. Configuración para el método Schlumberger (Modificado de Orellana & Mooney, 1966) 31
Figura 11. Campo de flujo eléctrico en configuración Schlumberger (modificado de http://www.arctic-geophysics.com). 32
Figura 12. Mapa de localización de SEV realizados para la investigación. 33
Figura 13. Equipo utilizado para medición de resistividad Sting R1 1P Earth Resisitivity Meter de AGI. 34
Figura 14. Imágenes de trabajo de campo de geoeléctrica. 35
Figura 15. Resistividades de diferentes rocas. Modificado de Orellana 1982. 36
Figura 16. Mapa hidrológico de la CONABIO del área del DR 042. 39
Figura 17. Pozos con piezometría en el año de 1999. 43
Figura 18. Izq. Configuración de Nivel Estático en 1999. Der. Configuración de Profundidad de Nivel Estático en 1999. 44
Figura 19. Pozos con piezometría actualizada el año 2002 45
Figura 20. Izq. Configuración de Nivel Estático en 2002. Der. Configuración de Profundidad de Nivel Estático en 2002 46
Figura 21. Pozos con piezometría actualizada el año 2004 47
Figura 22. Izq. Configuración de Nivel Estático en 2004. Der. Configuración de Profundidad de Nivel Estático en 2004. 48
Figura 23. Mapa de pozos con actualización piezométrica 2019. 49
Figura 24. Mapa de localización de muestras de suelo 52
Figura 25. Fotografías de toma de muestra en pozo. 60
Figura 26. Mapa de localización de puntos de muestreo. 61
Figura 27. Pantalla de IPI2Win para comenzar a procesar los datos de campo. 73
Figura 28. Ventana de IPI2Win visualizando datos en la tabla inicial. 74
Figura 29.Ventana de curva de sondeo y datos de campo. 74
Figura 30. Ventana de curvas visualizando secciones verticales. 75
Figura 31. Representación gráfica de SEV. Parte 1 77
Figura 32. Representación gráfica de SEV. Parte 2 77
Figura 33. Representación gráfica de SEV. Parte 3 78
Figura 34. Sección trunca realizada por el SGM a 20km SE del área de estudio 79

Figura 35. Interpretación de Unidades Geoeléctricas. 81
Figura 36. Izq. Isolíneas de profundidad de nivel estático 2019. Der. Isolíneas de elevación de nivel estático 2019. 84
Figura 37. Mapa con dirección de flujo de agua subterránea 85
Figura 38. Planta de Isovalores para Ca con muestras de suelo 88
Figura 39. Planta de Isovalores para K con muestras de suelo 89
Figura 40. Planta de Isovalores para Mg con muestras de suelo 90
Figura 41. (Izq.) Planta de Isovalores para Al con muestras de suelo. (Der) Planta de Isovalores para Sr con muestras de suelo. 91
Figura 42. (Izq.) Planta de Isovalores para Fe con muestras de suelo. (Der) Planta de Isovalores para Zn con muestras de suelo. 92
Figura 43. Planta de Isovalores para As con muestras de suelo. 93
Figura 44. Diagrama de Wilcox 2018 en escala logarítmica. 98
Figura 45. Distribución de concentración de los SDT en el DR 042. 104
Figura 46. Diagramas de Collins correspondientes al Grupo 1. 108
Figura 47. Diagrama de Piper correspondiente al Grupo 1 109
Figura 48. Diagrama de Schöeller correspondiente al Grupo 1. 109
Figura 49. Diagrama de Collins o barras, muestras del Grupo 2 111
Figura 50. Diagrama de Piper correspondiente al Grupo 2 112
Figura 51. Diagrama de Schöeller correspondiente al Grupo 2. 112
Figura 52. Diagrama de Collins o barras del Grupo 3 113
Figura 53. Diagrama de Piper correspondiente al Grupo 114
Figura 54. Diagrama de Schoeller correspondiente al Grupo 3 114
Figura 55. Mapa de distribución de diagramas de Stiff. 116
Figura 56. Distribución de concentración de HCO3 en el DR 042. 118
Figura 57. Distribución de concentración de Ca^{+2} en el DR 042. 120
Figura 58. Distribución de concentración de Na^{+} en el DR 042. 122
Figura 59. Distribución de concentración de NO_3^{-} como Nitrógeno en el DR 042. 124
Figura 60. Distribución de concentración de F^{-} en el DR 042. 126
Figura 61. Distribución de concentración de As en el DR 042. 128
Figura 62. Gráficas de valores históricos para el pozo No. 7, administrado por la JMAS en la Col. El Carbajal. 129
Figura 63. Gráficas de valores históricos para el pozo No. 22, administrado por la JMAS aledaño a la Primaria M. Guadalupe Quintanilla. 130
Figura 64. Gráficas de valores históricos para el pozo No. 13, administrado por la JMAS en la Col. Villas del Sol. 130
Figura 65. Gráficas de valores históricos para el pozo No. 23, administrado por la JMAS, en la Col. Progreso. 131
Figura 66. Gráficas de valores históricos para el pozo No. 10, administrado por la JMAS, en la Col. Rodrigo M. Quevedo. 131
Figura 67. Gráficas de valores históricos para el pozo JMAS en el Barrio de los Flores, administrado por la JMAS, en la Col. De los Flores. 132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de promedio mensual de temperatura de 1991-2017 en ^{0}C. 12
Tabla 2. Tabla de promedio mensual de precipitación de 1982-2017 en mm.....12
Tabla 3. Área según tipo de vegetación y uso de suelo en el Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih. 14
Tabla 4. Localización de muestras de suelo 51
Tabla 5. Disponibilidad de agua 2018, acuífero Buenaventura. 54
Tabla 6. Relación de fuentes de agua subterránea monitoreadas para el estudio hidrogeoquímico 2018. 58
Tabla 7. Datos geoeléctricos obtenidos en campo 72
Tabla 8. Tabla con información sobre la interpretación geofísica 76
Tabla 9. Unidades Geoeléctricas identificadas para la zona de estudio 80
Tabla 10. Datos piezométricos obtenidos en campo en enero de 2019, en WGS84 Zona 13. 83
Tabla 11. Resultados de los análisis químicos de suelos emitidos por el SGM.....87
Tabla 12. Porcentaje de error de los resultados analíticos 95
Tabla 13. Resultados analíticos de muestras de agua de pozo, Laboratorio Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería, UACH.....96
Tabla 14. Clasificación y calidad del agua según análisis RAS y las Normas Riverside 99
Tabla 15. Balance iónico de cationes. 100
Tabla 16 . Balance iónico de aniones, error % y Promedio iónico 101
Tabla 17. Datos de CE, SDT, Temperatura y pH obtenidos en campo.....103
Tabla 18. Clasificación de agua según su contenido iónico.....107
Tabla 19. Grupo de agua 1, Aguas Bicarbonatadas Sódicas.....108
Tabla 20. Tabla de concentración de As en mg/l 127
Tabla 21. Resumen de parámetros analizados históricos por pozo. 134

Capítulo 1: Generalidades

El agua es el componente más abundante e importante de nuestro planeta. Todos los seres vivos dependen de la existencia y disponibilidad de tan preciado recurso, lo que marca la importancia trascendental para el desarrollo de la vida. Las aguas subterráneas son una de las principales fuentes de abastecimiento en muchas áreas del mundo y de nuestro país, especialmente en zonas donde las precipitaciones son escasas e irregulares.

El agua está en contacto con estratos geológicos, los cuales modifican su composición química. La hidrogeoquímica es una ciencia que combina la hidrogeología y la geoquímica, mismas que se enfocan en el estudio de las propiedades químicas del agua (superficial y subterránea) y su relación con la geología como iones disueltos, procesos de interacción agua-sólido, reacciones químicas que afectan la distribución y circulación de la misma (Dominguez-Faus, Powers, Burken, & Alvarez, 2009) .

La calidad del agua depende del uso y destino que se le dé (potable, riego agrícola, industrial, recreativo, etc.). Esta queda definida por su composición y el conocimiento de los efectos que pueden causar debido a los elementos contenidos en la misma (Custodio & Llamas, 2001). Estos elementos y/o compuestos pueden ser diversos, y pueden generar una importante contaminación debido a su alta concentración, principalmente si se trata de metales pesados y metaloides, que pueden afectar directamente la salud humana por la persistencia y el fenómeno de la biomagnificación (Gomez-Alvarez, 1999).

1.1 Antecedentes

El acuífero Buenaventura, identificado por la Comisión Nacional del Agua con la clave 0804, se localiza en la porción noroeste del estado de Chihuahua. El acuífero abriga una superficie total de 3,309 km^2, que representa cerca del 1.3% del total del territorio del estado (CNA, 2015). Dentro de este acuífero se encuentra el área de estudio, el Distrito de Riego 042, de Buenaventura, Chih.

El acuífero es explotado actualmente por 389 aprovechamientos de agua subterránea (según datos publicados en la página web de Conagua, con fecha de corte al 30 septiembre de 2017). El acuífero se encuentra vedado para el alumbramiento del agua subterránea, debido a la intensa explotación que se ha venido registrando desde la década de los años 1950´s. Sin embargo, y aun con la imposición de la veda el acuífero continúa con déficit. La fuerte explotación a la que se ha sometido el acuífero Buenaventura exige un mayor control del volumen de agua extraídos con el principal fin de estabilizar el acuífero (CNA, 2015). El Distrito de riego administra 80 pozos de agua subterránea, con una extracción promedio de 35 litros por segundo (lps) y provee del vital líquido a más de siete mil hectáreas de cultivo, las cuales, en su mayoría se riegan por medio de agua rodada. Se estima que la recarga media anual que recibe el acuífero es del orden de los 66.5 Mm^3 por año (CNA, 2015), de los cuales 35.6 Mm^3 corresponden a recarga natural y 30.9 Mm^3 a recarga inducida.

El área de estudio cuenta con pocos trabajos de investigación, estos en su mayoría encargados por CNA (o su similar a través de la historia) con el objetivo de realizar trabajo de campo e interpretación de los datos obtenidos para estar al tanto de la actual situación hidrológica de la zona. El acuífero Buenaventura, ha sido estudiado en varias ocasiones.

Se tienen registros de que el primer estudio se realizó en el año de 1974 por la empresa INSISA, en ese tiempo por encargo de la Secretaria de Recursos Hidráulicos; posteriormente en 1981, la empresa Estudios y Construcciones Alas S.A., realizo un estudio geohidrológico cuantitativo en la zona de Buenaventura. También la Gerencia Estatal de Chihuahua realizó mediciones piezométricas por administración en los años de 1981, 1982, 1985, 1987, 1996, 1997 y 1998. En dichos estudios y mediciones está basado en gran medida el documento que respalda la "Actualización de disponibilidad media anual de agua en el acuífero Buenaventura (804), Estado de Chihuahua" del año 2015, bajo la dirección de la Comisión Nacional del Agua. Sin embargo, no fue posible tener acceso a dichos documentos por lo que solo les mencionó con fines informativos.

Unitecnia S.A de C.V. en 1999 realizó un estudio llamado Reactivación de la red de monitoreo piezométrico del acuífero del Valle de Buenaventura en el Estado de Chihuahua, encargado por la Comisión Nacional del Agua. Dicho informe contiene una descripción

completa de los trabajos de campo y gabinete, concerniente a 48 pozos en operación y 12 propuestas de sitios para la construcción de estaciones piezométricas con la finalidad de realizar una red de monitoreo piezométrico en el acuífero.

Posterior a este trabajo, la Gerencia Regional del Río Bravo contempló los trabajos de Actualización Piezométrica de los Acuíferos de Janos y Buenaventura, en el Estado de Chihuahua, encomendando a la empresa COPEI Ingeniería, S.A. de C.V., la ejecución de dichas actividades. Teniendo como objetivo actualizar el conocimiento de la posición de los niveles de agua subterránea y definir las evoluciones que presentan los niveles de agua como resultado de los esfuerzos hidrodinámicos inducidos por las condiciones de recarga y extracción a que están sujetos los acuíferos, con el monitoreo de 51 pozos.

Bajo el título de *Actualización de mediciones piezométricas de Acuífero Buenaventura, Chih*., durante el año 2004 a cargo de Moro Ingeniería S.C., la Comisión Nacional del Agua implementó un programa de estudios para tener un mejor conocimiento de las características geohidrológicas en las principales zonas acuíferas del país, que incluía la medición periódica de la posición y evolución de los niveles piezométricos actualizados. Trabajaron con 47 pozos, donde concluyen que la profundidad del nivel estático para este acuífero indica que los mayores valores se representan tanto en un extremo norte como en el sur, mientras que los valores más someros se tienen en la parte central del mismo, destacándose los que se localizan en las márgenes del Río Santa María, donde las profundidades llegan a ser de menos de 5m.

En el año de 2007, se realiza el trabajo de investigación denominado *Caracterización hidrogeoquímica y presencia de flúor en la porción noroeste del estado de Chihuahua, México*, realizado por la M.I. Alma Y. Précoma Mojarro, quien muestreó 44 pozos y un ojo de manantial de los acuíferos de Casas Grandes, Buenaventura, Laguna La vieja y Flores Magón-Villa Ahumada al ser identificadas como zonas susceptibles a la presencia de dicho elemento. Los resultados de los análisis de las muestras de agua fueron relacionados con la dirección del flujo de agua subterránea y de manera general, con excepción del flúor que se encontró en la mayoría de las muestras analizadas, el agua presentó buena calidad con una

mayor presencia de bicarbonatos en los aniones y un predominio en el sodio y el calcio en los cationes.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Durante la historia de nuestro país, se han realizado estudios geohidrológicos de muy distintos alcances y variedades, dependiendo de la época y del estado del conocimiento de las zonas de interés, se pueden hacer estudios de manera directa e indirecta, con métodos geológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos y aplicando análisis de imágenes satelitales y sensores remotos.

En el estado de Chihuahua la precipitación media anual es del orden de los 400 mm, que comparada con la media nacional de 770 mm es mucho menor, sin embargo, en cerca del 60% de la superficie estatal se tiene una media anual menor de 330 milímetros y temperaturas superiores a los 45°C, por lo que dicha zona se caracteriza por ser de las más áridas de México (IMTA, 2006). Por otro lado, la mayor densidad de población y la mayor actividad agropecuaria se localizan en las zonas donde se tiene menor precipitación y por consiguiente menor disponibilidad del recurso agua; en contraste con la zona serrana que es donde se presentan las mayores precipitaciones (600 hasta más de 1,000 mm). De ahí la gran importancia del agua subterránea, pues de esta fuente se extrae el 93% y el 57% del volumen total que se emplea para uso municipal y agropecuario, respectivamente (IMTA, 2006).

En el estado de Chihuahua se tienen delimitados 61 acuíferos. El acuífero Buenaventura cuenta con un déficit de 116.6847 millones de m^3 según lo publicado por la Diario Oficial de la Federación el día 04 de enero 2018. El acuífero Buenaventura tiene una superficie de 3,309 km^2 y abarca parte de los municipios de Galeana y Buenaventura principalmente, y pequeñas porciones de Ignacio Zaragoza y Nuevo Casas Grandes (CNA, 2015).

El crecimiento poblacional ejerce presión sobre la calidad del agua, debido a que su condición trae efectos a la salud humana, principalmente por la concentración de metales pesados. En las zonas áridas del estado hay depósitos minerales con altas concentraciones de arsénico el cual fluye a través del agua subterránea. El principal uso que se le da al agua

subterránea en la región del acuífero Buenaventura es para el desarrollo del sector agrícola y pecuario. Dicho acuífero es principal suministro de agua, en la región de San Buenaventura y Galeana. Debido a la importancia de conocer la calidad del agua en la región y a la falta de antecedentes en el tema se pretende que la información obtenida en este trabajo se integre a una base de datos del análisis químico del agua subterránea del acuífero que ayude con futuras investigaciones que se realicen en el área. Esto permitirá complementar las técnicas de interpretación existentes (geofísica, geología, geohidrología, etc.) para optimizar la selección de nuevos sitios para la extracción de agua.

1.3 OBJETIVO

Identificar y evaluar la calidad del agua mediante un estudio hidrogeoquímico del acuífero Buenaventura. Actualizar el conocimiento hidrogeológico del acuífero Buenaventura mediante el análisis y comparación diferentes niveles de elevación de nivel estático y su evolución.

1.3.1 Objetivos Específicos

Realizar búsqueda bibliográfica de la zona de estudio. Se realizarán las siguientes actividades:

- Identificar el tipo de drenaje en el acuífero;
- Identificar la dirección de los flujos preferentes dentro del acuífero Buenaventura;
- Análisis piezométrico del acuífero;
- Colectar muestras mediante una campaña en pozos agrícolas del distrito de riego;
- Identificar al menos los iones mayores (Na, K, Mg, Ca, Cl, SO_4, NO_3, CO_3, HCO_3) más F y As en las muestras de agua;
- Determinar la calidad del agua de consumo y riego agrícola que se utiliza en la región;
- Elaborar diagramas de Stiff y de Piper, para realizar una caracterización hidrogeoquímica de las muestras de agua de pozo;
- Evaluar el agua de acuerdo con criterios de potabilidad para el consumo según la Norma Oficial Mexicana (NOM 127-SSA 1994).

Capítulo 2: Marco Físico

La descripción de las características físicas de la zona geográfica que fue analizada es de gran importancia para comprender la interacción roca-agua.

2.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

Cubriendo una superficie aproximada de 9,000 hectáreas en la porción noroccidental del estado de Chihuahua, el Distrito de Riego 042 de Buenaventura, representa aproximadamente el 3.5% del total de la superficie comprendida por el acuífero (CNA, 2015). Geográficamente el área de estudio se encuentra localizado aproximadamente en el paralelo 29^0 55' 34" de latitud norte y el meridiano 107^0 30' 50" longitud oeste del meridiano Greenwich.

Conforme a la división política del estado de Chihuahua, los municipios donde se asienta el Distrito de Riego 042 son, el municipio de Galeana (15% del DR 042) y Buenaventura (85% DR 042), como se muestra en la figura 1. Entre las poblaciones principales de la zona de estudio están: San Buenaventura, Colonia Rodrigo M. Quevedo, Abdenago C García, Angostura y Col. Le Baron.

El distrito cuenta con agua superficial proveída de la presa de almacenamiento El Tintero en el municipio de Namiquipa, con una capacidad útil de 122 Mm^3 y de la presa derivadora del Carmen, localizadas aproximadamente a 20 km y 10 km, respectivamente. El distrito distribuye un volumen anual de 63 Mm^3/año (CNA, 2015).

La principal vía de comunicación en la región de Buenaventura es la carretera pavimentada federal No. 45, que comunica la ciudad de Chihuahua con Ciudad Juárez tomando la desviación a la altura del ejido San Lorencito con la carretera Federal No. 10 que une las poblaciones de Flores Magón, San Buenaventura y Casas Grandes a través de la carretera Federal No. 2.

También existe la carretera estatal No. 65 que comunica a San Buenaventura con Cuauhtémoc pasando por los poblados de Ignacio Zaragoza, Gómez Farías y Oscar Soto

Máynez; de Cuauhtémoc a la ciudad de Chihuahua se tiene comunicación por la carretera Federal No. 16.

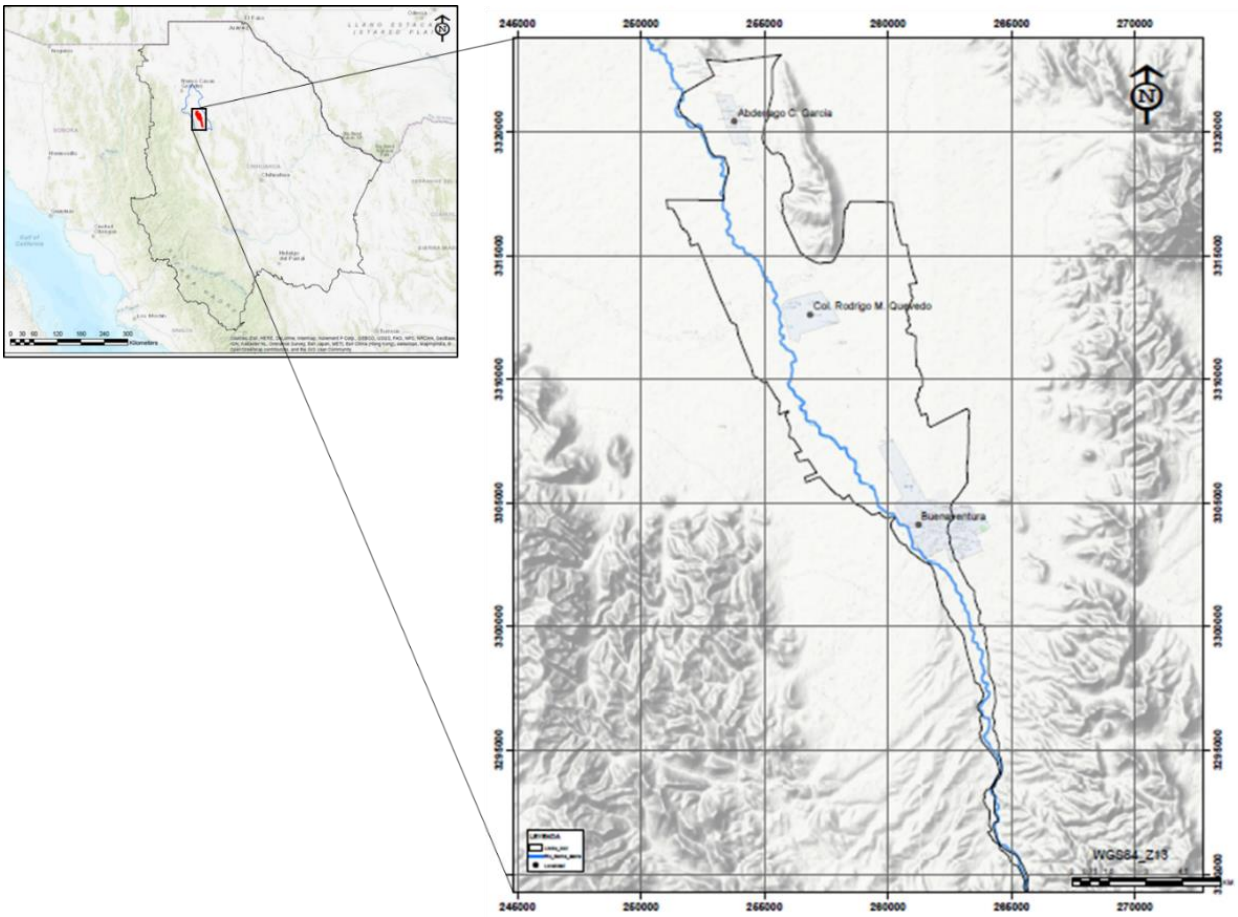


Figura 1. *Mapa de localización del Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih.*

2.2 PROVINCIAS FISIOGRÁFICAS

La fisiografía se puede definir como el estudio general de la geografía física, donde se describen las formas del relieve, geología, hidrología y edafología con el fin de agrupar áreas con características similares (INEGI, Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación, 2017). El área de estudio se encuentra en su mayoría en la provincia fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte en la porción noroeste del estado de Chihuahua, y sólo una muy pequeña parte en la provincia denominada Sierra Madre Occidental, las

principales sierras que la forman tienen una orientación general de norte a sur y las constituyen rocas volcánicas (Figura 2).

El valle tiene una forma en general alargada con orientación NW-SE. Hacia el oriente del área abarcada por el estudio, se localiza una prolongación de la sierra de Las Tunas, donde se tienen elevaciones máximas de 1,800 msnm; al poniente se ubican las sierras de Catarina y del Zorrillo, en las que se observan elevaciones del orden de 2,000 msnm; al norte se encuentra otra elevación notable, que es el cerro La Angostura y al noroeste el cerro Puerto de la Angostura, con elevaciones del orden de 1,500 msnm: asimismo, al noreste se encuentran el cerro Grande con elevaciones de 2,200 msnm. Un poco más al sureste se puede encontrar la Sierra de Las Tunas.

Para objetivos del presente trabajo, se consideraron un conjunto de datos vectoriales fisiográficos escala 1:1,000,000 serie I modificado en 2001 y publicado por el INEGI.

2.3 HIDROGRAFÍA

El distrito de riego 042 de Buenaventura se ubica en la región hidrológica administrativa 034, Cuencas Cerradas del Norte (Casas Grandes), dentro del acuífero Buenaventura (CNA, 2015), ver la figura 3.

La corriente más importante que cruza superficialmente el área del acuífero Buenaventura es el Río Santa María, mediante el cual se conduce el agua que se deriva de la presa El Tintero, hoy Francisco Villa. Este río corresponde a una vertiente interior y atraviesa el municipio de con dirección de sur a norte, desembocando en la laguna de Santa María, en el municipio de Nuevo Casas Grandes.

La red de drenaje de una cuenca es el sistema de cauces por los que fluyen los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, de forma permanente o temporal (Estrada Gutierrez, 2008). Los escurrimientos superficiales en la zona de estudio son pocos y de escasa importancia, debido a las escasas precipitaciones pluviales que acontecen en la zona, la mayoría son pequeños arroyos que descienden a través de los cerros. El tipo de drenaje que se observa en el valle se puede clasificar como un sistema dendrítico.

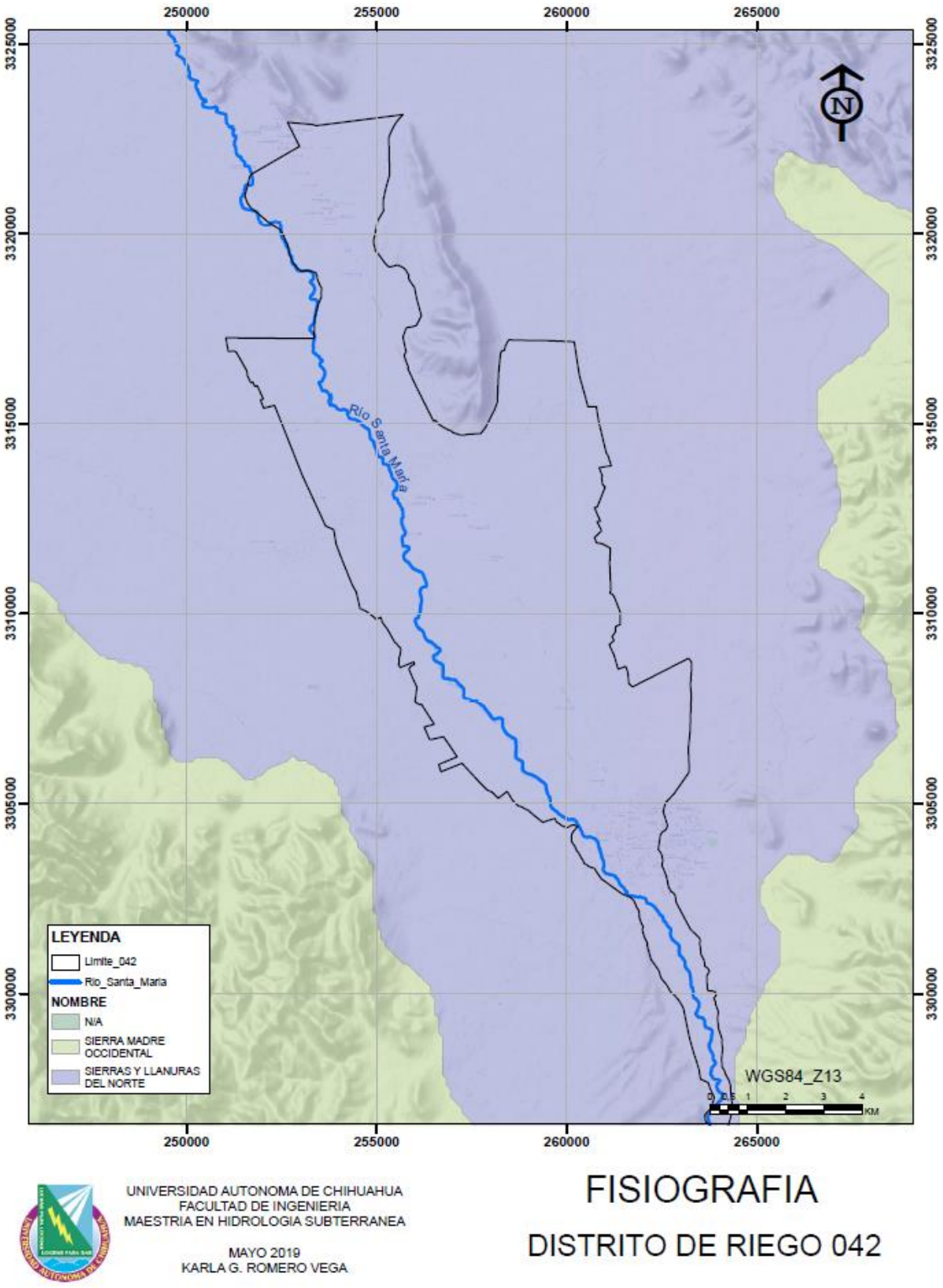


Figura 2. *Mapa fisiográfico del Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih.*

Según el método de R. E. Horton, donde, se consideran corrientes de primer orden, aquellas corrientes, portadores de aguas de mecimiento que no tienen afluentes. Cuando dos corrientes de orden uno se une, resulta una corriente de orden dos, y así sucesivamente, el río Santa María es de orden de corriente 7. Los principales arroyos tributarios, pero intermitentes de este río, son el arroyo San Joaquín y el Del Cristo.

2.4 CLIMATOLOGÍA

El régimen hidrológico en una cuenca depende de factores como topografía, geología, clima y características físicas, siendo los factores climáticos y geográficos los que determinan la cantidad de humedad atmosférica en mayor o menos proporción sobre la región ya que la humedad siempre estará presente, aun en días soleados (Estrada Gutierrez, 2008).

Según la Real Academia Española, la Climatología es la disciplina que se centra en el estudio del clima y del tiempo, forma parte de la Geografía, es decir, es una rama de esta ciencia, ya que desde siempre el tema de clima ha sido una ocupación y preocupación de la Geografía. Si bien utiliza los mismos parámetros que la Meteorología, la misión de la Climatología será la de estudiar las características climáticas a largo plazo y no hacer predicciones inmediatas.

De manera general, según datos publicados por el INEGI (2010), en el estado de Chihuahua, los climas predominantes son los muy secos, abarcan 40% de la superficie estatal, principalmente zona de sierras y llanuras del norte; les siguen los secos y semisecos con 33% en las partes bajas de la Sierra Madre Occidental y el 24% de templado subhúmedo en las partes altas de esta misma sierra. Solo un 3% del territorio estatal presenta clima cálido subhúmedo en las barrancas del estado (figura 4).

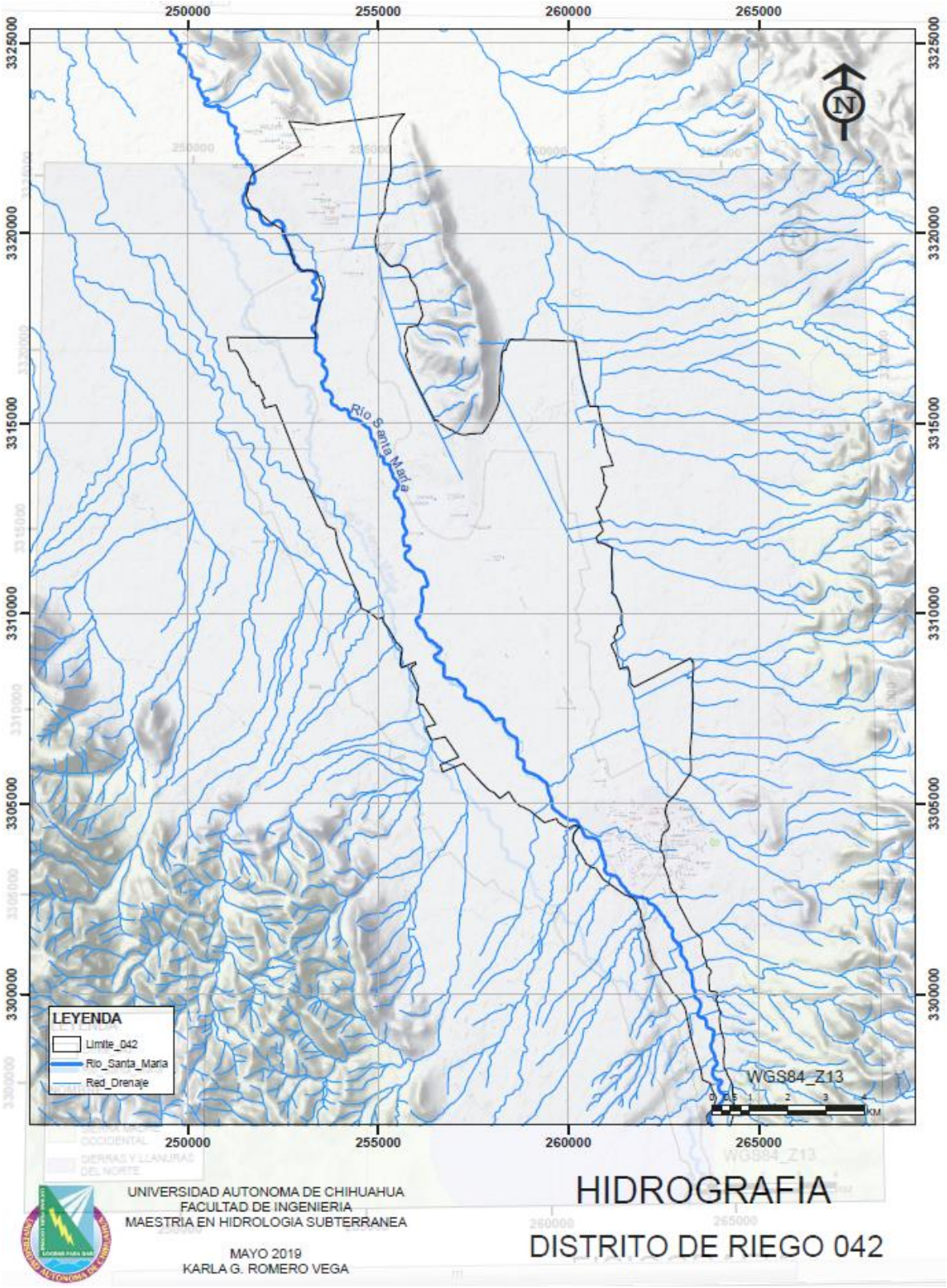


Figura 3. *Mapa con Rio Santa María y red de drenaje del Distrito de Riego 042 y áreas circundantes.*

Con base a la clasificación de W. Köppen, el clima que prevalece en Buenaventura es del tipo seco templado y muy seco templado. Según información recabada durante los últimos 28 años (desde 1991) por la CONAGUA local de San Buenaventura con la estación meteorológica en función, la temperatura media anual es de 17.6 ^{0}C, la temperatura promedio máxima es de 32.6 ^{0}C y la mínima de 2.5^{0}C con régimen de lluvias en verano y periodos calurosos de junio a agosto, siendo enero y diciembre los meses más fríos.

Tabla 1. Tabla de promedio mensual de temperatura de 1991-2017 en ^{0}C.

TEMP	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM ANUAL
MAXIMA	25.3	27.1	30	32.8	37.4	40.3	38.7	36.1	34.8	33.1	29.7	26.1	32.6
MINIMA	-6.9	-5.7	-3.5	0.3	5.1	12.1	14.2	13.5	10.2	2.4	-4.1	-7.6	2.5
MEDIA	9.1	10.8	13.4	16.7	21.5	26.3	26.2	24.8	22.5	17.9	12.8	9.1	17.6

La precipitación es el proceso mediante el cual el agua cae a la superficie terrestre e incluye todas las formas como: lluvia, granizo, nieve, niebla y rocío (Fagundo & Gonzalez, Hidrogeoquímica, 2005). De esta misma estación meteorológica se recabó información referente a la precipitación teniendo registro desde el año de 1982, la cual refleja una precipitación media anual de 364 mm. Siendo los meses de julio (100.31 mm), agosto (99.55 mm) y septiembre (55.59 mm) los de mayor precipitación y febrero, marzo y abril los meses con menor precipitación media.

Tabla 2. Tabla de promedio mensual de precipitación de 1982-2017 en mm.

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
11.84	7.8	7.05	7.18	8.17	24.19	100.3	99.55	55.59	17.71	9.38	15.83	364.6

Para la elaboración del mapa ilustrativo se descargó de la página del INEGI el conjunto de datos vectoriales de climatología, edición 2008 a escala 1:1´000,000.

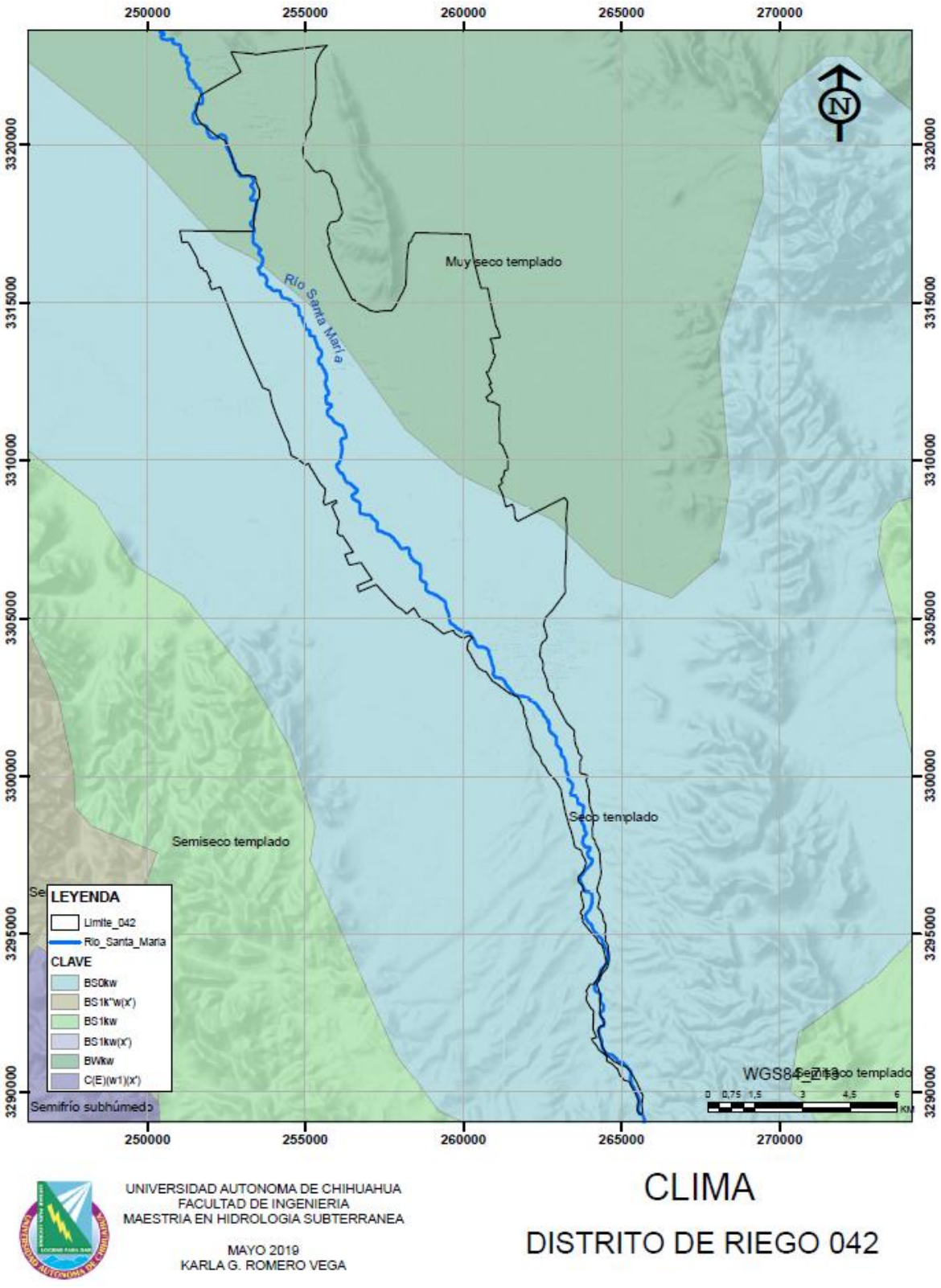


Figura 4. *Mapa de Clima según W. Köppen, del Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih.*

2.5 USO DE SUELO Y CUBIERTA VEGETAL

Las actividades fundamentales del hombre están íntimamente relacionadas con el lugar en el que vive. El objetivo de conocer el uso de suelo y cubierta vegetal es conocer y localizar la distribución de la vegetación natural e inducida, la localización de áreas dedicas a la ganadería y las diferentes áreas de uso agrícola de la zona.

La pérdida de la calidad de la cubierta vegetal puede cambiar la composición y densidad de las especies presentes, afectando su estructura y funcionamiento, ocasionando o desencadenando efectos negativos sobre sus servicios ambientales y su posible aprovechamiento sostenible.

Para la elaboración de este estudio se toma del INEGI, el conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación serie VI, edición 2017, a una escala de 1:250,000.

Los diferentes tipos de uso de suelo y vegetación que se encuentran dentro de la zona de estudio y el área en hectáreas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. *Área según tipo de vegetación y uso de suelo en el Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih.*

DESCRIPCION	AREA (Ha)
Agricultura de riego anual	171.913
Agricultura de riego anual y semipermanente	9,202.94
Asentamientos humanos	196.467
Bosque de mezquite	4.943
Matorral desértico microfilo	53.328
Mezquital xerófilo	38.73
Pastizal natural	80.689
Vegetación de galería	619.57
Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	53.031
Zona urbana	565.988

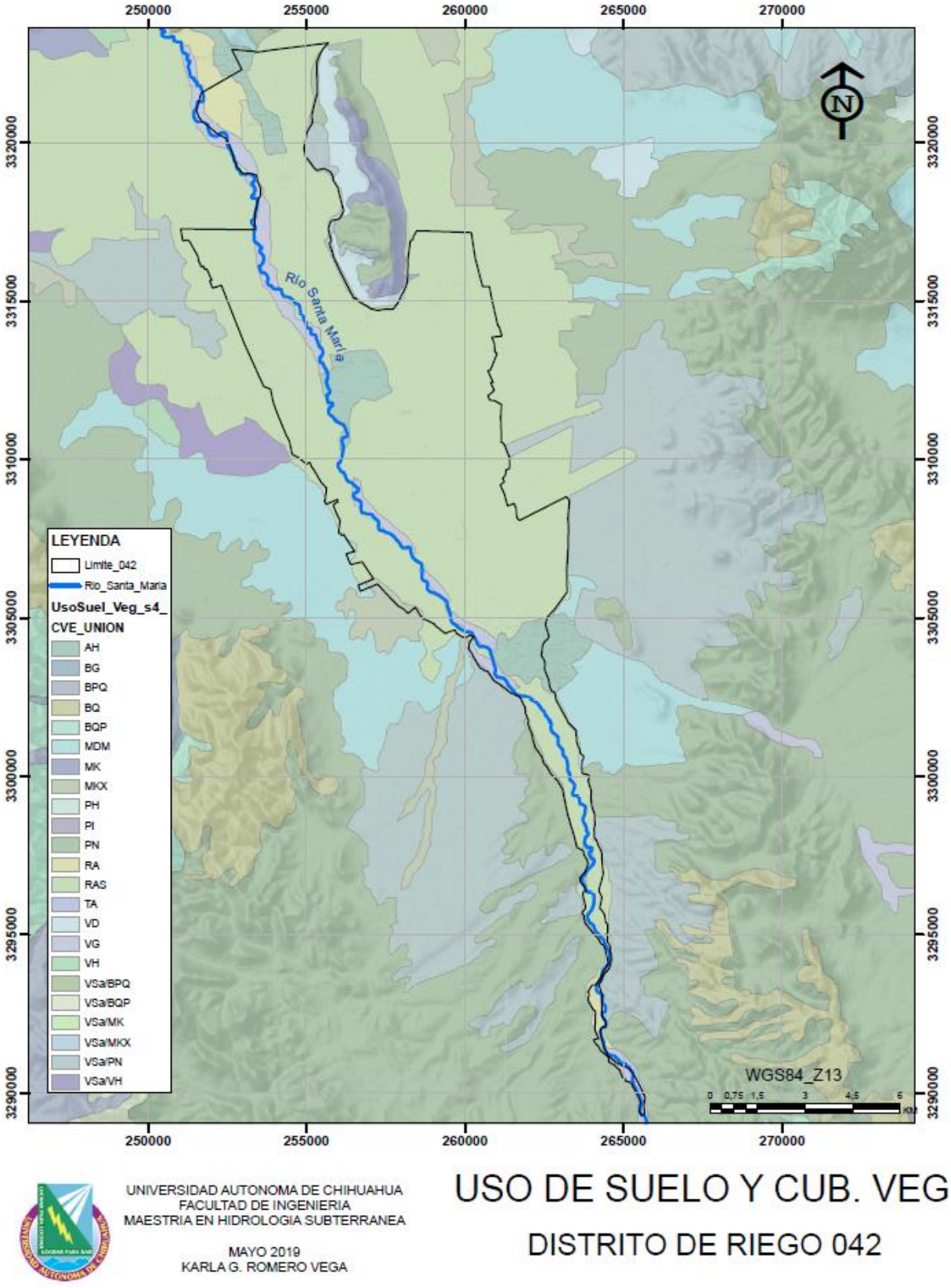


Figura 5*. Mapa de uso de suelo y vegetación del Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih.*

- *Matorral desértico micrófilo (MDM).* La distribución de este matorral se extiende a las zonas más secas de México, y en áreas en las que la precipitación es inferior a 100mm anuales, la vegetación llega a cubrir solo el 3% de la superficie (INEGI, 2017). *Larrea* y *Ambrosia* constituyen del 90 a 100% de la vegetación en áreas de escaso relieve, pero a lo largo de las vidas de drenaje o en lugares con declive pronunciado aparecen arbustos con especies de *Prosopis, Cercidium, Olneya, Condalia, Lycium, Opuntia, Fouquieria, Hymenoclea, Acacia, Chilopsis,* etcétera. también se desarrollan preferentemente sobre llanuras y partes bajas de abanicos aluviales, aunque en condiciones de aridez más acentuada prospera así mismo sobre laderas de cerros. En ningún sitio de su área de distribución parece llover menos de 150mm en promedio anual y en algunas zonas más calurosas el límite superior de la precipitación se aproxima a los 500mm. *Larrea* a menudo es la única dominante, otras veces, junto con *Flourensia,* forma 80 a 100% de la vegetación; los matorrales de *Flourensia* son menos frecuentes (INEGI, Guia para la interpretacion de cartografia Uso del suelo y vegetacion, 2017).
- *Bosque de Mezquite (MK).* Comunidad arbórea con especies de *Prosopis* que se desarrolla en suelos aluviales de fondo de valle y depresiones en las planicies, donde el manto freático se mantiene a poca profundidad, es también común a lo largo de los arroyos y ríos intermitentes en las regiones semiáridas (INEGI, 2017). En Baja California estos bosques de mezquite se presentan a lo largo de arroyos intermitentes, destacando sobre la vegetación circundante. Frecuentemente forman comunidades arbóreas de entre 5 y 20 m de altura. La distribución de este tipo de comunidad es muy amplia en el país, pero muy fragmentada por sus requerimientos ecológicos (INEGI, Guia para la interpretacion de cartografia Uso del suelo y vegetacion, 2017).
- *Mezquital xerófilo (MKX).* Se presenta en el norte del país, en forma discontinua en los estados de Chihuahua, Zacatecas y San Luis Potosí y otros de la región, los tipos de climas predominantes son BW muy seco, BS secos la temperatura máxima es de 45.8°C y la temperatura mínima de -3°C, la precipitación media anual de 100 hasta 700 mm (INEGI, 2017). Este tipo de comunidad se desarrolla desde los 100 hasta los 2300m de altitud. Se presenta principalmente en llanuras, y en menor proporción sobre sierras y lomeríos. Los principales elementos son de porte arbustivo asociados con otros tipos de matorrales xerófilos

como el matorral desértico micrófilo. Las especies presentes son: *Prosopis juliflora, Acacia spp, Opuntia sp, Jatropha sp. Bouteloua spp* (INEGI, Guia para la interpretacion de cartografia Uso del suelo y vegetacion, 2017).

- *Pastizal natural (PN).* Es una comunidad dominada por especies de gramíneas y graminoides, en ocasiones acompañadas por hierbas y arbustos de diferentes familias como son: compuestas, leguminosas, etcétera. Su principal área de distribución se localiza en la zona de transición entre los matorrales xerófilos y los diversos tipos de bosques (INEGI, 2017). La extensa zona de pastizales naturales de América del Norte penetra en el territorio mexicano en forma de una angosta cuña que corre a lo largo de la base de la SMO desde Sonora y Chihuahua hasta el norte de Jalisco y zonas vecinas de Guanajuato.

El pastizal natural se desarrolla de preferencia en suelos medianamente profundos de mesetas, fondos de valles y laderas poco inclinadas, casi siempre de naturaleza ígnea, en altitudes entre 1,100 y 2,500m. Las temperaturas medias anuales varían entre 12-20 ^{0}C. Los suelos propios de estos pastizales son en general neutros (pH de 6-8), con textura que varía de migajón arcilloso a migajón arenoso y coloración rojiza a café, frecuentemente con un horizonte de concentración calimosa o ferruginosa más o menos continua. Por lo común son suelos fértiles y medianamente ricos en materia orgánica, aunque se erosionan con facilidad cuando se encuentran en declive y carecen de suficiente protección por parte de la vegetación. Los pastizales en cuestión son generalmente de altura media, de 20 a 70 cm, aunque a causa del intenso pastoreo se mantienen casi siempre más abajo. La coloración amarillenta pálida es característica durante la mayor parte del año y la comunidad solo reverdece en la época más húmeda. Por su duración los cultivos se clasifican en anuales, semipermanentes y permanentes. En el área de estudio se encuentran, anuales, los cuales son aquellos cuyo ciclo vegetativo dura solamente un año y los semipermanentes son aquellos que su ciclo vegetativo dura entre dos y diez años (INEGI, Guia para la interpretacion de cartografia Uso del suelo y vegetacion, 2017).

- *Agricultura de riego anual (RA) y semipermanente (RAS).* La definición de este tipo de agricultura se basa principalmente en la manera de cómo se realiza la aplicación del agua, por ejemplo de aspersión, goteo, o cualquier otra técnica, es el caso de agua rodada (distribución del agua a través de surcos o bien tubería a partir de un canal principal y que se

distribuye directamente a la planta), por bombeo desde la fuente de suministro o por gravedad cuando va directamente a un canal principal desde aguas arrias de una presa o un cuerpo de agua natural (INEGI, Guia para la interpretacion de cartografia Uso del suelo y vegetacion, 2017).

- *Vegetación de Galería (VG).* Comunidades arbustivas, ocasionalmente con elementos subarbóreos, que se desarrollan en los márgenes de los ríos y arroyos, siempre bajo condiciones de humedad. En general se localizan en zonas de climas templados a secos, con amplios rangos en los valores de temperatura, humedad y altitud, sobre terrenos con humedad superficial o con manto freático somero en el lecho de ríos usualmente secos (INEGI, 2017). En este tipo de vegetación predomina generalmente un solo estrato arbustivo, que fisonómicamente puede presentar el aspecto de matorral denso o espaciado, con altura entre 1 y 2m y constituido por elementos usualmente perennifolios. Entre otros géneros que pueden integrar a la vegetación de galería se encuentran *Baccharis, Chilopsis, Senecio, Acacia, Mimosa y Salix,* y no es rara la presencia de mezquites (*Prosopis sp.)* en el noroeste y norte del país (INEGI, Guia para la interpretacion de cartografia Uso del suelo y vegetacion, 2017).
- *Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural*. La vegetación secundaria es cuando un tipo de vegetación primario es eliminado o alterado por diversos factores humanos o naturales, surge una comunidad vegetal significativamente diferente a la original con estructura y composición florística heterogénea (INEGI, Guia para la interpretacion de cartografia Uso del suelo y vegetacion, 2017).

2.6 EDAFOLOGÍA

El suelo del estado de Chihuahua está conformado de manera general por sustratos de rocas ígneas, seguido por rocas sedimentarias y materiales coluviales y aluviales. Se puede denominar suelo a la parte más superficial de la corteza terrestre, que proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de los seres vivos que se asientan sobre él y existen múltiples procesos de formación de suelo (INEGI, Guia para la interpretacion de cartografia edafologia, 2004). Como consecuencia del clima seco y extremoso del área de estudio, las partículas finas solubles no pueden ser acarreadas a

profundidad, lo que favorece la acumulación de suelos arcillosos, salinos y sódicos o cálcicos.

La zona de estudio cuenta con una baja variedad de series de suelo, debido a que en general las sierras laterales están conformadas por el mismo tipo de roca. Estos son suelos de tipo aluvial, los cuales, por haber sido intemperizados bajo condiciones climáticas áridas, han sufrido pocas alteraciones. En general estos suelos contienen alguna cantidad de carbonato de calcio y sales de sodio (suelos calichosos) y debido a un drenaje deficiente característico en esta región, se han acumulado depósitos de materiales solubles dando origen a suelos salinos. Los *xerosoles* y los *solonetz* son los suelos que destacan en el área, los cuales describo a continuación, por su porcentaje de aparición en la parte central de la superficie que cubre al acuífero (figura 6).

- *Xerosol:* Del griego, *xeros*: seco. Literalmente, suelo seco. Característico de zonas áridas y semiáridas, su símbolo es X, su vegetación natural es de matorral y pastizal, es uno de los suelos más frecuentemente encontrados en el territorio (INEGI, 2004). Dentro del acuífero se distribuye principalmente en los alrededores del valle, concentrándose hacia los extremos sur y norte. Tienen una capa superficial de color claro debido al bajo contenido de material orgánico, puede existir un subsuelo rico en arcillas subyaciendo esta capa, generalmente presentan aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza. Su rendimiento agrícola se encuentra en función de la disponibilidad de agua, tienen baja susceptibilidad a la erosión la cual se incrementa conforme aumenta la inclinación del relieve, su vegetación natural es el pastizal y matorral (INEGI, Guia para la interpretacion de cartografia edafologia, 2004).
- *Solonetz:* Del ruso *sol*: sal, *etz*: fuertemente expresado. Connotativo de suelos con altas concentraciones de sales, su símbolo es S. Dentro del acuífero este suelo se encuentra presente cubriendo la mayor parte de la superficie del valle (INEGI, 2004). Se caracteriza por tener subsuelos con altos contenidos en arcillas las cuales forman prismas o columnas debido al alto contenido de sales de sodio. Estas se localizan en zonas donde se acumulan las sales, en particular, el álcali de sodio. Su vegetación natural es escasa y cuando existe puede ser pastizal o matorral, no tiene uso agrícola y su recuperación es difícil y costosa (INEGI, Guia para la interpretacion de cartografia edafologia, 2004).

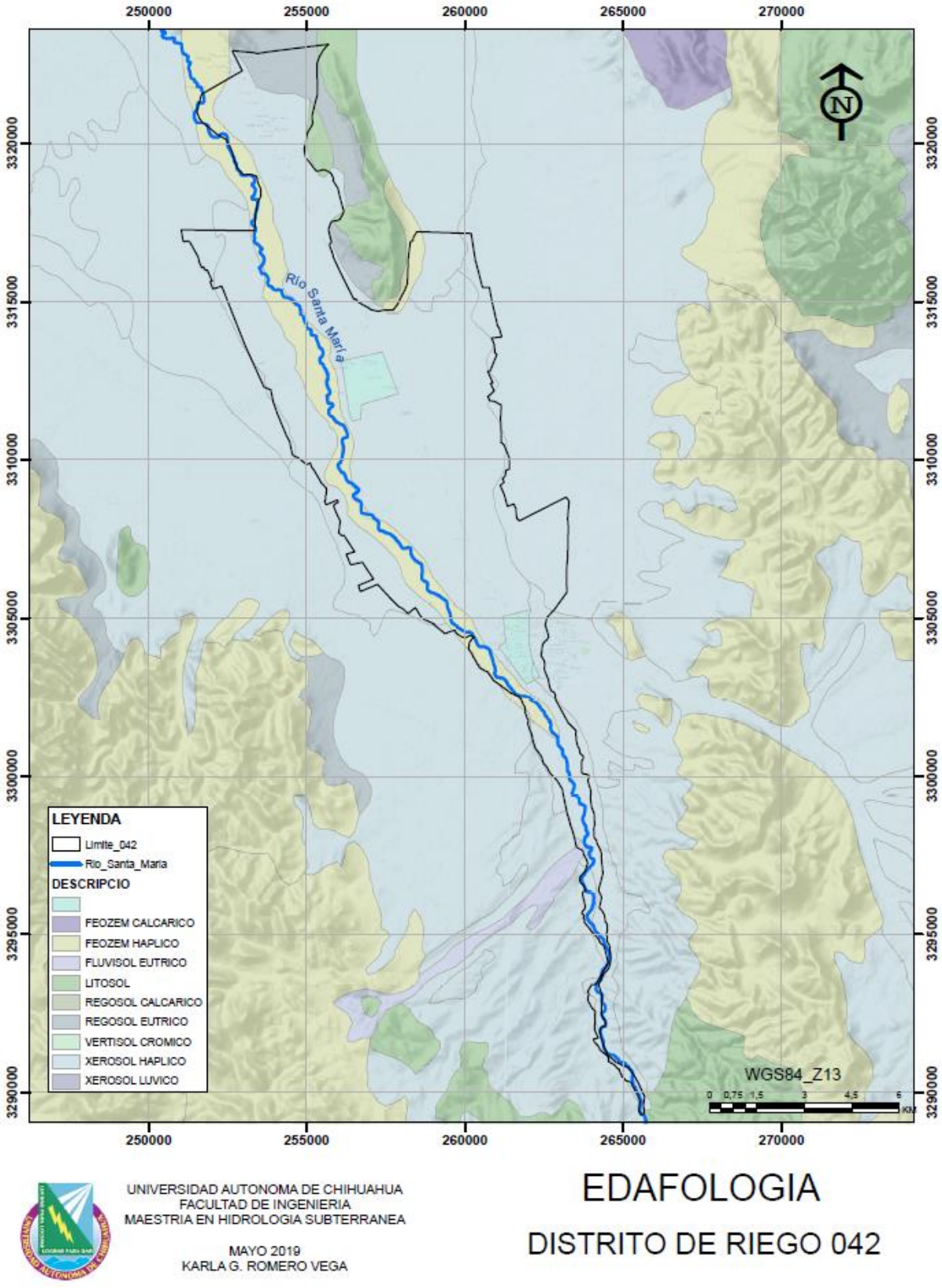


Figura 6. *Mapa de edafología del Distrito de Riego 042, Buenaventura, Chih.*

2.7 GEOMORFOLOGÍA

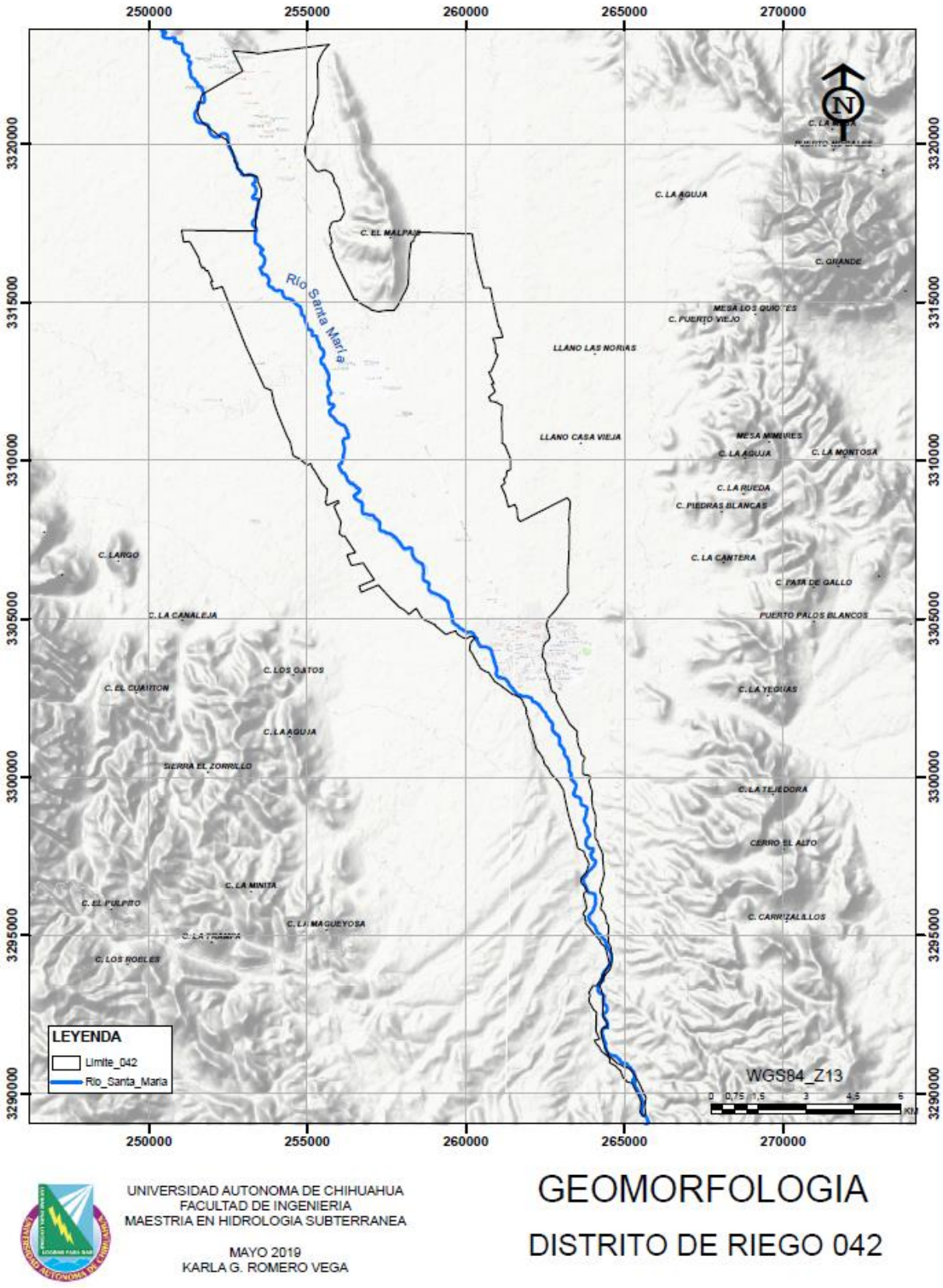
La ciencia que estudia las formas de la superficie terrestre y sus orígenes se denomina geomorfología (Tricart & Cailleux, 1965) y su objetivo radica en estudiar dichas formas enfocado a describir y entender la génesis y su posicionamiento.

El agua es uno de los principales agentes erosivos, y ya sea en su abundancia y/o escases es protagonista en la definición del relieve. Mateo Gutierrez (2008) define una corriente como una estrecha y larga depresión o canal por donde el agua se desplaza pendiente abajo bajo la influencia de la gravedad. Casi todas las corrientes siguen algún tipo de "ramificaciones", según el sentido que tengan sus tributarios y estos a su vez tienen otros más pequeños que aportan agua (aunque sea de manera efímera), estas ramificaciones se definen como patrón de drenaje. Bajo este concepto el Río Santa María presenta un patrón de drenaje que configuran un sistema casi de tipo paralelo, lo que indica un control estructural en la zona, con muy baja pendiente, y en algunas ocasiones se continua en la planicie del valle formando arroyos y en otras desaparece en dicha planicie originando pequeñas lagunas.

Dentro del acuífero Buenaventura, las planicies ocupan del orden de 46% del área, correspondiendo a las superficies que presentan pendiente reducida las cuales están geográficamente entre dos sistemas montañosos que inician al sur y se van abriendo al NW y al NE (ambos de origen ígneo), en forma de "V" (figura 7).

Esta planicie conforma el localmente conocido Valle de Buenaventura, con relleno coluvial producto de la erosión de estas dos sierras y el arrastre del río que lo atraviesa longitudinalmente. Se tienen barrenos de 200 m de profundidad en el centro del valle y estos no alcanzan a tocar el macizo rocoso. El valle está compuesto, generalmente, por sedimentos no consolidados.

El nacimiento de la Sierra Madre Occidental (SMO), dio paso a la formación de un parteaguas que dividió las corrientes en gran parte del territorio mexicano, quedando al oeste, en su mayoría, corrientes que desembocan en el Océano Pacífico, y al este corrientes internas que debido al relieve formado en su mayoría por cordilleras o pequeños sistemas montañosos paralelos a la SMO, propiciaron la formación de lagos al perder el río fuerza de arrastre por las bajas pendientes en el relieve, bajas precipitaciones y bajos afluentes tributarios.



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN HIDROLOGIA SUBTERRANEA

MAYO 2019
KARLA G. ROMERO VEGA

GEOMORFOLOGIA

DISTRITO DE RIEGO 042

Figura 7. *Mapa con rasgos geomorfológicos del DR 042 y áreas aledañas.*

Es posible que erupciones básicas interceptaran el valle longitudinalmente, formando barreras que, interceptando el curso del río originaron la formación de un nuevo cauce. A lo largo del río se encuentran grandes masas de material arrastrado por una erosión muy violenta, pues los restos de estos depósitos los encontramos no solo constituyendo, en forma de un conglomerado duro de gran espesor y de considerable extensión en el vaso de las Cruces, la zona de El Rebote y La Plazuela. Este mismo conglomerado aparece en la parte Norte de la Sierra de la Plazuela donde forma, en una gran extensión, la parte inferior de todas las laderas y el fondo de esta porción superior del Valle de San Buenaventura, y su ligera, pero constante inclinación al norte hace suponer que forma este conglomerado el subsuelo del Valle de San Buenaventura en grandes extensiones con un espesor considerable. (Waitz, 1927).

2.8 GEOLOGÍA

La geología del área de estudio está constituida por rocas ígneas cubiertas de aluvión del Cuaternario, localizándose en algunas zonas derrames volcánicos con presencia de textura amigdaloide. En las zonas aledañas al Río Santa María se localizan depósitos aluviales constituidos por cantos rodados, gravas y arcillas. Las montañas están constituidas por rocas de naturaleza ígnea riolítica, tobas riolítica y basaltos del Mesozoico (CNA, 2015).

Las principales unidades litoestratigráficas que afloran en el área de estudio son sedimentos recientes producto de la erosión de materiales volcánicos. Las unidades de sedimentos recientes están constituidas principalmente por depósitos aluviales y fluviales. Los depósitos aluviales forman la mayor parte de la extensión de la planicie del valle de Buenaventura, y de acuerdo con los cortes litológicos de los pozos perforados por la CONAGUA en el año 2010 (200 m de profundidad), en el valle están constituidos principalmente por arenas, gravillas y gravas con intercalaciones de arcillas, los cuales son materiales principales a lo largo de todo el acuífero en explotación, con permeabilidad variable según el contenido de arcillas (Figura 8).

La cuenca tiene su origen a partir de los movimientos registrados durante la Orogenia Laramide, cuyos movimientos dieron lugar a desplazamientos de las rocas, incluso a

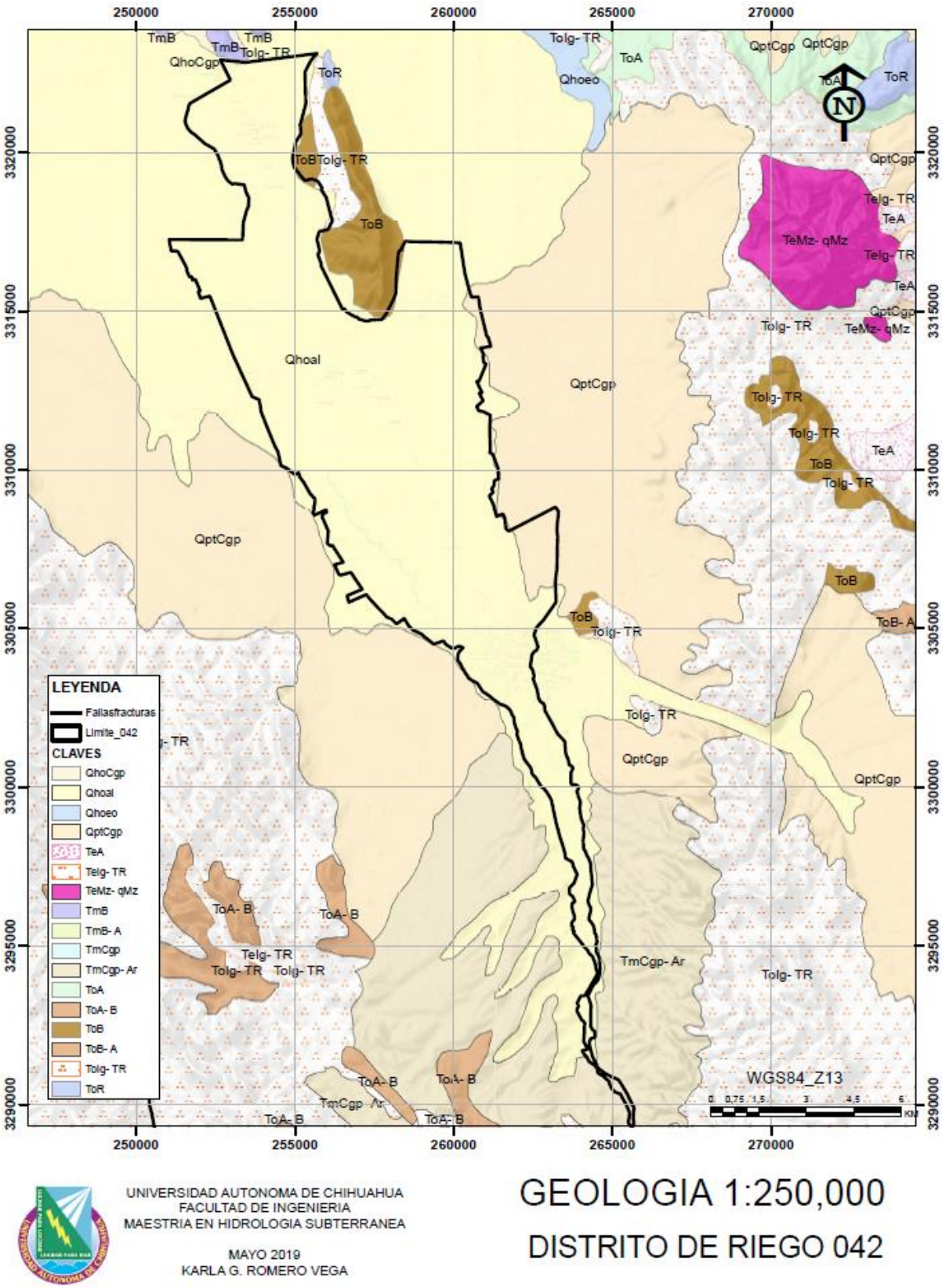
manifestaciones de fuertes espesores de rocas volcánicas tanto intrusivas como extrusivas que actualmente conforman la Sierra Madre Occidental. Las sierras que delimitan al valle están formadas por una secuencia de riolitas, tobas riolíticas soldadas, delgadas capas de cenizas volcánicas y capas de andesitas basálticas, con inclinación hacia el río Santa María. En algunos sitios las tobas riolíticas soldadas por su fracturamiento presentan estructuras columnares y localmente se observan también retorcidas, lo que sugiere que sufrieron deformaciones plásticas por flujo, antes de su solidificación.

Por el fracturamiento que presentan las rocas funcionan como transmisoras de agua de lluvia hacia los acuíferos del valle. De acuerdo con información de los cortes geológicos obtenidos de 3 perforaciones realizadas hasta 120 m de profundidad por la SRH en el área del ejido de Rodrigo M. Quevedo en 1974, se observó que los espesores de los depósitos aluviales del valle, que es donde se ubica el acuífero deben pasar a esa profundidad (CNA, 2015). Lo mismo ocurre con tres pozos de recuperación que perforo en los últimos tres años la CONAGUA de 200 m en la localidad de Buenaventura.

Los depósitos están constituidos por limos, arenas, arcillas, gravas y cantos rodados; por su extensión reducida y por encontrarse arriba del nivel de saturación, no constituyen acuíferos, pero en cambio, por su alta permeabilidad favorecen la infiltración del agua hacia el subsuelo, constituyendo zonas de recarga del acuífero del valle de Buenaventura.

Los depósitos de pie de monte (o coluviales) están constituidos por fragmentos angulosos de diferentes tamaños y composición, empaquetados en una matriz arcillosa. En las partes bajas de la zona de estudio se encuentran acumulaciones de sedimentos finos que se han clasificado como depósitos lacustres, en donde el paquete de limos y arcillas es de gran extensión.

Los aluviones tienen gran importancia desde el punto de vista geohidrológico, pues en ellos se realiza la explotación de aguas subterráneas. La importancia de las riolitas y basaltos estriba en que son aportadores o alimentadores de estos aluviones, en aquellas regiones donde existe un fracturamiento intenso. La información geológica e hidrogeológica disponible permite establecer que el área de estudio principalmente está emplazada en materiales del Cuaternario.



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN HIDROLOGIA SUBTERRANEA

MAYO 2019
KARLA G. ROMERO VEGA

GEOLOGIA 1:250,000
DISTRITO DE RIEGO 042

***Figura 8**. Geología superficial correspondiente al área del Distrito de Riego 042*

2.9 ESTRATIGRAFÍA Y TECTÓNICA

Es probable que el paralelismo que tienen las sierras, tanto al este como al oeste del Valle de Buenaventura, se debe al sistema de fallas y grietas antiguas por las cuales pudo haber emisiones de riolitas terciarias en la época en la que se formaba la SMO. Mientras en la parte central de la Sierra Madre al oeste se presenta en forma de un masivo uniforme en que probablemente las efusiones de varias grietas paralelas se entrelazan y combinan, en la parte lateral, donde la emisión de magma a través de grietas (probablemente más distantes una de otra) ha sido menos cuantiosas. Las lavas al acumularse encima de las grietas formaban las sierras alargadas paralelas y aisladas una de otra por valles longitudinales, sin que faltaran naturalmente complicaciones de este sistema sencillo, por la emisión de lavas y material clástico producido por erupciones de carácter explosivo, por grietas transversales y por ramificaciones y bifurcaciones de las principales erupciones a que deben, por ejemplo, su origen la Sierrita de la Plazuela y la de la Angostura (Waitz, 1927).

Mas al norte, en cambio, el sistema sencillo de la efusión de lavas a través y a lo largo de grietas que en la parte media y sur del valle del Río de Santa María es bastante pronunciado, se complica por la existencia de macizos elevados formados por el plegamiento y levantamiento de sedimentos cretácicos que, aunque existen con seguridad también en el sur, quedaron en la profundidad y fueron cubiertos por las emisiones riolíticas posteriores. Antes de la emisión de estos magmas riolíticos, tuvieron lugar la efusión de grandes masas de lavas félsicos, de andesitas y basaltos, pero en la zona de estudio han quedado completamente cubiertas por las riolitas (Waitz, 1927).

2.10 HISTORIA DEL DISTRITO DE RIEGO 042, VALLE BUENAVENTURA, A.C.

En 1927 se efectuó un estudio agrológico del valle del Río Santa María, para determinar la factibilidad del establecimiento del Distrito de Riego de “San Buenaventura”. Sus conclusiones fueron completamente desfavorables, pues no se encontraron suelos de buena calidad en cantidad suficiente y de que los existentes se localizaban en manchas aisladas, lo que aumentaría el costo de canalización. Sin embargo, se aconsejaba restringir el área de riego a una zona de la margen derecha únicamente y siempre que las obras de captación que se construyeran para el efecto fueran hechas a bajo costo.

Debido a los motivos anteriores y dados las condiciones que prevalecían en aquella época el proyecto quedó desechado, ya que entonces apenas principiaban a construirse obras de Irrigación y había gran cantidad de proyectos con mejores perspectivas de éxito. En el año de 1945, fue reconsiderada la factibilidad del Proyecto del Río de Santa María, principiándose en 1946 los trabajos en la construcción de la presa de almacenamiento "Francisco Villa" en la boquilla de "El Tintero" Chihuahua, que abastecería de agua para riego a unas 8,000 ha en el valle del Río Santa María, creándose de esta manera el Distrito de Riego 042 "Buenaventura". Iniciando formalmente su operación en el año de 1951, no contando aun con Decreto Oficial que lo establezca.

La principal fuente de abastecimiento de agua del Distrito de Riego 042 es la "Presa el Tintero" que capta los escurrimientos del río Santa María, cuenta con una capacidad de almacenamiento actual de 125.075 millones de m^3. La otra fuente es la extracción de agua subterránea a través de 80 pozos profundos con una extracción media de 32.5 millones de m^3 (CNA, Formulación del Plan Director para la Modernización Integral del Riego del Distrito de Riego 042 Buenaventura, Chihuahua., 2013).

La operación del Distrito de Riego, parte de la obra de toma de la presa "El Tintero" donde el agua es conducida por el cauce natural del río Santa María 22 km. aguas abajo, donde a partir de ahí inicia la zona de riego. La infraestructura de la zona de riego consiste en 7 derivadoras localizadas en el cauce del río Santa María que funciona como canal de conducción derivándose el agua hacia los canales principales, la red de distribución consta de 128.7 kilómetros y revestidos de concreto en un 94.5%, así mismo cuenta con 629 estructuras de medición y control. En la red de distribución descargan 80 pozos profundos. La red de caminos consta de 128.7 km. de operación y 110 km. de acceso (CNA, Formulación del Plan Director para la Modernización Integral del Riego del Distrito de Riego 042 Buenaventura, Chihuahua., 2013). Hoy el Distrito de Riego cuenta con una superficie total de 9,000 ha de las cuales 7,718 están registradas en el padrón (superficie física), de estas, 3,366.39 pertenecen al sector privado y 4,352 al ejidal (CNA, Formulación del Plan Director para la Modernización Integral del Riego del Distrito de Riego 042 Buenaventura, Chihuahua., 2013).

Capítulo 3: Geofísica

3.1 INTRODUCCIÓN

La Geofísica es una rama de la Geología que utiliza los principios fundamentales de la Física para investigar el comportamiento de algunos componentes de nuestro planeta como el campo electromagnético, la densidad de las rocas, su capacidad para conducir la corriente electica, etc.

En las últimas décadas, el surgimiento de nuevas técnicas geofísicas, han ayudado al entendimiento de los problemas que se representan con frecuencia en hidrogeología, como son: la evolución de los acuíferos, la identificación de focos de contaminación que deterioran la calidad del agua, tanto superficial como subterránea y los de control de calidad en las obras de captación, tanto en su fase constructiva como en la de operación. Los avances alcanzados recientemente por las técnicas de prospección geofísica en la exploración de las aguas subterráneas cubren un amplio espectro de aplicaciones. Es importante resaltar el hecho de que los métodos geofísicos actúan en la exploración de aguas subterráneas como métodos indirectos, es decir, ayudan a determinar las zonas más favorables a partir de parámetros físicos del subsuelo. Esto significa en el mejor de los casos, que la prospección geofísica orienta la localización de las zonas donde existen las condiciones necesarias para que una formación geológica sea explotable como acuífero, pero nunca se puede considerar un método de exploración directo y los resultados siempre dependerán de la interpretación que se de los datos obtenidos.

3.2 RESISTIVIDAD

Olmo y Lopez (1999) consideran que la secuencia lógica de toda campaña geofísica consta de cinco etapas (figura 9):

- Planteamiento: se debe definir el problema que se quiere investigar.
- Planificación: traducir en términos geofísicos el problema planteado, lo cual implica elaborar el modelo del subsuelo cuya realidad quiere comprobarse. En esta etapa se realiza la selección de los métodos que tengan mayor resolución, ya que la utilización de más de

un método es altamente recomendable por el hecho de reducir los problemas de equivalencia.

- Medición: corresponde con la toma de datos en el campo.
- Procesamiento: una vez obtenidos los datos, es necesario convertir los datos en un documento que será utilizado para la interpretación de resultados.
- Interpretación: en esta etapa el documento geofísico debe ser convertido en un documento con contenido geológico.

***Figura 9**. Secuencia lógica de una campaña geofísica (Olmo y Lopez, 1999).*

Olmo y López (1999) también considera que los problemas que se plantean actualmente en la investigación hidrogeológica y a los que la prospección geofísica puede aportar información útil, principalmente son:

- Delimitación de zonas favorables para la explotación de agua subterránea
- Control de calidad de las aguas subterráneas
- Estimación de parámetros hidráulicos
- Protección de acuíferos superficiales

Los métodos geoeléctricos han sido y son utilizados como práctica habitual en la investigación hidrogeológica para obtener información de las propiedades del subsuelo. Estas técnicas son principalmente de resistividad del suelo mediante métodos que operan por corriente continúa utilizando un dispositivo con diversos electrodos que se sitúan sobre el terreno en contacto eléctrico con el medio rocoso a estudiar. Estos métodos utilizan las variaciones de las propiedades eléctricas de las rocas, en especial su resistividad o su valor inverso conocido como conductividad.

La resistividad es la resistencia electica especifica de un determinado material. Se designa pro la letra griega rho minúscula (ρ) y se mide en ohm*metro (Sears & Zemansky, 2009). Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente

eléctrica: un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que un valor bajo indica que es un buen conductor.

Por sus componentes minerales, las rocas en su mayoría "deberían ser aislantes" (como la mayoría de las rocas ígneas). Si el terreno es un conductor moderado, se debe a que las rocas que lo constituyen son porosas y además estos poros están parcial o totalmente saturados, por lo tanto, se comportan como conductores iónicos de resistividad muy variable. Las rocas porosas cuyos poros están llenos de electrolitos constituyen un medio heterogéneo con inclusiones de resistividad mucho menor que la de los minerales de su matriz (Sears & Zemansky, 2009). El caso de mayor interés hidrogeológico es aquel en el que los poros de un estrato se encuentran en contacto (alta porosidad efectiva) y ofrecen un camino ininterrumpido para la conducción de la corriente eléctrica.

Como se mencionó anteriormente para fines de investigación, la aplicación de la prospección geofísica o la resistividad se ha enfocado en el uso de los métodos electicos en una dimensión, principalmente "Sondeos Electicos Verticales" (SEV), con arreglos del tipo Schlumberger y Wenner. El objetivo de los SEV es investigar los cambios de la resistividad a profundidad los cuales son asociados a los cambios en las propiedades de las unidades rocosas. Para tal efecto, se requiere de un arreglo eléctrico, con el fin de medir las diferentes resistencias de potencial, cuando se ha inyectado corriente a diferentes distancias. El método consiste en inyectar corriente en dos electrodos hincados en la superficie del suelo denominados como A y B, a la vez son necesarios dos electrodos más (M y N) para medir la diferencia de potencial generada.

La interpretación de las mediciones está en a la suposición de que la superficie consiste en una secuencia de distintas capas con espesor variable, homogénea e isotrópica. En la realidad las condiciones geológicas nunca se presentan de esta manera, ya que tienen variaciones laterales, que se pueden deber a las condiciones fisicoquímicas, mecánicas, etc. Por este motivo, el método mide la resistividad aparente, la cual viene calculada a partir de la medida de la intensidad de corriente que está en el terreno de la medida de la caída de potencial en los electrodos internos del arreglo geométrico elegido (Schlumberger o Wenner). Para obtener el valor de la resistividad verdadera y el espesor de las capas, los

registros del SEV se pueden interpretar por diferentes métodos, tanto manuales como con diferentes softwares.

Los electrodos de inyección de corriente (A y B) y los de medición de potencial (M y N) se disponen alineados, de acuerdo con las configuraciones propuestas por Schlumberger y Wenner. Para fines de este trabajo de investigación se utilizó la configuración de Schlumberger (figura 10), la cual consiste en cuatro electrodos los cuales se clavan en el terreno en una línea recta y los electrodos centrales se mantienen fijos a la misma distancia y los electrodos A y B se mueven a la misma distancia pero a diferentes distancias de los electrodos (Orellana & Mooney, 1966).

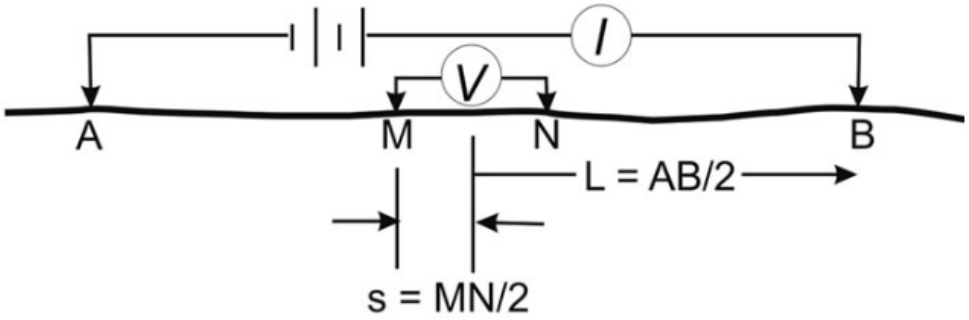


Figura 10. *Configuración para el método Schlumberger (Modificado de Orellana & Mooney, 1966).*

Las ventajas de utilizar la configuración Schlumberger son que es necesario mover menos electrodos para cada sondeo y que la longitud del cable para los electrodos potenciales es más corta que en otros arreglos. Los sondeos Schlumberger generalmente tienen mejor resolución, mayor profundidad de sondeo y menos despliegue de campo que la matriz de Wenner (EPA, 2017).

El objetivo de un SEV es la obtención de un modelo de variación de la resistividad aparente en función de la profundidad, a partir de mediciones realizadas en superficie (figura 11). La profundidad alcanzada por la corriente aumenta a medida que crece la distancia AB, aunque generalmente no existe una relación de proporcionalidad entre ambas, se suele considerar que la profundidad de penetración es generalmente 1/3 de la distancia AB.

Para fines prácticos a lo largo de la investigación resistividad hará referencia a resistividad eléctrica y conductividad a conductividad hidráulica.

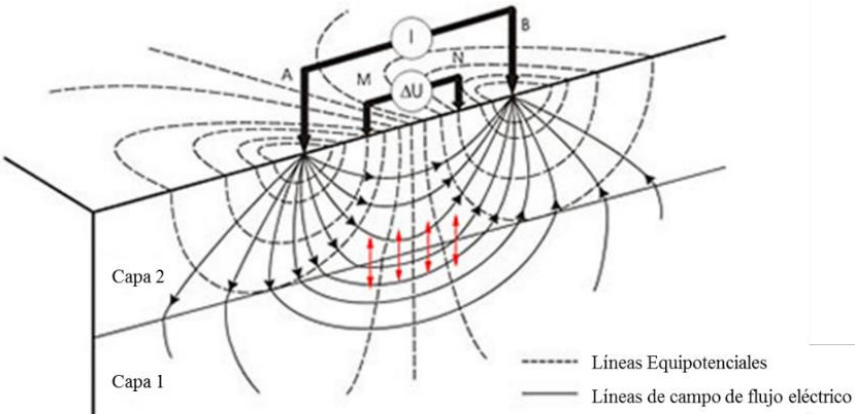


Figura 11. *Campo de flujo eléctrico en configuración Schlumberger (modificado de http://www.arctic-geophysics.com).*

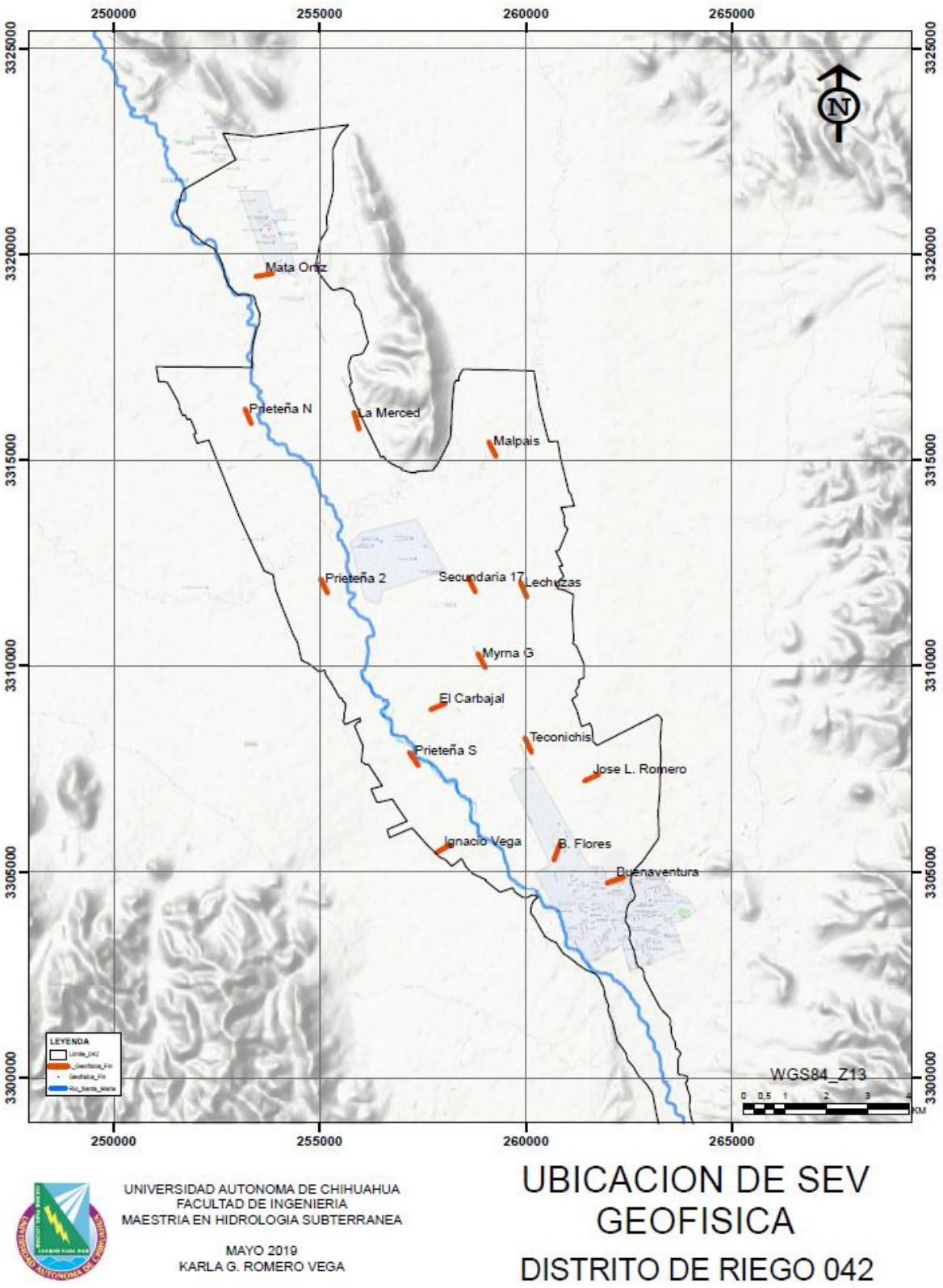


Figura 12. *Mapa de localización de SEV realizados para la investigación.*

3.3 TRABAJO DE CAMPO

3.3.1 Equipo Utilizado y material utilizado

El equipo geofísico utilizado para la adquisición de los datos de resistividad es el modelo Sting R1 1P de Advanced Geosciences, Inc. (AGI) (figura 13) actualmente descontinuado y reemplazado con el SuperSting R1/1P.

Figura 13. *Equipo utilizado para medición de resistividad Sting R1 1P Earth Resisitivity Meter de AGI.*

El cual para trabajar es necesario contar con el siguiente material adicional al equipo de geofísica

- 4 carretes de cable
- 6 nodos de aluminio
- 4 marros/martillos
- Tabla con hojas de registro
- GPS de mano

3.3.2 Metodología del levantamiento.

El posicionamiento y la cota de elevación de los sitios a realizar los SEV se realizó con GPS. Posterior a la ubicación del punto se sitúa el equipo y se coloca 1 estaca central,

que evitará que los cables se muevan, se tensionen y se desconecten del aparato. Las estacas se colocaron a distancia según la configuración de Schlumberger. Una vez realizada la medición se registra en la hoja y se mueven las estacas a la siguiente estación. La profundidad de exploración máxima alcanzada para estos sondeos fue de 120.182 m (Figuras 12 y 14).

Figura 14. *Imágenes de trabajo de campo de geoeléctrica.*

Una vez obtenidas la resistividad de cada capa se trabaja con el software se obtiene conductividad y espesores de estas se agrupan en rangos de conductividad, los límites de los

rangos para cada tipo de roca/suelo pueden variar de un autor a otro y depender del área de estudio de donde se obtuvieron dichos datos (Figura 15).

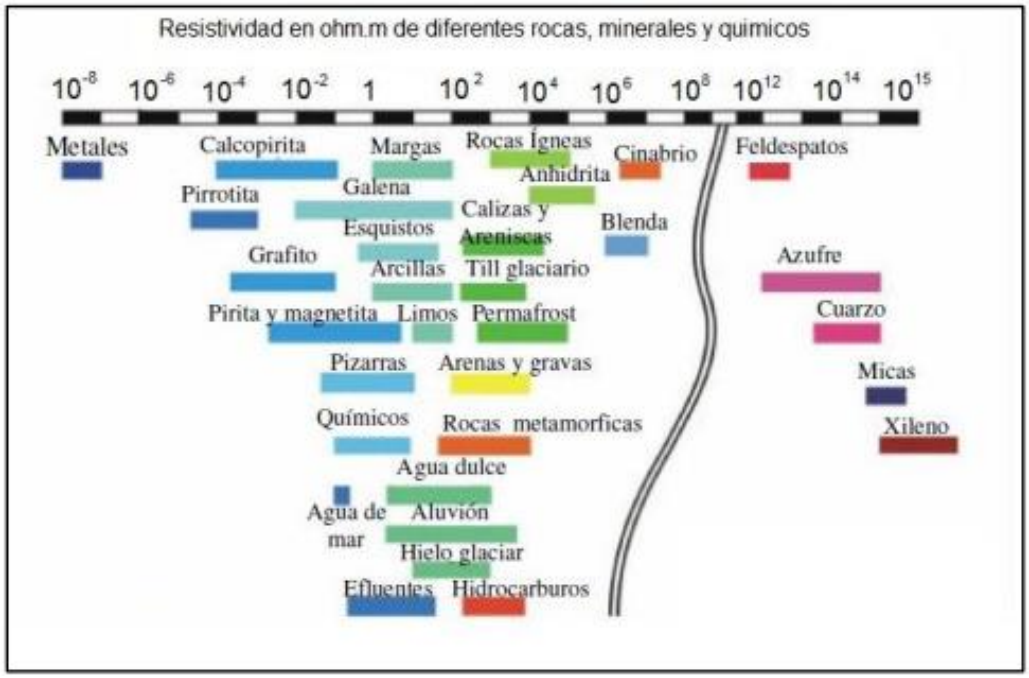


Figura 15. *Resistividades de diferentes rocas. Modificado de Orellana 1982.*

Capítulo 4: Hidrogeología

El agua en el planeta se encuentra en muchas formas diferentes, desde vapor de agua en la atmósfera, agua de lluvia, nieve, agua salada en los mares, aguas profundas, agua dulce en ríos, lagos y glaciares. Del total de agua contenida en la Tierra, unos 1,386 millones de kilómetros cúbicos de agua (Shlklomanov & Rodda, 2004): el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5% es agua dulce. De ese 2.5% de agua dulce, el 68.7% se encuentra en forma de hielo y nieve permanentemente, por lo que no está disponible directamente, el 29.9% corresponde a las aguas subterráneas y solo el 0.26% del agua dulce se encuentra en lagos, ríos y arroyos (Collazo & Montaño, 2012).

La interminable circulación de agua entre el océano, la atmósfera y la Tierra se denomina ciclo hidrológico (Freeze & Cherry, 1979). Dicho ciclo es un proceso continuo en el que el agua es evaporada desde los océanos o los reservorios de agua superficiales, se mueve hacia los continentes como humedad en el aire y produce precipitación. La precipitación que cae sobre los continentes se distribuye por varios caminos. Una parte, es retenida en el suelo y la otra vuelve a la atmosfera por medio de la evaporación (conversión de agua líquida en vapor de agua), o puede pasar a la atmósfera en forma de vapor mediante la respiración de las plantas (transpiración), la combinación de ambos fenómenos es llamada evapotranspiración. Otra porción se convierte en escorrentía superficial que alimenta los ríos. Finalmente, una parte entra en el suelo como infiltración (escorrentía subterránea). Esta porción puede pasar de nuevo a los ríos o pasar a profundidades mayores como agua subterránea. Las aguas superficiales y subterráneas se mueven hacia zonas de más baja altitud y finamente descargan al mar desde donde, una porción puede volver a la atmósfera (Fagundo & González, Hidrogeoquímica, 2005).

La existencia de agua debajo de la superficie terrestre está asociada a las formaciones geológicas permeables, las cuales pueden llegar a formar un acuífero, a la pequeña parte de roca o suelo que no es ocupada por materia sólida puede llegar a ser saturada por agua subterránea. La porosidad de los materiales terrestres es el porcentaje de roca o suelo que esta desprovisto de material (Fetter, 2001). La porosidad original se debe a los procesos genéticos de las rocas ígneas y sedimentarias. Otros poros, denominados secundarios, se han originado después a la formación de la roca por agrietamiento, fisuración o disolución

química. Debido a su tamaño, los poros o grietas pueden ser de dimensiones capilares o más grandes, pueden encontrarse aislados o constituyendo redes conectadas a través de conductos.

El 90% de los acuíferos aprovechables se encuentran en rocas no consolidadas, principalmente grava y arena (Fagundo & González, Hidrogeoquímica, 2005). La circulación del agua subterránea depende de la zona hidrogeológica por donde ésta se mueve. Aunque estas zonas han sido denominadas en forma distinta por diferentes autores, en general se pueden distinguir las siguientes zonas: zona no saturada o de aireación; zona freática o saturada y zona de saturación y circulación profunda. El espesor de la zona de aireación depende del tipo de suelo y de la vegetación. Juega un importante papel en el desarrollo agrícola. En esta zona, una parte del agua que se infiltra humedece el suelo y es retenida por las raíces de las plantas que intervienen en el proceso de evapotranspiración. Otra parte logra infiltrarse hasta la zona freática (Fagundo & González, Hidrogeoquímica, 2005).

Según la constitución de los materiales geológicos que limitan al acuífero, los mismos se denominan libres o confinados. Los acuíferos libres son aquellos que solo presentan una capa impermeable subyacente y que los bordes de la cuenca subterránea, no así en su parte superior. Se alimenta directamente de las precipitaciones. La composición química de las aguas que se mueven en este tipo de acuífero refleja las propiedades litológicas del mismo.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) en el año 2008 público un mapa Hidrogeológico de México, escala 1;4´000,000; con la finalidad de caracterizar las unidades hidrogeológicas de México por medio de la porosidad y permeabilidad del suelo para poder describir el subsuelo.

Basado en los metadatos disponibles se realiza el siguiente mapa (figura 16) del área de estudio.

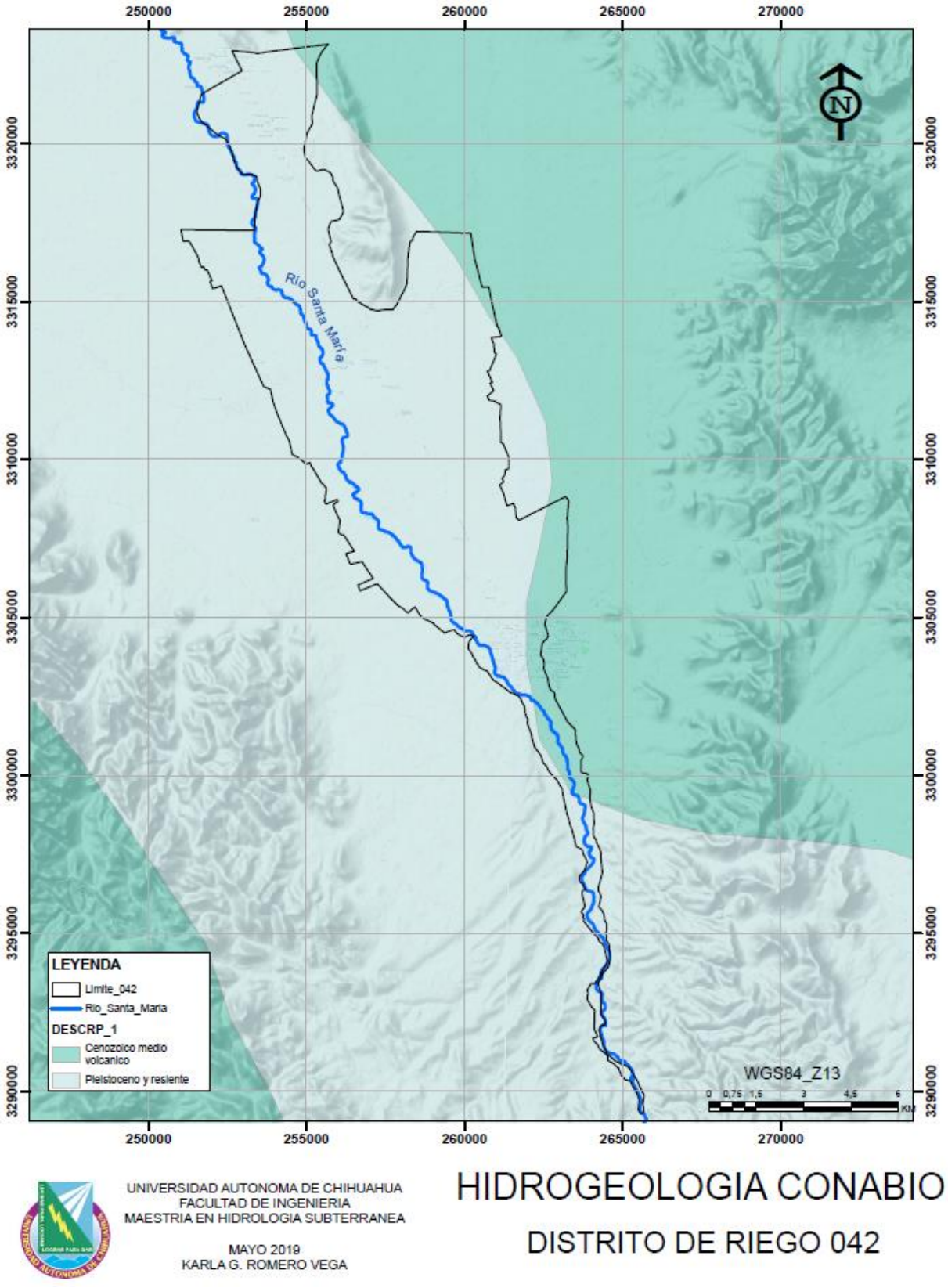


Figura 16. *Mapa hidrológico de la CONABIO del área del DR 042.*

Con la información disponible el Distrito de Riego 042, queda principalmente en el área del Pleistoceno y Reciente, con terrazas marinas, gravas, arenas y limos, depósitos aluviales y lacustres con permeabilidad media a alta (generalizada). En menor proporción, pero presente al Este del DR 042 se encuentra el área del Cenozoico medio volcánico, caracterizada por contener rocas volcánicas (lavas, brechas y tobas) predominando las riolitas, de permeabilidad de baja a media (CONABIO, 2008).

4.1 TIPO DE ACUÍFERO

A finales de la década de 1920, el geólogo P. Waitz escribió en su reporte de campo, que en áreas cercanas al río Santa María encontró con pozos artesianos, los cuales se caracterizan por contener agua a presión y no requerir algún tipo de bomba para extraer el agua, este tipo de pozos se dan en acuíferos confinados los cuales tienen la particularidad de estar entre rocas o estratos impermeables, y si la elevación del brocal del pozo está por debajo de la superficie piezométrica del acuífero se denominan pozos artesianos brotantes (Hantush, 1969). Sin embargo, en la actualidad, en los 80 pozos del Distrito de Riego 042 o en zonas aledañas, se cuentan con registro de extracción de agua con dichas características. Una vez desaparecida esta característica el acuífero Buenaventura (acuífero en el que se encuentra localizado DR 042), se considera un acuífero freático o libre, ya que la presión que tiene a profundidad es igual a la presión atmosférica, por lo que su nivel piezométrico coincide con la línea de saturación (Peña Díaz, 2006).

El documento generado por CONAGUA en 1999 y 2015, denominado Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Buenaventura, Chih., menciona que basado en la información geológica e hidrogeológica disponible permite establecer que el acuífero principal está emplazado en los materiales del Cuaternario y se localiza a lo largo del valle de la cuenca del río Santa María. El acuífero está contenido principalmente en sedimentos aluviales que rellenan el valle, el cual funciona en su mayor parte como libre, existiendo probablemente cierto confinamiento en la parte norte de la cuenca, en las cercanías de la población de Galeana (fuera del DR 042).

4.2 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS POR SU ORIGEN Y TIEMPO DE CONTACTO CON EL ACUÍFERO

Custodio & Llamas (1996) en su libro Hidrología Subterránea definen que el agua subterránea se puede clasificar, según su origen en siete tipos de aguas, los cuales son:

- Aguas meteóricas o recientes.
- Aguas marinas.
- Aguas fósiles.
- Aguas congénitas.
- Aguas juveniles, metamórficas, magmáticas y volcánicas.
- Aguas minerales.
- Aguas saladas y salmueras naturales.

Bajo estos conceptos, el agua que se presenta en el área de estudio son las aguas meteóricas, las cuales son las incluidas en el ciclo del agua en la hidrósfera-litósfera-atmósfera. Se pueden caracterizar fácilmente por poseer algunos radioisótopos de vida no muy larga (tritio, radio-silicio, etc.) de origen atmosférico y una composición isotópica similar a la del agua de lluvia. Su composición está influida principalmente por la del agua de infiltración y la del material del acuífero (Custodio & Llamas, 1996).

4.3 Piezometría

Existen tres tipos de curvas o configuraciones que se realizan normalmente en los estudios del agua subterránea; las curvas de igual elevación de nivel estático, que representan curvas equipotenciales de una red de flujo: las curvas de igual evolución de los niveles piezométricos, que resultan de la resta de los niveles piezométricos obtenidos en dos fechas distintas, donde los valores negativos indican un abatimiento en el acuífero y los valores positivos recuperación del almacenamiento y las curvas de igual profundidad de los mismos niveles (Peña Díaz, 2006).

El nivel estático es la medida de nivel de agua en un pozo, en reposo, y es relativo a la superficie del terreno. La elevación del nivel estático hace referencia a la medida del nivel del agua respecto al nivel del mar, éste es el que se utiliza en gran medida para las interpretaciones que se realizan ya que este nivel no se ve afectado por los rasgos topográficos

superficiales. La profundidad del nivel estático constituye la medida que se realiza de la superficie del terreno a la "tabla de agua" de cada aprovechamiento.

La información correspondiente a las lecturas de profundidad y elevación presentadas en este trabajo fueron tomadas de los siguientes estudios: Unitecnia S.A de C.V. en 1999 realizó un estudio llamado "Reactivación de la red de monitoreo piezométrico del acuífero del Valle de Buenaventura en el Estado de Chihuahua", en el año 2002 realizó la "Actualización Piezométrica de los Acuíferos de Janos y Buenaventura, en el Estado de Chihuahua", encomendando a la empresa COPEI Ingeniería, S.A. de C.V y por último "Actualización de mediciones piezométricas de Acuífero Buenaventura, Chih.", durante el año 2004 a cargo de Moro Ingeniería S. C. Finalmente, como parte de la presente investigación, y como parte del trabajo de campo, se realizó una campaña de actualización piezométrica a 46 pozos del distrito de riego durante el mes de enero de 2019.

Para la elaboración de las curvas equipotenciales y tablas presentadas se requirió ajustar la coordenada correspondiente a la elevación (coordenada "Z") a una misma para el mismo pozo, pues debido a los diferentes equipos que se utilizaron para realizar el levantamiento así como la precisión de estos, presentaban variaciones hasta de 4 metros entre una piezometría y otra, por lo que mediante el software ArcMap y el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) del INEGI, se realizó el cálculo de la elevación para cada uno de los pozos con la coordenada este y norte. Los pozos que se describen como "XX_HISTORICO" hacen referencia a aprovechamientos de agua subterránea cercanos al distrito de riego (y dentro del acuífero Buenaventura), los cuales en su mayoría aparecían en las tablas sin identificador, por lo que se desplegó la información correspondiente y se homogenizaron nombres para considerarlos y que sirvieran de apoyo para la elaboración de las configuraciones.

4.3.1 Piezometría 1999

En el año de 1999, Unitecnia S.A de C.V, realizó una campaña de actualización de niveles piezométricos en el acuífero Buenaventura, actualizando 28 pozos a lo largo de dicho acuífero. La localización de los pozos actualizados se muestra en la figura 17. Las configuraciones presentadas en los siguientes mapas se realizaron con apoyo del software ArcMap y en interpolador "*Natural Neighbor*" (figura 18).

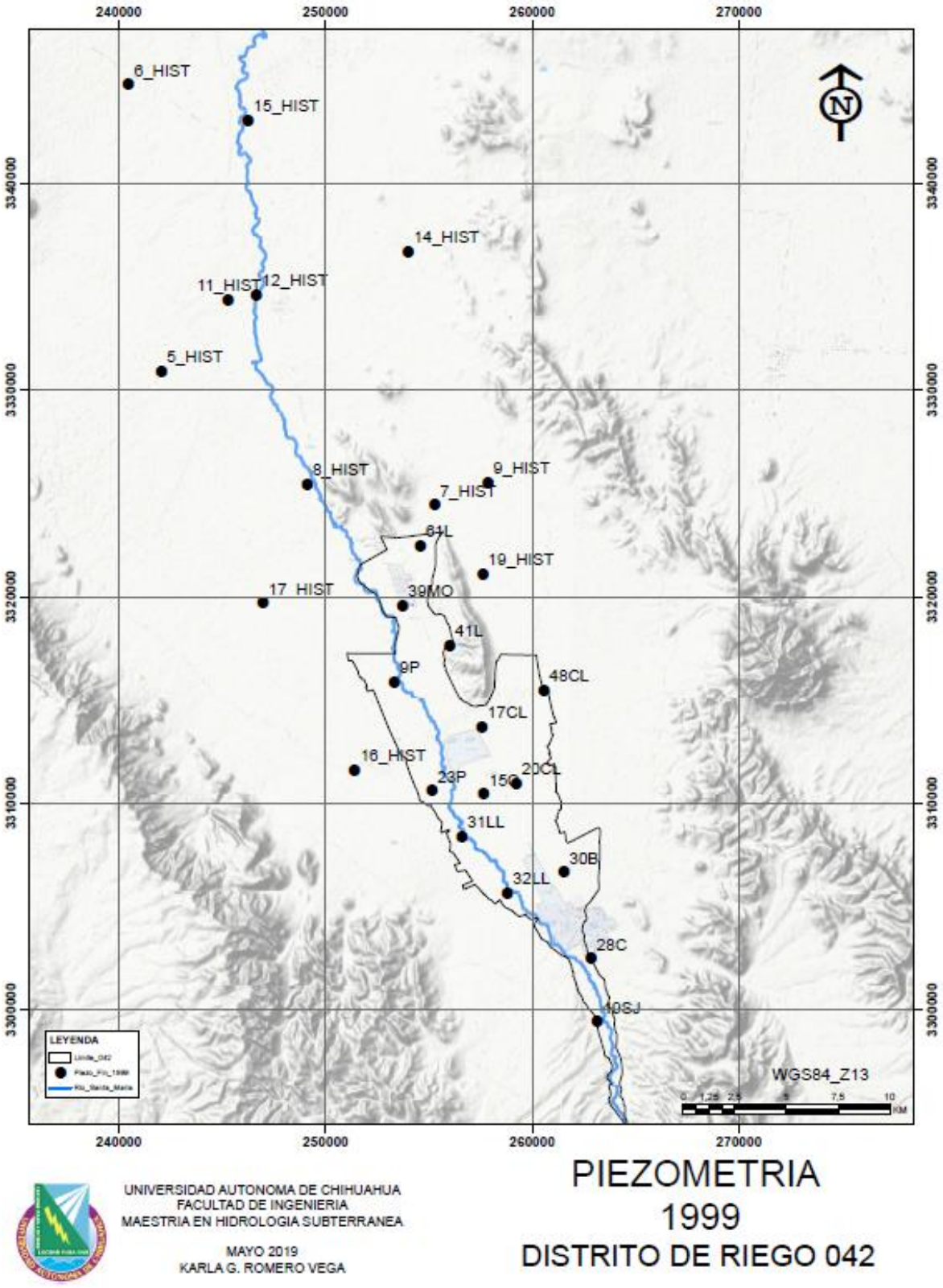


Figura 17. *Pozos con piezometría en el año de 1999.*

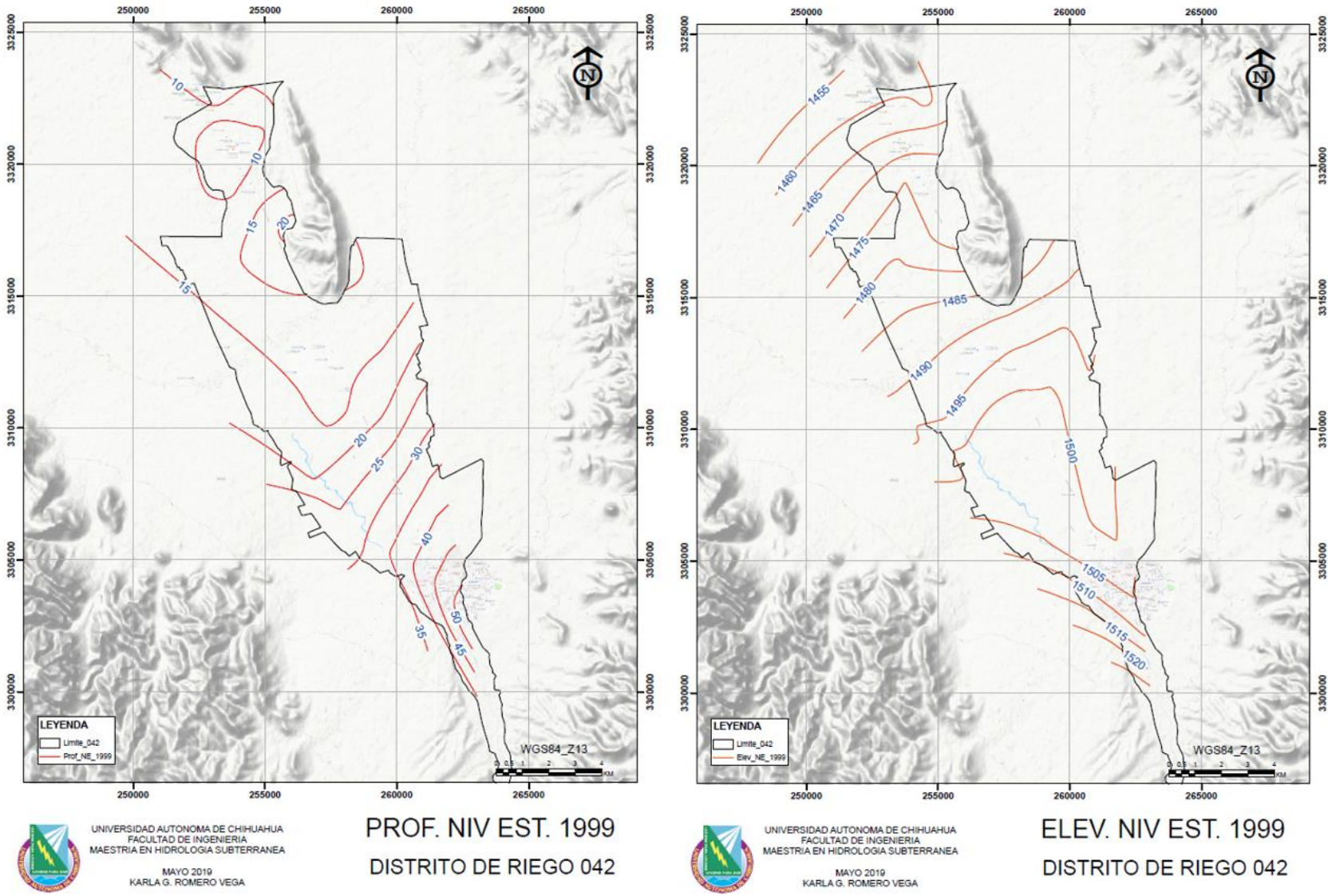


***Figura 18**. Izq. Configuración de Nivel Estático en 1999. Der. Configuración de Profundidad de Nivel Estático en 1999.*

4.3.2 Piezometría 2002

Por encomienda de la CNA en el año 2002, COPEI Ingeniería, S.A. de C.V., realizó una "Actualización Piezométrica de los Acuíferos de Janos y Buenaventura, en el Estado de Chihuahua, logrando actualizar 41 pozos en el acuífero Buenaventura (figuras 19 y 20).

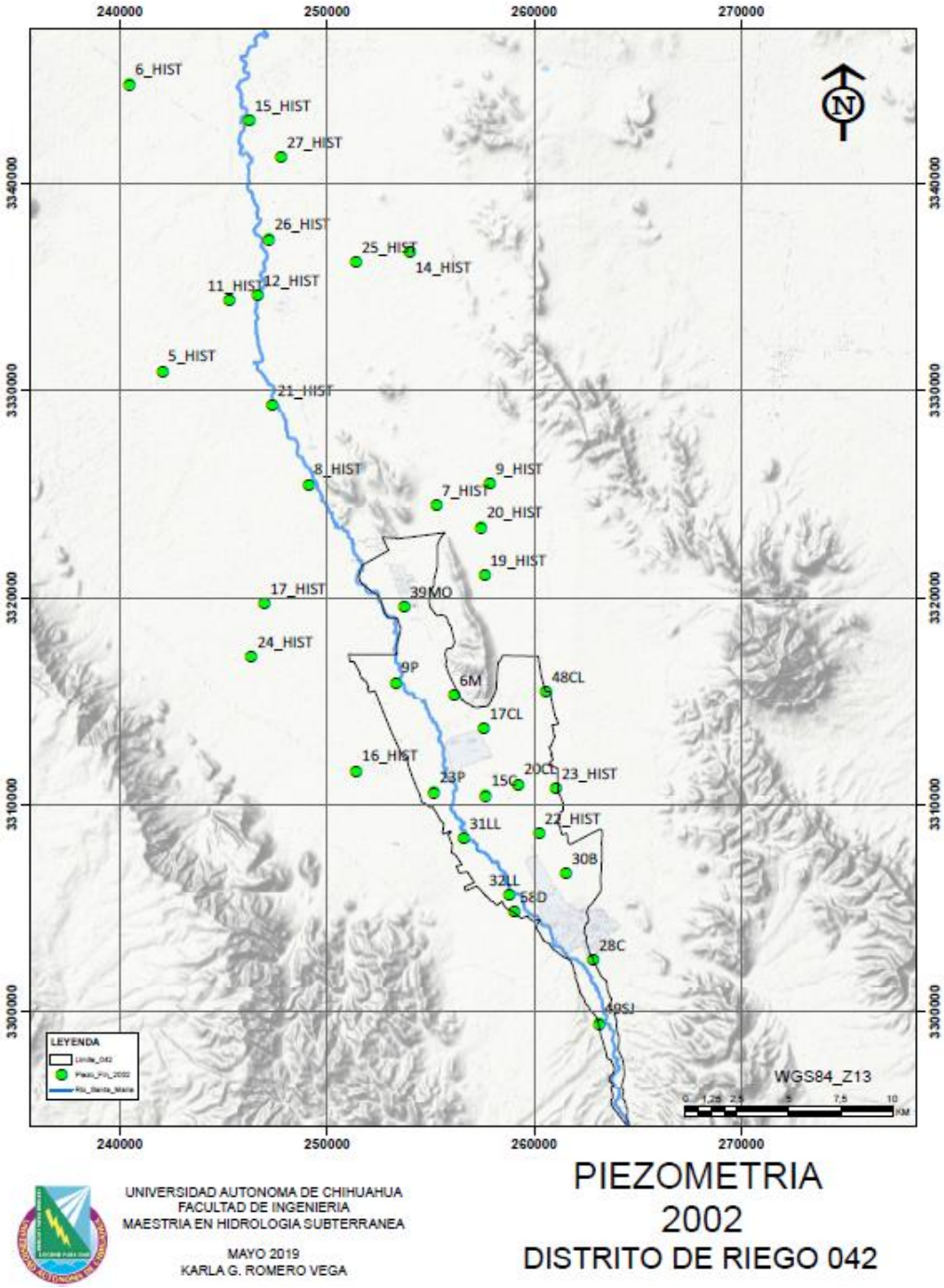


Figura 19. *Pozos con piezometría actualizada el año 2002*

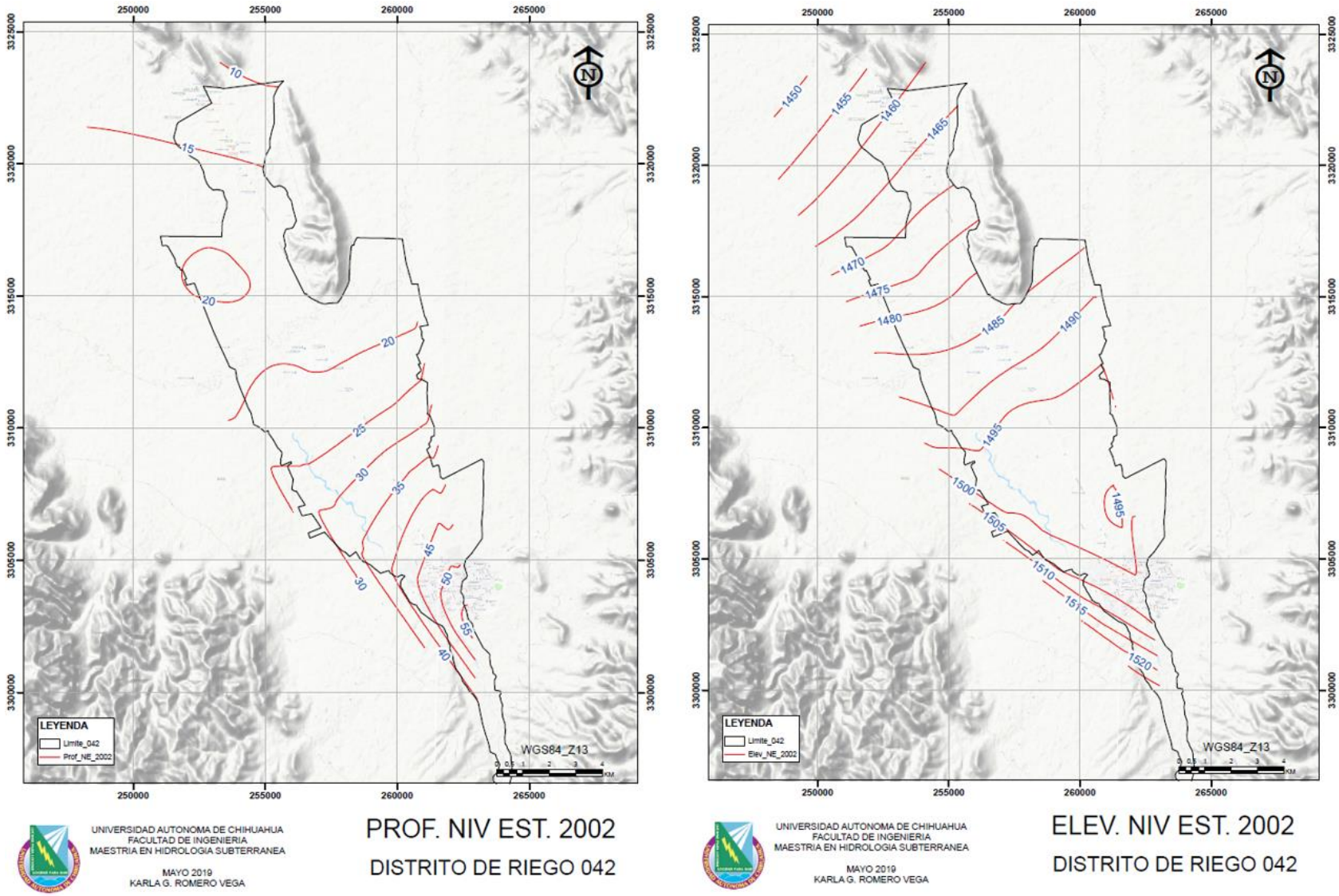


Figura 20. *Izq. Configuración de Nivel Estático en 2002. Der. Configuración de Profundidad de Nivel Estático en 2002*

4.3.3 Piezometría 2004

La última actualización piezométrica de la que se tenga registro se realizó en el año 2004 con la compañía Moro Ingeniería S. C. con el reporte denominado "Actualización de mediciones piezométricas de Acuífero Buenaventura, Chih.", midiendo un total de 46 pozos en el acuífero Buenaventura (figuras 21 y 22).

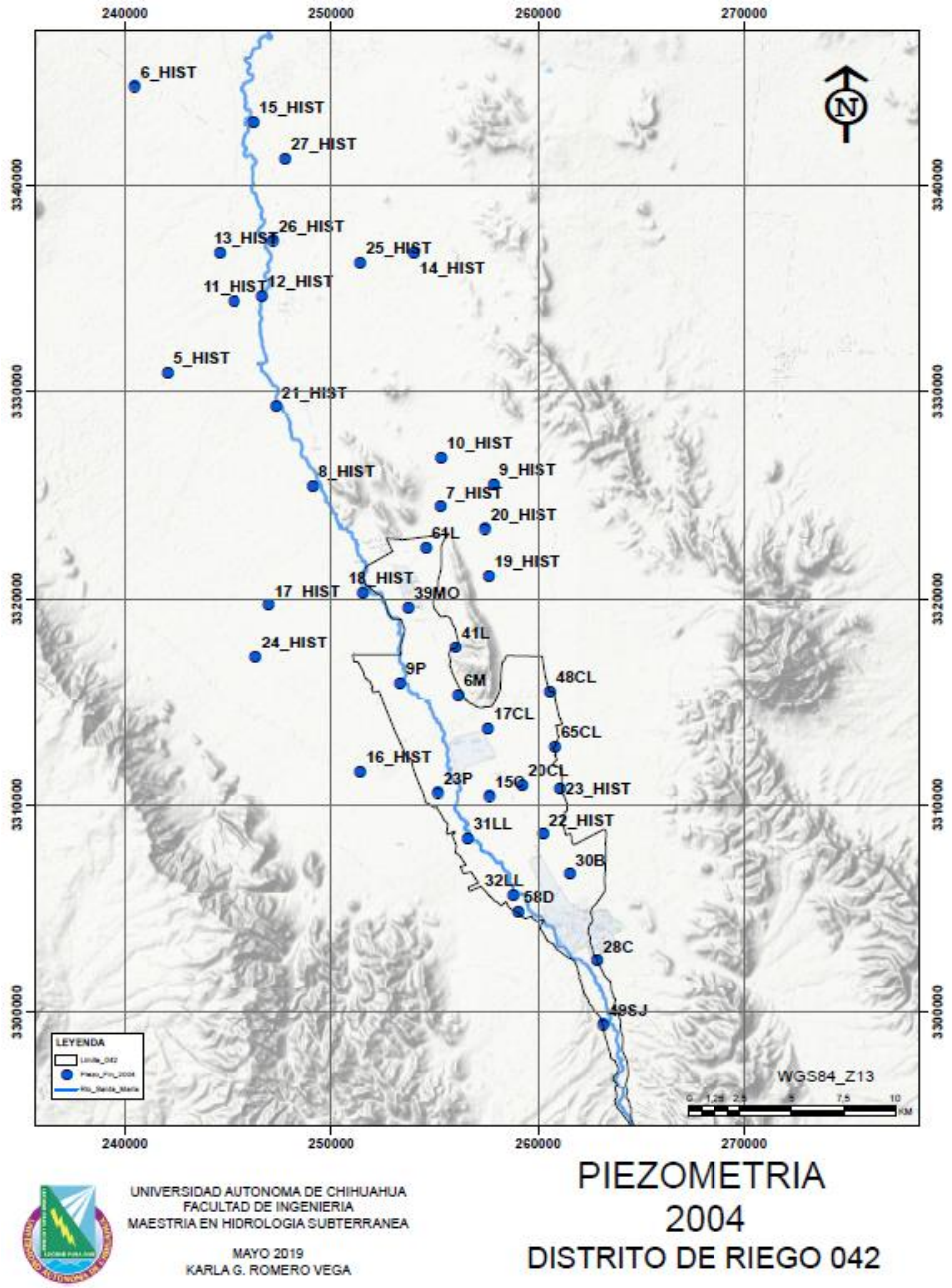


Figura *21*. Pozos con piezometría actualizada el año 2004

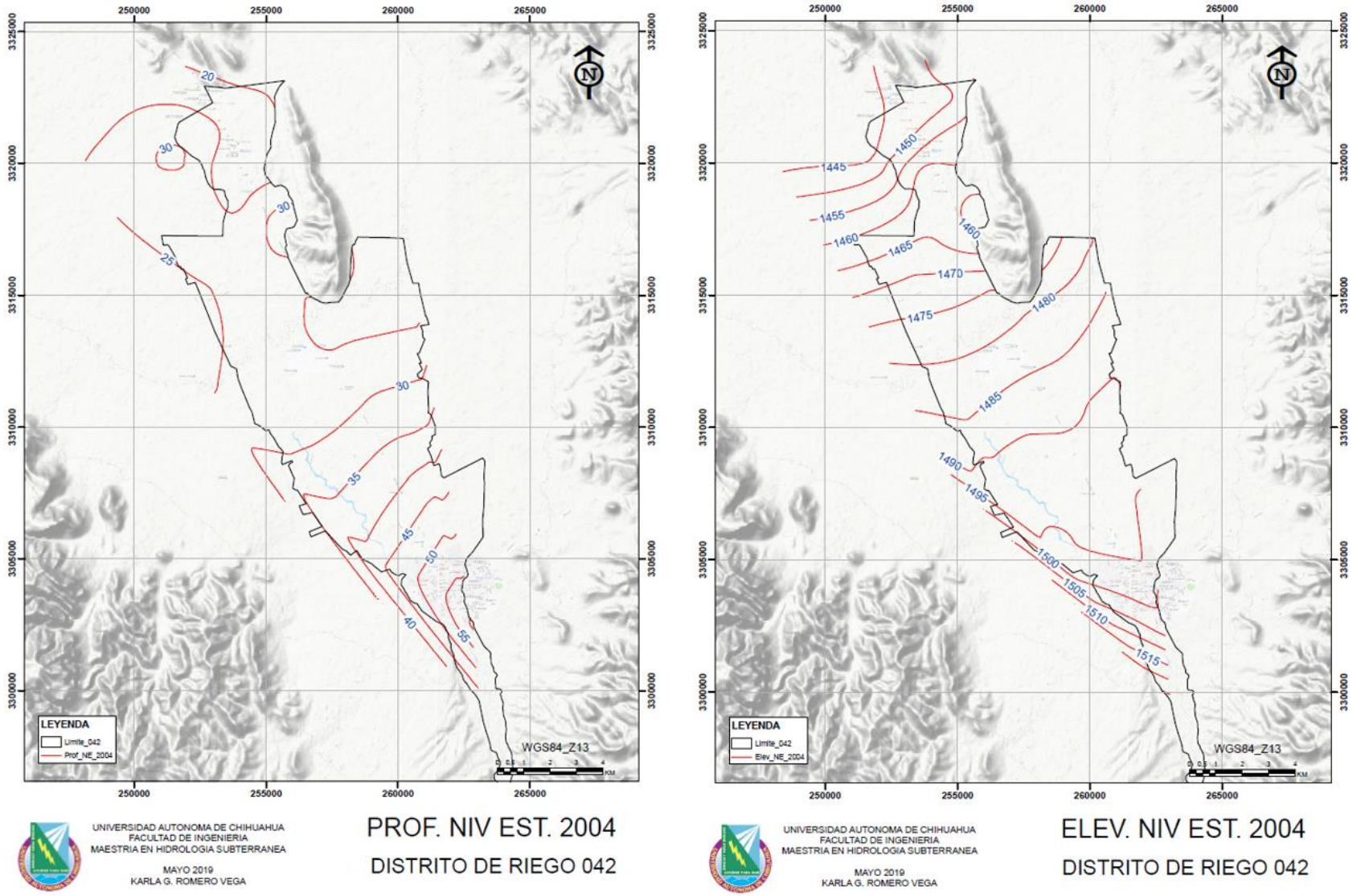


***Figura 22**. Izq. Configuración de Nivel Estático en 2004. Der. Configuración de Profundidad de Nivel Estático en 2004.*

4.3.4 Trabajo de campo

Parte fundamental de la presente investigación es la actualización piezométrica de los pozos que se encuentran dentro del Distrito de Riego 042. En total se recorrieron los 80 pozos del Distrito, en dos campañas de 3 días cada una, durante el mes de enero de 2019. Debido al ciclo agrícola y a los cultivos que se manejan en la región, los pozos dejan de trabajar a mediados del mes de noviembre y se reactivan a las primeras semanas de febrero de cada año, por lo que los pozos en general presentaban poco más de un mes sin bombeo lo que permitió la estabilización del nivel estático.

En la figura 23, se muestran en círculos rojos los 46 aprovechamientos subterráneos a los que les fue posible tomar la medida de nivel estático.

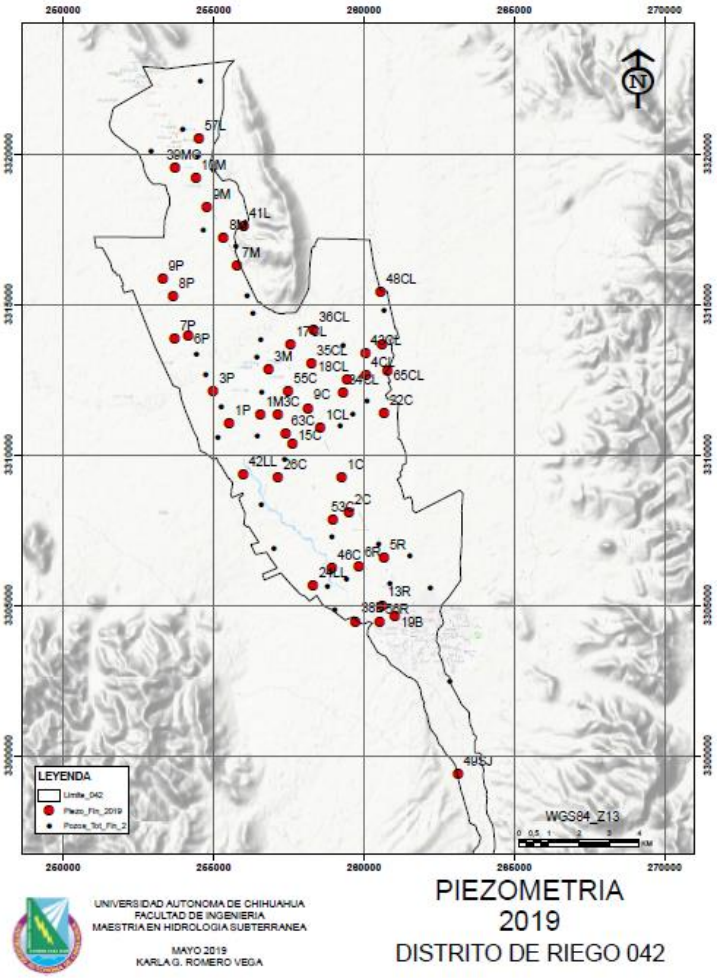


***Figura 23**. Mapa de pozos con actualización piezométrica 2019.*

4.3.5 Materiales y equipo

Para la actualización de niveles estáticos, se requirió:

- Una sonda con contacto eléctrico, previamente calibrada con marcas de longitud con señal auditiva y luminosa.
- Flexómetro 5 m.
- Cinta de aislar.
- Marcador permanente.
- Hojas de registro.

4.3.6 Metodología

1. Se obtuvieron permisos de los propietarios para tener acceso a los pozos. En este punto no se tuvieron problemas ya que todos los pozos visitados se encuentran bajo la administración del Distrito de Riego 042.
2. Se verificó que el pozo se encontrara en reposo de al menos 24 horas. En la mayoría de los aprovechamientos no se encontró problema, ya que la medición se realizó en el mes de enero y estas fechas se encuentran fuera del ciclo agrícola de la región, sin embargo 3 pozos se localizaron encendidos, por lo que no fue posible realizar la medición.
3. Se revisó que el pozo tuviera en condiciones para realizar la medición de nivel estático, principalmente que existiera el orificio para introducir la sonda y que no hubiera impedimentos para realizar la medición.
4. Se insertó la sonda por el orificio del pozo y se bajó el cable hasta que el equipo emitió un sonido al tener contacto con el agua, se revisó la longitud de sonda que ingresó al pozo y se registró en la libreta da campo.

4.4 MUESTRAS DE SUELO ANALIZADAS POR MICROONDAS

Con el objetivo de realizar un análisis general de las características del suelo en el valle y su relación con las cadenas montañosas aledañas se compilaron siete muestras (figura

24), las cuales se enviaron analizar al laboratorio del Servicio Geológico Mexicano (SGM) en la ciudad de Oaxaca, Oax. En su análisis se realizó una digestión de minerales con un calentamiento en microondas. SGM, especifica en los resultados que a la mayoría de las muestras se les realizo el método "30" el cual consiste en una digestión parcial de metales solubles en horno de microondas y el método "32" el cual determina elementos en soluciones, método por espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Además, se utilizó el método "2 A" el cual es un ensaye al fuego/absorción atómica.

4.4.1 Materiales y equipo

Para la toma de muestras de suelo se requirió:

- Bolsas plásticas de alto calibre
- Pala
- Marcador permanente
- GPS Portátil
- Hojas de registro.

4.4.2 Metodología

1. Se marcó la bolsa con el número de muestra y se realizó su registro en la hoja
2. Se encendió el GPS y una vez que se estabilizó, se registraron las coordenadas.
3. Se tomó la muestra de suelo sin roca gruesa y sin material orgánico.

Tabla 4. *Localización de muestras de suelo*

Muestra	Localización	Este	Norte	Z
SBV-001	La Merced	255,270	3,315,542	1,500
SBV-002	Lechuzas	259,991	3,311,750	1,517
SBV-003	Buenaventura	262,176	3,304,802	1,557
SBV-004	La Cuesta	272,533	3,309,795	1,809
SBV-005	La Canaleja	251,425	3,304,660	1,662
SBV-006	Rancho Los Álamos	257,994	3,285,826	1,760
SBV-007	Malpais	258,181	3,315,730	1,504

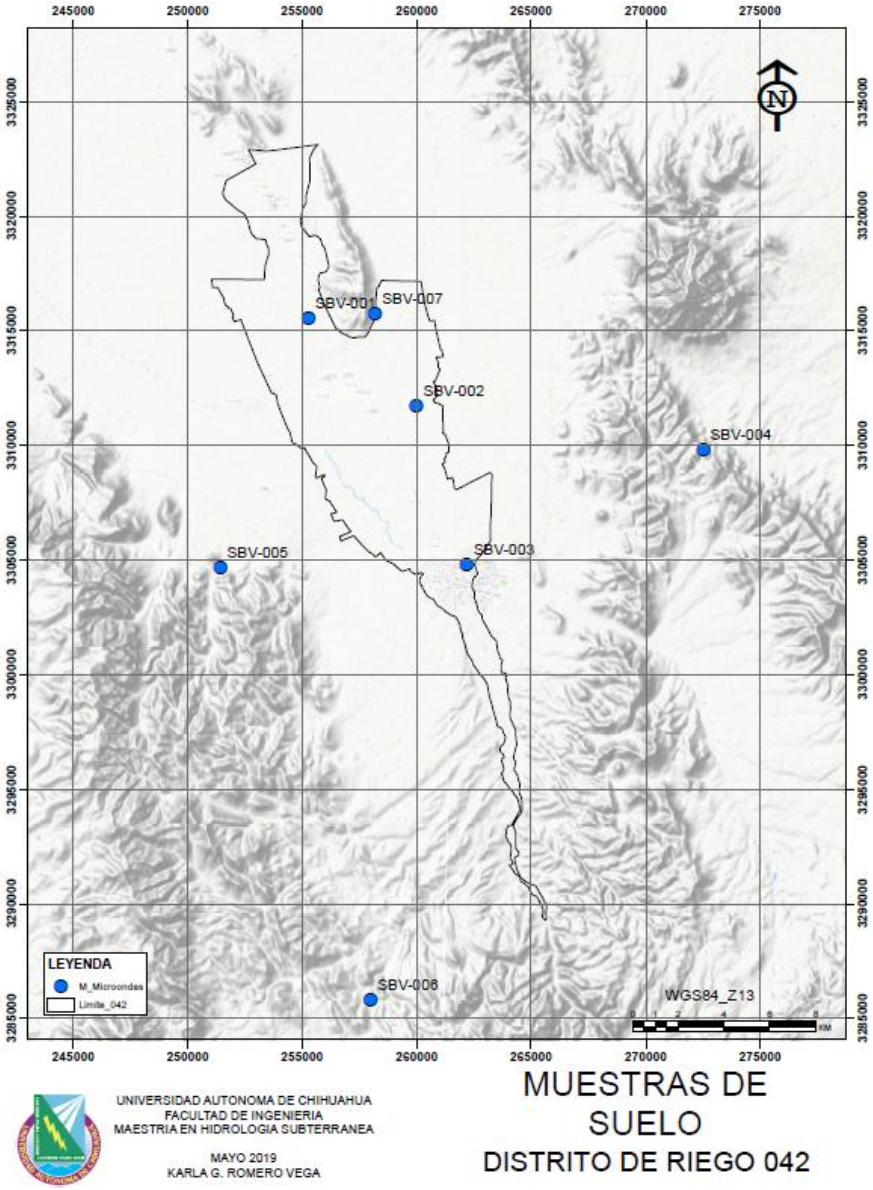


Figura 24. *Mapa de localización de muestras de suelo*

4.5 DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO

Las características hidráulicas del acuífero Buenaventura fueron determinadas con base a la ejecución de 12 pruebas de bombeo de corta duración realizadas en el año de 1974, en las que se obtuvieron valores de transmisividad del orden de $0.22x10^{-3}$ m^2/s a $17.1x10^{-3}$

m^2/s y de otras 6 pruebas de bombeo realizadas en el año de 1981, a través de las cuales se obtuvo una transmisividad promedio del orden de 4.19x10-3 m^2/s (CNA, 2015).

El área del valle es del orden de 1450 km^2, valor obtenido a partir de las configuraciones del nivel estático del año de 1982.

El balance hídrico no es más que la aplicación del principio de la conservación de la masa a cierta región definida por determinadas condiciones de contorno. La ecuación general de balance de acuerdo con la ley de la conservación es:

$$Entradas - Salidas = Cambio\ de\ almacenamiento \quad \text{(Eq. 1)}$$

La recarga natural del acuífero corresponde básicamente al volumen infiltrado por agua de lluvia y recarga horizontal proveniente de las zonas de recarga. La recarga por lluvia es de 25.2 Mm^3/año, al considerar un área de 1,450 km^2, una precipitación promedio de 290 mm/año y un coeficiente de recarga de 0.06. Respecto a la recarga por infiltración de los escurrimientos superficiales naturales no se consideran, ya que el río Santa María, el más importante, presenta solo escurrimientos durante la temporada de lluvias, el volumen que llega a presentarse es captado y aprovechado en zonas agrícolas (CNA, 2015).

El volumen de agua que anualmente retorna al acuífero como consecuencia del riego que se realiza en el área se calculó multiplicando al volumen de agua subterránea aplicada al riego (85.8Mm^3/año), por un coeficiente de infiltración de 0.20, resultando un volumen de recarga de 17.2Mm^3/año. Otra recarga inducida proviene del agua superficial aplicada al riego, en este caso resulta importante tomar en cuenta que los volúmenes distribuidos en el distrito de riego, el cual es de 54Mm^3/año, por un coeficiente de recarga de 0.25, origina una recarga inducida adicional de 13.5Mm^3/año. Y, por último, el uso público urbano origina una recarga al acuífero por pérdida en redes de distribución básicamente, el cual se calculó un coeficiente de 0.20 al volumen usado de 0.9Mm^3/año, resultado da una recarga inducida de 0.2Mm^3/año. (CNA, 2015).

La evapotranspiración, la cual en una porción del acuífero ubicada en la parte norte del acuífero, de aproximadamente 450km^2 de extensión, con niveles estáticos menores a 10m

ocurre un volumen de evaporación del orden de 1.0 Mm^3/año, al considerar una lámina de evaporación potencial de 2.2m/año y por un coeficiente de 0.001 para la evaporación (CNA, Manual para evaluar recursos hidráulicos subterráneos, 1994).

El volumen extraído para el acuífero a través de bombeo, para todos los usos resultó de 86.7 Mm^3/año (CNA, 2015). El acuífero presenta una salida de agua subterránea debida al flujo horizontal por la parte norte y de acuerdo con los datos de transmisividad y a la piezometría de 1982, los volúmenes de salida son del orden de 1.8Mm^3/año (CNA, 2015).

Para el cálculo del cambio de almacenamiento se consideró la variación de los niveles estáticos del orden de 0.6m/año (CNA, 2015), valor que aplicado al área del valle (1,450 km^2), resulta un volumen drenado de 870Mm^3/año, al que aplicado un coeficiente de almacenamiento de 0.02645, resulta un cambio de almacenamiento de -23.0 Mm^2/año.

De acuerdo con la información existente en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), el volumen concesionado de aguas subterráneas para este acuífero tiene un volumen de 130,018.449m^3/año según los datos al 30 de abril de 2002. Por lo tanto, la disponibilidad de aguas subterráneas de acuerdo con los datos anteriores es de -63´518,449 m^3/año por lo que no existe volumen disponible para nuevas concesiones (CNA, 2015). Conforme a la Ley de Aguas Nacionales en el Artículo 22 donde se especifica que la Comisión Nacional del Agua debe publicar y evaluar cada tres años los 653 acuíferos que existen en la República Mexicana, el día 04 de enero de 2018 en su Diario Oficial publicó una actualización de disponibilidad de agua del acuífero Buenaventura con los siguientes datos:

Tabla 5. Disponibilidad de agua 2018, acuífero Buenaventura.

CLAVE	ACUIFERO	R	DNC	VEAS			DMA		
				VCA8	VEALA	VAPTYR	VAPRH	POSITIVA	DEFICIT
804	BUENAVENTURA	66.5	0	131.868	51.317	0	0	0	-116.685

Cifra en millones de metros cúbicos anuales

donde *R:* recarga total media anual; *DNC:* descarga natural comprometida; *VEAS:* volumen de extracción de aguas subterráneas; *VCAS:* volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; *VEALA:* volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente; *VAPTYR:* volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; *VAPRH:* volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica*; DMA:* disponibilidad media anual de agua del subsuelo.

Sin embargo, no se encuentra disponible el documento que avala y desglosa los datos con los que se ha calculado el balance de agua para la obtención de este dato. Sin embargo, se puede observar que en los últimos tres años (de 2015 a 2018) casi se duplico el valor del déficit.

Capítulo 5: Hidrogeoquímica

La geoquímica es la ciencia que estudia los caracteres y el comportamiento en la corteza terrestre de los diferentes elementos químicos, su distribución cuantitativa, sus combinaciones, así como sus migraciones (dispersiones y concentraciones); e intenta explicar estos procesos y trata de hacerlos utilizables (Custodio & Llamas, 1996).

Ésta, es una ciencia relativamente moderna, la cual comenzó a estudiarse a mediados del siglo XIX, pero no empezó su desarrollo hasta principios del siglo XX. Sin embargo, la hidrogeoquímica es mucho más reciente y su interés se incrementó en la segunda mitad del siglo XX. Como pioneros deben considerarse entre otros varios al francés Schöeller, los americanos Palmer, Clarke, Piper, Garrett y Hem y a los rusos Vernadsky, Souline y Barnes (Custodio & Llamas, 1996). Es importante desarrollar un estudio hidrogeoquímico ya que las características químicas de la roca con la que el agua este en contacto afectara directamente su composición iónica.

5.1 BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La primera fase de todo trabajo comprende el estudio bibliográfico y las visitas de reconocimiento en el área de estudio. Como antecedentes de trabajos relacionados en el área se tiene la investigación desarrollada por la M.I. Alba Y. Précoma Mojarro en el año 2007 denominada "*Caracterización hidrogeoquímica y presencia de flúor en la porción noroeste del estado de Chihuahua, México*". Adicionalmente a esta investigación sólo se encontraron resultados de análisis de muestras puntuales realizados por la Junta Central de Agua y Saneamiento del estado de Chihuahua (JCAS), mismos que fueron proporcionados para este estudio por dicha institución.

5.2 MUESTREO DE CAMPO

Con el fin de actualizar, complementar y comparar la información existente sobre el Distrito de Riego 042 se realizó trabajo de campo, con el objetivo de recabar muestras de

agua para su posterior análisis químico. Dicha campaña de muestreo se realizó en un sólo día, tratando de distribuir las muestras por toda el área del Distrito. Se determinaron *in situ* los parámetros de campo y se colectaron las muestras para los análisis de laboratorio. En la Tabla 6 se observan las localidades y características principales de los pozos. El muestreo se realizó el día 13 de mayo de 2018.

5.2.1 Materiales y equipo

Se utilizaron los siguientes materiales:

- Botellas de plástico con tapa hermética y capacidad de un litro
- Guantes de plástico
- Hielera portátil con hielo para transporte y protección de las muestras a una temperatura aproximada de 4^0C
- Marcador permanente
- Etiquetas para marcar las botellas de agua
- Hojas de registro
- Ligas de plástico
- Bolsas de plástico
- Recipiente plástico de boca ancha para la medición de parámetros de campo
- Agua destilada
- Equipo Multiparamétrico marca Hanna, modelo HI 9828 para la medición de pH, Temperatura, Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales

Para la toma de las muestras se siguieron las indicaciones que establece la NOM-230-SSA1-2002. Estando en el pozo seleccionado para la colección de la muestra, se abrió la válvula de desfogue y se dejó correr el agua por al menos 5 minutos (en caso de estar apagado el pozo). En la mayoría de los casos los aprovechamientos subterráneos se encontraban encendidos por lo que no fue necesario realizar este procedimiento.

Tabla 6. *Relación de fuentes de agua subterránea monitoreadas para el estudio hidrogeoquímico 2018.*

Fecha	ID_HGQ	Nombre del Pozo	Tipo Aprovechamiento	Localización	E	N
13-may-18	1	61L	Pozo agrícola	DR_042	254,560.60	3,322,462.50
13-may-18	2	39MO	Pozo agrícola	DR_042	253,731.80	3,319,543.40
13-may-18	3	41L	Pozo agrícola	DR_042	256,015.10	3,317,611.80
13-may-18	4	9P	Pozo agrícola	DR_042	253,323.90	3,315,869.10
13-may-18	5	6M	Pozo agrícola	DR_042	256,118.30	3,315,284.20
13-may-18	6	48CI	Pozo agrícola	DR_042	260,564.30	3,315,451.30
13-may-18	7	17CL	Pozo agrícola	DR_042	257,570.50	3,313,664.00
13-may-18	8	5P	Pozo agrícola	DR_042	254,442.10	3,313,372.50
13-may-18	9	Esc. Col. Quevedo	Público urbano	Col. R. M. Quevedo	256,290.00	3,312,596.00
13-may-18	10	Col. Quevedo	Público urbano	Col. R. M. Quevedo	258,013.00	3,311,769.00
13-may-18	11	65CL	Pozo agrícola	DR_042	260,804.00	3,312,805.50
13-may-18	12	28C	Pozo agrícola	DR_042	262,853.40	3,302,452.40
13-may-18	13	20CL	Pozo agrícola	DR_042	259,218.90	3,310,949.60
13-may-18	14	15C	Pozo agrícola	DR_042	257,632.40	3,310,402.80
13-may-18	15	23P	Pozo agrícola	DR_042	255,147.20	3,310,587.20
13-may-18	16	31LL	Pozo agrícola	DR_042	256,595.40	3,308,338.50
13-may-18	17	JMAS 5	Público urbano	Col. Carbajal	259,010.85	3,308,971.23
13-may-18	18	2C	Pozo agrícola	DR_042	259,519.80	3,308,080.70
13-may-18	19	30B	Pozo agrícola	DR_042	261,526.90	3,306,642.70
13-may-18	20	32LL	Pozo agrícola	DR_042	258,788.90	3,305,630.70
13-may-18	21	19B	Pozo agrícola	DR_042	261,048.40	3,304,622.60
13-may-18	22	JMAS 2	Público urbano	Buenaventura.Carmeño	261,699.74	3,304,274.60
13-may-18	23	JMAS 1	Público urbano	Buenaventura.Chamizal	263,131.10	3,304,773.72
13-may-18	24	JMAS 3	Público urbano	Buenaventura.Villas del sol	263,043.74	3,304,031.98
13-may-18	25	JMAS 4	Público urbano	Buenaventura. Progreso	263,579.39	3,303,473.49
13-may-18	26	22CL	Pozo agrícola	DR_042	260,677.00	3,311,415.30

5.2.2 Metodología

Para colectar las muestras de agua se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. El equipo GPS se encendió y se dejó en un lugar cerca del pozo hasta que se estabilizó; posteriormente se tomó la lectura para el registro de las coordenadas.

2. Se colocaron los guantes para comenzar con la toma de muestra.
3. Se tomó la botella y se identificó con el número de muestra, el cual se escribió con marcador permanente en la botella y en la tapa. La tapa nunca debe quedar expuesta en un lugar donde se pueda contaminar.
4. Se tomó la botella nueva y se llenó con agua corriente del pozo, se descartó el agua y se repitió esta operación otras dos veces.
5. La cuarta vez que se llenó la botella en su totalidad se cerró herméticamente.
6. Se metió la botella dentro de una bolsa y se cerró con las ligas plásticas. Se almacenó en la hielera, hasta terminar de compilar las muestras. Posteriormente se sacaron de la hielera y se guardaron en un refrigerador hasta su entrega al laboratorio. Las muestras nunca deben de estar a más de 4 ^{0}C.
7. En otro recipiente de boca ancha se llenó y se tiró el agua 3 veces, y la cuarta vez se introdujeron los electrodos del equipo portátil multiparamétrico SensIon 1 y SensIon 5 para medición de los siguientes parámetros de campo: pH, temperatura (^{0}C), Conductividad Eléctrica (µS/cm) y Sólidos Disueltos Totales (mg/l). El equipo es muy sencillo de utilizar ya que cuenta con tres electrodos los cuales se lavan con agua destilada y posteriormente se introducen en el recipiente con agua del pozo dejándolos sumergidos unos minutos hasta que las lecturas se estabilizan.
8. Todos los datos obtenidos se registraron en la bitácora de campo.

Las muestras deben tomarse cuidadosamente, evitando que se contaminen, y que la temperatura de las muestras nunca salga del rango de 4-10^{0}C por lo que es necesario almacenar la muestra en la hielera inmediatamente después de ser colectada (figuras 25 y 26).

Figura 25. *Fotografías de toma de muestra en pozo.*

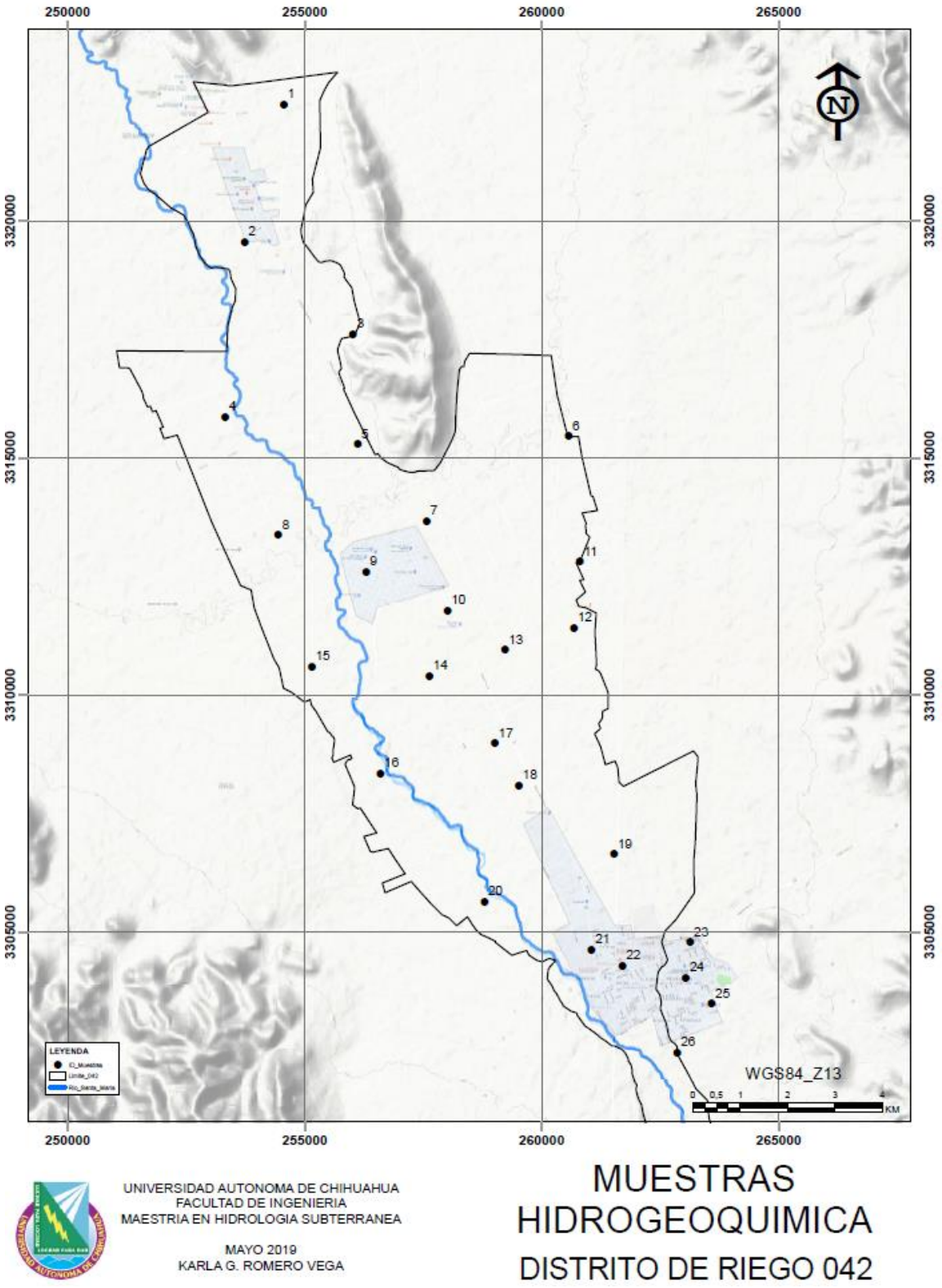


Figura 26. Mapa de localización de puntos de muestreo.

5.3 ANÁLISIS EFECTUADOS

Durante la toma de las muestras, en cada pozo visitado se midieron los parámetros de temperatura (en ^{0}C), potencial de hidrógeno (pH), sólidos disueltos totales (SDT, en unidades de mg/l) y conductividad eléctrica (Ce, en unidades de µS/cm), mediante el empleo del medidor portátil multiparamétrico marca Hanna modelo HI 9828. El resto de los parámetros fueron analizados una vez llevados al laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), a cargo de la Ing. Irma Peralta Segovia.

El procedimiento para la toma de datos en campo consistió en retirar los protectores de los electrodos del equipo e introducirlos en el vaso con la muestra; posteriormente se encendió el equipo, se esperó a que se estabilizaran los parámetros y se tomó la lectura, lo que lleva un tiempo aproximado de 3 minutos.

La caracterización del agua con relación a los otros parámetros de interés hidrogeoquímico se efectuó mediante la determinación de la concentración de los aniones y cationes presentes en cada una de las muestras, para lo que se emplearon distintos métodos de análisis químicos, según el tipo y condición del ion. Las metodologías empleadas se describen a continuación.

5.3.1 pH

El término pH es usado universalmente para referirse a la intensidad de la condición de acidez o alcalinidad de una solución (Sawyer & McCarthy, 1978). Es una propiedad que se expresa con una condición logarítmica. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones (Lopez & Kenneth, 2013). El pH se midió *in situ* con el equipo mencionado, sin embargo, en el laboratorio también se realizó la medición, por lo que se cuenta con dos valores para este parámetro.

5.3.2 Alcalinidad

La alcalinidad del agua puede definirse como la capacidad del agua para neutralizar ácidos, para reaccionar con iones hidrógeno, para aceptar protones o como medida del contenido de sustancias alcalinas (Donado-Garzon, 2000). La determinación de la alcalinidad para las muestras de agua se realizó según lo indicado por la norma mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001. En aguas naturales la alcalinidad es debida generalmente a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos (Donado-Garzon, 2000). Custodio y Llamas (1996) describen que los iones bicarbonato y carbonato proceden de:

- Disolución de CO_2 atmosférico o del suelo.
- Disolución de calizas y dolomías ayudada por el CO_2 y/o ácidos naturales (húmicos, oxidación de sulfuros, etc.).
- Hidrólisis de silicatos ayudada por el CO_2.

5.3.2 Dureza

Se denomina dureza del agua a la concentración de compuestos minerales, en particular magnesio y calcio (Morcillo, 1989). El agua denominada comúnmente como "dura" tiene una elevada concentración de sales de estos iones. La presencia de sales de magnesio y calcio en el agua depende fundamentalmente de las formaciones geológicas con las que el agua está en contacto.

Para realizar el análisis y la determinación de la dureza se utiliza el procedimiento de la NMX-AA-051 SCFI-2001. La dureza total del agua se expresa normalmente como cantidad equivalente de carbonato de calcio y se calcula a partir de la suma de las durezas de calcio y magnesio presentes.

Custodio y Llamas (1996) mencionan que el calcio puede proceder de la disolución de calizas, dolomías, yeso y anhidrita. O bien de:

- Ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos.

- Disolución de cemento calcáreo de muchas rocas.
- Concentración del agua de lluvia.

Por otro lado, también mencionan que el magnesio procede de la disolución de dolomías y calizas dolomíticas, o bien de:

- Ataque de silicatos magnésicos y ferromagnéticos
- Localmente del lavado de rocas evaporativas magnésicas
- Mezcla con agua del mar
- Contaminación industrial y minera

Aunque el magnesio se disuelve más lentamente es más soluble que el Ca y tiende a permanecer en solución cuando éste se precipita. Es afectado por el cambio iónico.

5.3.4 Cloruros

La determinación de cloruros se llevó a cabo según lo descrito en la Norma Mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001. Custodio y Llamas (1996) estipulan que el ion cloruro, es el anión más abundante en el agua del mar, pero puede ser el menos importante de ellos en aguas continentales. El ion cloruro puede proceder de:

- Lavado de terrenos de origen marino; las aguas congénitas y fósiles pueden aportar cantidades importantes.
- Agua de lluvia y su concentración en el terreno.
- Mezcla de agua marina en regiones costeras.
- Ataque de rocas, aunque en general el aporte es pequeño por ser un elemento escaso en la corteza terrestre. Muy localmente tiene interés el aporte de ion cloruro por rocas evaporitas y por el ataque de ciertos minerales asociados a rocas ígneas y metamórficas.
- Mas raramente puede proceder de gases y líquidos asociados a emanaciones volcánicas.
- Los vertidos urbanos e industriales pueden aportar cantidades importantes.

5.3.5 Sulfatos

Los sulfatos son sales solubles en agua, a excepción de los de Pb, Ba y Sr; se hallan profusamente repartidos en todas las aguas (www.xtec.cat, s.f.). Se determinan mediante los procedimientos de la norma NMX-AA-074-2014. La reglamentación técnico-sanitaria mexicana establece como valor máximo tolerable en el agua de consumo la concentración de 400 mg/l. Custodio y Llamas (1996) mencionan que el ion sulfato puede proceder de:

- Lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambiente marino.
- Oxidación de sulfuros de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias.
- Disolución de yeso, anhidrita y terrenos de yesos.
- Concentración en el suelo de agua de lluvia.
- Las actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas pueden aportar cantidades importantes.

5.3.6 Nitratos

El procedimiento para analizar las muestras es según lo indicado a la norma MNX-AA-099-SCFI-2006, donde especifica la determinación de nitrógeno de nitratos en aguas naturales y residuales. La Norma Oficial Mexicana coloca como límite máximo permitirle 10 mg/l, para Nitratos (como N). Según Custodio y Llamas (1996) el ion nitrato puede proceder de:

- Procesos de nitrificación naturales (bacterias nitrificantes), por ejemplo, en las raíces de algunas leguminosas.
- Descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera.
- Abonos agrícolas.
- En pequeña porción del agua de lluvia, muy raramente del lavado de ciertos minerales nitrogenados, emanaciones volcánicas o lavado de suelos antiguos.

5.3.7 Fluoruros

La cuantificación del flúor se hizo conforme a la norma NMX-AA-077-SCFI-2001, La norma oficial mexicana para agua de consumo humano establece como límite máximo permisible 1.5 mg/l de Fluoruros (como F^-).

Algunos artículos han concluido que la fuente de fluoruro al agua subterránea se encuentra en las rocas que conforman el relieve alrededor del área afectada. El fluoruro es liberado al agua subterránea por proceso del intemperismo químico de rocas ígneas intermedias y félsicas (Huizar, Carrillo, & Juarez, 2016). Por otro lado, Précoma Mojarro (2007) concluye en su investigación que el flúor es resultado de las características geológicas, climatológicas, geomorfológicas existentes en correlación con el tiempo, que han generado una contaminación natural como resultado de una interacción roca-agua a la que se ha atribuido como principal fuente de dicha concentración a los yacimientos minerales encontrados en las serranías de las cuencas que conforman los acuíferos de Casas Grandes, Buenaventura, Laguna La Vieja y Flores Magón-Villa Ahumada.

5.3.8 Sodio

El sodio es el elemento más abundante que se encuentra en la litosfera en forma de sales diversas (cloruros, sulfatos, silicatos y feldespatos). Dada la alta solubilidad de las sales de Na, en muchas aguas es el catión más frecuente después del Ca, incluso superando las concentraciones de Mg. La Norma Oficial Mexicana establece como límite máximo permisible 200 mg/l de sodio en el agua para consumo humano. Custodio y Llamas (1996) explican que el sodio puede proceder de:

- El ataque de feldespatos, feldespatoides y otros silicatos.
- Lavado de sedimentos de origen marino y cambio de bases con arcillas del mismo origen.
- Mezcla con agua de mar.
- Localmente de la disolución de sal gema o sulfato sódico natural (sales de evaporitas).

- Raras veces de emanaciones y fenómenos relacionados con proceso magmáticos.
- Contaminación urbana e industrial.
- Concentración del agua de lluvia.

Es muy soluble y es el catión más abundante en el agua del mar. Es muy afectado por el cambio de bases.

5.3.9 Potasio

El potasio es uno de los cationes mayoritarios en aguas naturales, en consonancia con su amplia difusión en la naturaleza bajo forma de cloruro, sulfato, fluoruro y fosfatos, así como en arcillas y micas. Es interesante señalar que el contenido relativo de K a lo largo de un rio suele disminuir a la vez que el de Na se incrementa a consecuencia de la tendencia del potasio a sustituir el sodio contenido en arcillas. Custodio y Llamas (1996) definen que el potasio procede de:

- El ataque de la ortosa y otros silicatos (micas, arcillas, etc.).
- Localmente de la disolución de sales potásicas naturales (silvinita, carnalita, etc.).
- En pequeña cantidad de aportes del agua de lluvia.
- En ocasiones procede de contaminación industrial, minera y agrícola (abonos).

El potasio tiende a ser fijado irreversiblemente por el terreno durante la formación de arcillas por lo que la relación K/Na en agua es mucho menor que 1, excepto en aguas muy diluidas, en las que el valor puede llegar a ser 1.

5.3.10 Arsénico

El arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre; ampliamente distribuido en todo el medio ambiente, está presente en el aire, el agua y la tierra. En su forma inorgánica es muy tóxico (OMS, 2018). La Norma Oficial Mexicana para el agua de bebida establece como límite máximo permisible 0.025 mg/l de arsénico. Los análisis de este elemento se efectuaron de acuerdo con la norma NMX-AA-046-1981.

5.4 ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO

5.4.1 Técnicas hidrogeoquímicas

El análisis de calidad del agua muestra su composición y con ésta se determinan los posibles usos, de acuerdo con las diferentes clasificaciones establecidas en base a los limites oficiales permisibles, ya sea que trate de agua para consumo humano, el riego agrícola o uso en la industria.

Por otra parte, los estudios hidrogeoquímicos aportan información útil para el modelo hidrogeológico conceptual de un acuífero, tal como identificación de zonas de recarga y descarga, dirección del flujo subterráneo, mezclas e interconexiones de agua de diferentes procedencias, origen y tipo de agua subterránea, etc. (CNA, Plan Director. Union de Asociaciones de Usuarios de Aguas Subterraneas del Acuifero Cuahutemoc, Chihuahua, S. R.L. de I.P. de C.V. Mexico, 2007).

Para la caracterización hidrogeoquímica de un acuífero es necesario contar con información de los análisis fisicoquímicos de las muestras obtenidas de fuentes de agua subterránea.

Para el estudio y evaluación de datos derivados de análisis hidrogeoquímicos comúnmente se utiliza una serie de diagramas o gráficos para ayudar a la interpretación y clasificación del agua. La representación gráfica de los datos hidrogeoquímicos constituye una herramienta de trabajo muy eficiente en la interpretación de las propiedades de agua simplificando el manejo y estudio de los análisis químicos. También permite resaltar las relaciones entre los iones de la misma muestra, poniendo de relieve variaciones temporales o espaciales, realizar comparaciones con aguas de calidades diferentes o de distinta fuente, así como clasificarlos en familias, ver con que facilidad el comportamiento y evolución de agua en un territorio determinado a través del tiempo (Fagundo, Gonzalez, & Beato, 2002).

Entre los métodos gráficos más utilizados destacan los diagramas de Collins o barras, Piper, Stiff y Schoeller, los cuales se describen a continuación.

- *Diagrama de Collins:*

Entre las representaciones graficas más comunes, se encuentran los diagramas de concentración iónica, que muestran el contenido de sales y su distribución entre los principales iones, para uno o varios análisis. Uno de los diagramas más utilizados es el propuesto por Collins. El método gráfico en cualquiera de sus versiones es de gran ayuda. Estos diagramas representan el análisis del agua y se han utilizado ampliamente por su sencillez. Mediante estos diagramas se visualizan los principales iones en el agua cuya altura es proporcional a la concentración total de aniones y cationes. La concentración se expresa en meq/L y las columnas se dividen en segmentos que indican las concentraciones de los aniones y cationes que contiene la muestra (Freeze & Cherry, 1979). En una columna se apilan los cationes en el orden Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+} y K^{+}. En la otra se ponen los aniones en el orden CO_3H+CO_3, SO_4, Cl, NO_3.

- *Diagrama de Piper:*

Este procedimiento gráfico es una herramienta efectiva en la segregación analítica de datos para un estudio crítico con respecto a los orígenes de los constituyentes disueltos en aguas, las modificaciones en el carácter de un agua con el paso a través de un área y problemas geoquímicos relacionados (Donado-Garzon, 2000)

Son diagramas triangulares, los cuales son ideales para representar tres componentes. Cada uno de los vértices de un triángulo equilátero representa uno de los componentes con una escala de 0-100% (Freeze & Cherry, 1979). La forma más usual de representar valores es dé % de los valores en meq/l. Es muy útil ya que en un solo diagrama es posible visualizar el universo de muestras.

Diagrama de Stiff:

Al finalizar el diagrama se conforma un polígono, el cual normalmente se situarán sobre un mapa con vista en planta para mostrar la distribución geográfica de la composición

de las aguas. En su forma más sencilla, se generan dibujando tres ejes paralelos con una perpendicular al centro, hacia la izquierda se marcan los cationes y hacia la derecha los aniones. En cada eje se representan los valores en meq/L y se marcan los puntos. Una vez marcados todos los puntos se unen y se conforma un polígono. Estas disposiciones permiten apreciar la variación de las relaciones entre cationes o aniones (Freeze & Cherry, 1979).

Diagrama de Schöeller:

Es un gráfico el cual cuenta con dos ejes; en el eje vertical se asocian los valores numéricos mientras que en el eje horizontal se disponen los iones y cationes que se representa a partir de un origen. Los diferentes puntos obtenidos se unen dando una línea quebrada. Se pueden representar varias muestras simultáneamente, sin embargo, si es un volumen alto de muestras el gráfico tiende a ser poco práctico (Freeze & Cherry, 1979).

5.4.2 Aplicación de técnicas hidrogeoquímicas

Después de obtener los resultados de análisis de calidad del agua se aplicaron algunas técnicas hidrogeoquímicas consistentes en la representación gráfica, diagramas y mapas hidrogeoquímicos.

Una vez determinados los análisis fisicoquímicos se integró la información generada una hoja de cálculo y se elaboraron una serie de mapas con el software ArcMap con la finalidad de apreciar la distribución de los diferentes parámetros medidos.

Con ayuda del software Geochemist´s Workbenchs (GWB 12), con una licencia gratuita de estudiante, se realizaron los diagramas de Piper, Stiff, Schöeller y de Collins.

Capítulo 6: Discusión de Resultados

El Distrito de Riego 042, presenta una presenta una forma alargada con rumbo general SE-NW que se extiende a lo largo del valle y a las riberas del Rio Santa María, debido a esta principal característica geomorfológica y a la agricultura que se desarrolla en la zona (principal actividad económica) la pendiente media del área de estudio es muy pequeña. Con todos los antecedentes descritos anteriormente, en este capítulo se presentarán y discutirán los resultados obtenidos de los trabajos y análisis realizados en la tesis.

6.1 GEOFÍSICA

Una vez elaborados los 15 SEV´s se digitalizaron en una hoja de cálculo para desarrollar con mayor practicidad los posteriores procesos. Los datos obtenidos en campo se muestran en la Tabla 7.

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó un rango de resistividades, basado en conocimientos previos y experiencia de los suelos y las resistividades analizadas en diferentes áreas del estado de Chihuahua. Los rangos definidos para las capas trabajadas se muestran en la Tabla 8. En dicha tabla muestra los datos arrojados por el software IPI2Win y resaltados por colores según su rango de resistividad. Una vez definidas las capas se realizó el perfil topográfico de cada uno de los sondeos en el software AutoCAD.

Los datos obtenidos en campo se capturaron nuevamente en Excel para ser procesados. Posteriormente fueron analizados con un software libre denominado IPI2win (Lite). El cual está diseñado para la interpretación automática o semiautomática de datos de sondeo eléctrico vertical. IPI2Win está diseñado para la interpretación en 1 dimensión de curvas de SEV a lo largo de un perfil (Universidad Estatal de Moscú, 2000).

Tabla 7. *Datos geoeléctricos obtenidos en campo*

		x	253657	255896	258692	262174	258929	260064	260758	259948	259191	257877	261599	258001	257283	255112	253266
		y	3319494	3315951	3311972	3304801	3310126	3308079	3305548	3311854	3315260	3309017	3307290	3305570	3307742	3311948	3316059
		z	1482	1499		1562		1534	1541	1520	1504	1524	1532	1532	1523	1509	1494
		No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Estación	**AB/2**	**MN/2**	**Mata Ortiz**	**La Merced**	**Sec17**	**Buenav.**	**M Galache**	**Teconichis**	**B Flores**	**Lechuzas**	**Malpais**	**Carbajal**	**JLRM**	**I.Vega**	**PrietS**	**Priet2**	**PrietN**
1	**1.6**	**0.32**	134.8	142.7	85.36	37.44	56.81	157.5	17.1	159.3	178.81	93.68	48.82	88.39	43.87	52.7	106.9
2	**2**	**0.32**	132.3	132.5	92.51	38.84	61.13	175	19.9	168	191.9	110.5	52.5	100.3	48.87	54.3	122.1
3	**2.5**	**0.32**	129.7	123.2	102.5	42.16	70.37	192.9	24.39	166.5	200.4	134.1	62.56	107.7	55.52	61.31	129.8
4	**3.2**	**0.32**	135.6	141.5	98.65	46.1	87.88	220.5	32.08	164.5	202.2	156.8	76.04	115.9	62.8	72.22	111.3
5	**4**	**0.32**	140.8	147.2	125.9	53.57	106.9	237.4	39.97	157.8	204.2	176.5	90.41	119.3	71.89	85.16	130.7
6.1	**5**	**0.32**	134	157.4	135.1	61.65	127.8	243.6	49.37	150.8	203.6	197.5	107.8	123.5	77.32	100.5	163.5
6.2	**5**	**1**	120.1	135.9	124.2	56.91	112.1	228.7	46.68	134.5	163.4	161.1	89.79	131.7	69.8	84.84	129.2
7.2	**6.3**	**1**		128.6	129.8	61.33	129.4	221.5	56.16	116.8	151.1	176.1	103	128.7	74.17	96.57	148.1
7.1	**6.3**	**0.32**		148.7	142.3	67.84	149.4	267.6	62.97	130.8	185.6	216.7	122.9	143.6	81.76	115.2	186.3
8	**8**	**1**	95.81	119.4	129.5	69.22	140.4	201.9	65.17	99.44	135.8	174.4	104.5	171.3	77.16	108.6	163.7
9	**10**	**1**	82.37	106.3	122.1	73.91	130.3	169.1	71.5	78.57	122.8	164.8	103.2	88.39	81.03	112.6	169.8
10	**13**	**1**	68.67	90.4	113.2	82.28	102.3	131.4	76.92	61.8	100.8	133	89.89	63.12	81.7	115.6	153.3
11.1	**16**	**1**	59.77	78.09	100.5	90.1	80.05	102.5	74.95	51.26	84.32	101.2	78.48	43.93	80.4	112.9	172.7
11.2	**16**	**3.2**	64.06	82.16	111	89.6		114.5	72.22	56.87	85.11	105.4	81.81	41.9	84.06	114.5	222.7
12.2	**20**	**3.2**	54.81	69.01	99.32	98.23	59.27	81	70.52	49.31	74.7	81.8	66.14	25.75	83.03	103.5	126.1
12.1	**20**	**1**	51.15	71.38	89.37	99.42	59.17	75.75	71.23	44.38	75.02	79.04	63.39	26.58	75.12	101.7	102.9
13	**25**	**3.2**	49.02	59.61	88.21	96.41	49.16	61.97	67.65	44.94	68.16	65.43	54.28	18.56	74.59	86.68	107.2
14	**32**	**3.2**	42.28	45.96	66.38	87.66	41.21	51.59	60.77		65.7	50.71	47.48	14.19	66.31	65.6	80.56
15	**40**	**3.2**	40.1	36.46	57.27		40.04	48.46	55.64		60.13	41.3	41.85	14.22	51.37	50.68	68.48
16.1	**50**	**3.2**	39.71	29.37	53.8		38.47	46.92	52.44		59.39	36.83	38.3	13.57	38.89	44.36	57.66
16.2	**50**	**10**	37.32	29.14	52.24		40.1	46.71	53.97		53.49	34.46	41.53	12.66	42.34	46.63	48.99
17.2	**63**	**10**	33.6	23.37	47.98		39	46.18			49.42	31.79	41.7	13.17	32.94	40.91	40.61
17.1	**63**	**3.2**	30.56	31.45	57.21		36.34	47.23			52.17	32.8	38.38	14.93	26.47	38.15	52.39
18	**80**	**10**	28.98	21.53	45.84		37.69	46.48			65.28	25.52	41.5	14.48	22	32.62	34.99
19	**100**	**10**	25.45	22.35							37.11	23.43	46.74	16.63	18.88	29.49	34.41
20	**130**	**10**	21.53	24.85							31.9	20.87	59.54	19.39	17.04	26.28	32.55
21.1	**160**	**10**	18.84	27.72							34.91	15.38	66.94	21.77	18.02	21.63	30.11
21.2	**160**	**32**	23.23	26.39							31.94	20.98	58.02	23.95	17.77	23.44	31.97
22.2	**200**	**32**	20.94	27.21							13.97	17.15	55.33		24.23	20.27	38.38
22.1	**200**	**10**	18.97	38.28							44.87	22.47	60.58		9.35	18.4	30.74

El software es muy amigable y sencillo de utilizar, y existen varios manuales en español disponibles en la red para el uso de este; también se pueden encontrar videos tutoriales que te llevan paso a paso para descubrir los alcances del programa (figuras 27 a 30).

Al abrir el IPI2Win Lite abre una ventana donde lo primero que se debe de hacer es dar clic en el icono de nuevo para ingresar los datos obtenidos en campo y aparecerá la siguiente ventana. Se elige el tipo de arreglo con el que se trabajó, que para esta investigación fue el arreglo Schlumberger. En la parte izquierda de la ventana es una tabla de datos de campo, donde cada línea representa un valor separación de los electrodos de corriente. Las columnas de la tabla son: separación (columna AB/2), longitudes de línea de medición (MN), potencial espontaneo (SP), voltaje (U), corriente (I), coeficiente (K), resistividad aparente (*Ro_a*). Las separaciones y las longitudes de las líneas de corriente deben ser tecleadas en la celda correspondiente de la tabla, sin embargo, también se pueden copiar por columna de Excel y pegar, y se copiaran los valores que ya se tienen digitalizados. De igual manera es necesario introducir los datos *Ro_a* (resistividad aparente) obtenidos en campo.

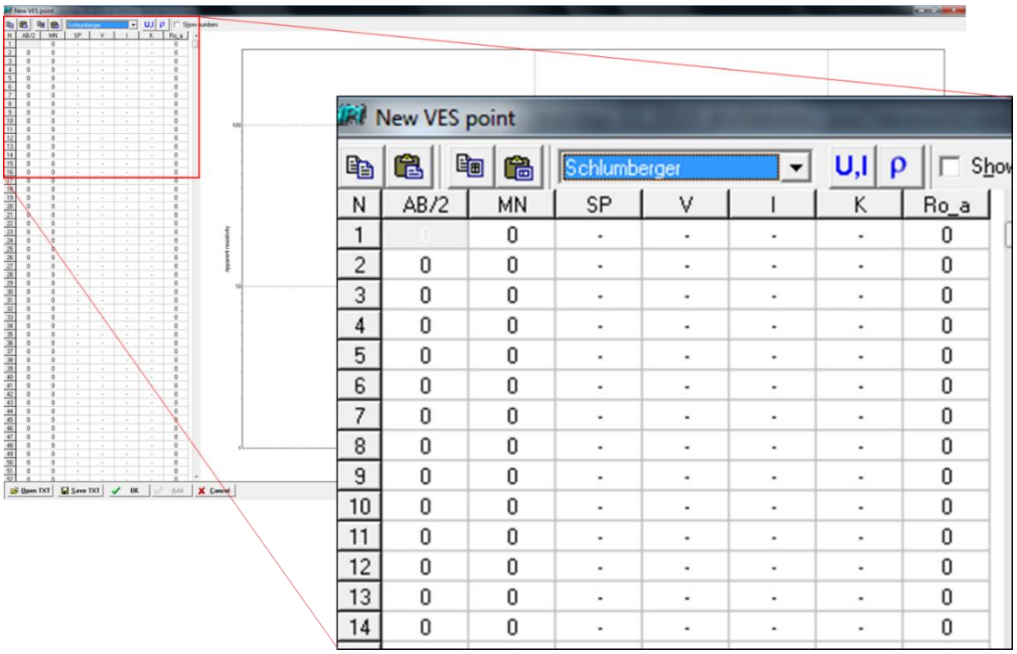


Figura 27. *Pantalla de IPI2Win para comenzar a procesar los datos de campo.*

Una vez capturados los datos en la parte derecha de la pantalla se graficarán los puntos con la resistividad aparente vs el espaciamiento.

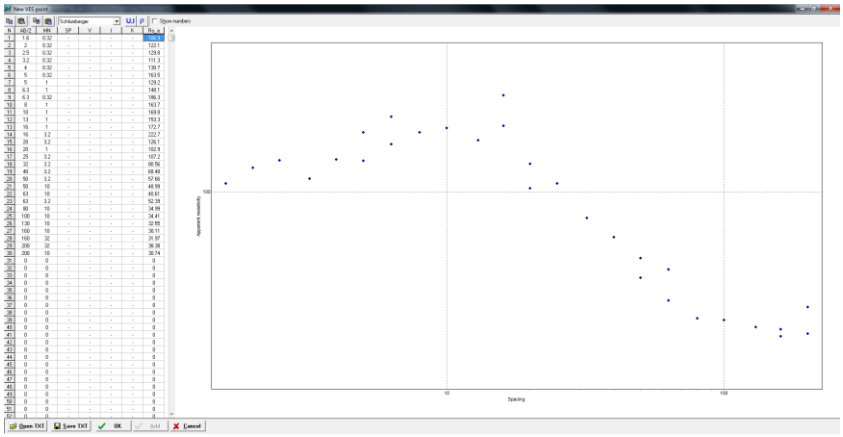


Figura 28. *Ventana de IPI2Win visualizando datos en la tabla inicial.*

Esta información es posible guardarla en formato .txt, lo que le permitirá trabajar con esa información en futuras ocasiones de manera más práctica. Después de todos los datos han sido introducidos, seleccionar el botón "*Add*" de la ventana para añadir la curva del archivo analizado o seleccionar el botón "*OK*" de la ventana para comenzar la creación de un nuevo archivo de datos. En cualquier caso, la ventana "*Save as*…" será desplegada, donde tiene que proporcionar el nombre del archivo en la ventana "*File name*", para generar un respaldo de su información.

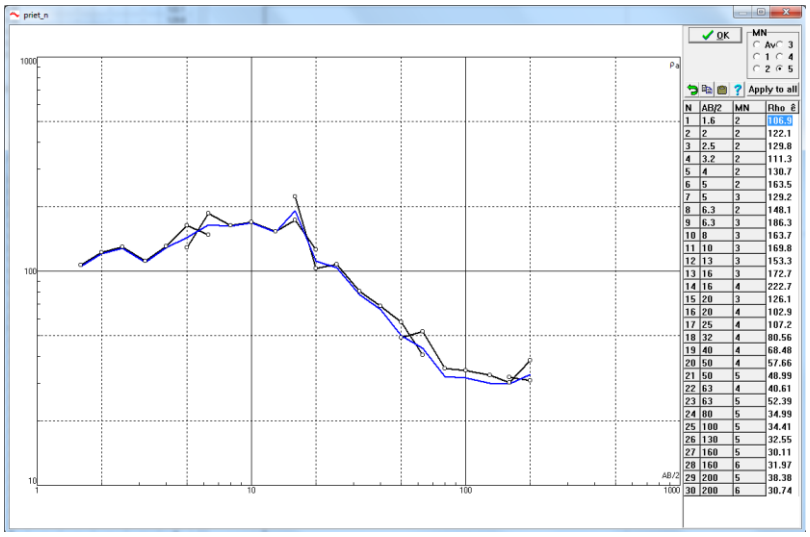


Figura 29*.Ventana de curva de sondeo y datos de campo.*

La curva de sondeo para cierto punto es desplegada en la ventana de la curva intitulada con el nombre del punto de sondeo. En nombre del punto de sondeo es duplicado en el campo "*Name of VES location*" en la línea inmediatamente debajo de la barra de tareas. Sol una curva puede ser desplegada al mismo tiempo. La posición del punto de sondeo sobre el perfil es marcada por una línea vertical sobre la sección en la ventana de la sección vertical.

Los valores de campo de la resistividad aparente son marcados por círculos. La curva se presenta por una línea negra, la cual es el resultado del suavizamiento de los valores de campo por el método s*pline*. La curva es ploteada en escala logarítmica tanto para el eje de las separaciones como para el eje de los valores de resistividad aparente. El rango de los valores en los ejes es determinado automáticamente de manera tal que la escala de la curva puede variar para diferentes puntos de sondeo.

La sección de resistividad aparente y/o resistividad interpretada son desplegadas en la ventana, ambas con igual escala horizontal. La regla horizontal superior representa los nombres de los sondeos mientras que la inferior las coordenadas de los puntos de sondeos. La línea vertical marca el punto de sondeo para el cual se despliega la curva en la ventana.

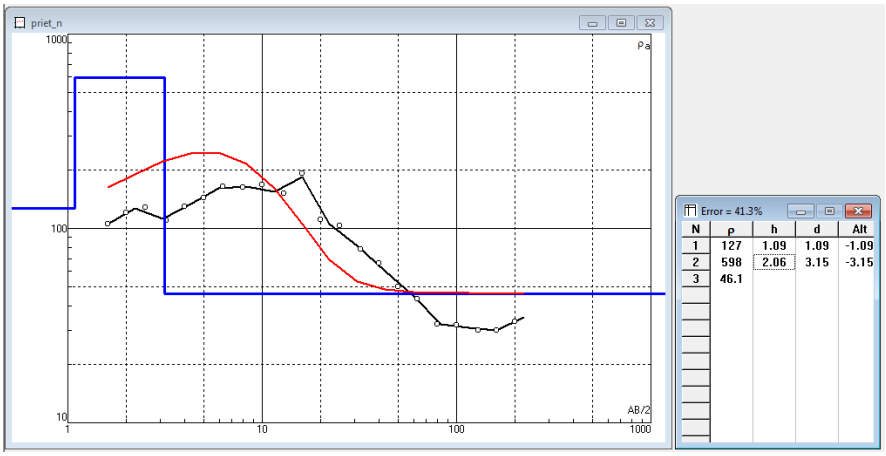


Figura 30. *Ventana de curvas visualizando secciones verticales.*

Posteriormente se trabaja con los datos obtenidos en la tabla anterior y se dibujan los perfiles en AutoCAD (figuras 31 a 33). A continuación, se muestra una representación de los 15 SEVs que se realizaron en forma de columna, esto con la finalidad de ver el resultado de manera gráfica.

***Tabla 8**. Tabla con información sobre la interpretación geofísica*

LUGAR	No_Capa	p	h	d	Alt
Mata Ortiz	1	121	5	5	-5
	2	41.2	34.3	39.3	-39.3
	3	18.5			
Prieteña N	1	102	2.6	2.6	-2.6
	2	472	2.3	4.9	-4.9
	3	82.8	12.9	17.8	-17.8
	4	30.7			
La Merced	1	167	1.9	1.9	-1.9
	2	448	0.9	2.8	-2.8
	3	90.4	13.4	16.2	-16.2
	4	20.8	104	120.2	-120
	5	222			
Malpais	1	190	1	1	-1
	2	534	1.2	2.3	-2.3
	3	92.7	11.3	13.6	-13.6
	4	63.5	74.6	88.2	-88.2
	5	0.2			
Prieteña 2	1	107	2.8	2.8	-2.8
	2	531	2.6	5.4	-5.4
	3	51.2	32.4	37.8	-37.8
	4	10.9	28.9	66.7	-66.7
	5	56.3			
Secundaria 17	1	70.8	1.1	1.1	-1.1
	2	264	1.4	2.5	-2.5
	3	114	9.4	11.9	-11.9
	4	42.8			
Lechuzas	1	142	1	1	-1
	2	268	1.3	2.3	-2.3
	3	69.3	3.1	5.3	-5.3
	4	40			

LUGAR	No_Capa	p	h	d	Alt
Mirna G	1	30	0.8	0.8	-0.8
	2	1,023	0.9	1.7	-1.7
	3	8.9	3	4.7	-4.7
	4	41			
El Carbajal	1	53.3	0.6	0.6	-0.6
	2	968	1.5	2.1	-2.1
	3	54.5	28.7	30.8	-30.8
	4	20.7			
Prieteña S	1	43.8	1.4	1.4	-1.4
	2	193	6.6	8	-8
	3	34.2	65.6	73.6	-73.6
	4	12.5			
Teconichis	1	127	1.1	1.1	-1.1
	2	598	2.1	3.2	-3.2
	3	46.1			
Jose L. Romero	1	33.3	1.2	1.2	-1.2
	2	644	1.1	2.3	-2.3
	3	32.3	51	53.3	-53.3
	4	281	41.8	95.1	-95.1
	5	4			
Ignacio Vega	1	83.1	1	1	-1
	2	302	2.6	3.6	-3.6
	3	13.8	75.1	78.7	-78.7
	4	95.1			
B. Flores	1	8.7	0.7	0.7	-0.7
	2	820	1.3	2.1	-2.1
	3	13.3	6.5	8.5	-8.5
	4	68			
Buenaventura	1	29.7	1	1	-1
	2	70.3	5.3	6.3	-6.3
	3	236	9.7	16	-16
	4	2.5			

DESCRIPCION DE MATERIAL	RANGO DE CONDUCTIVIDAD	
ARCILLA	0	15
LIMOS	15	30
ARENA	30	60
ARENA-GRAVA*	60	120
CONGLOMERADO	120	400
RX	400	700
RX-A	>700	

* Puede ser material muy consolidado

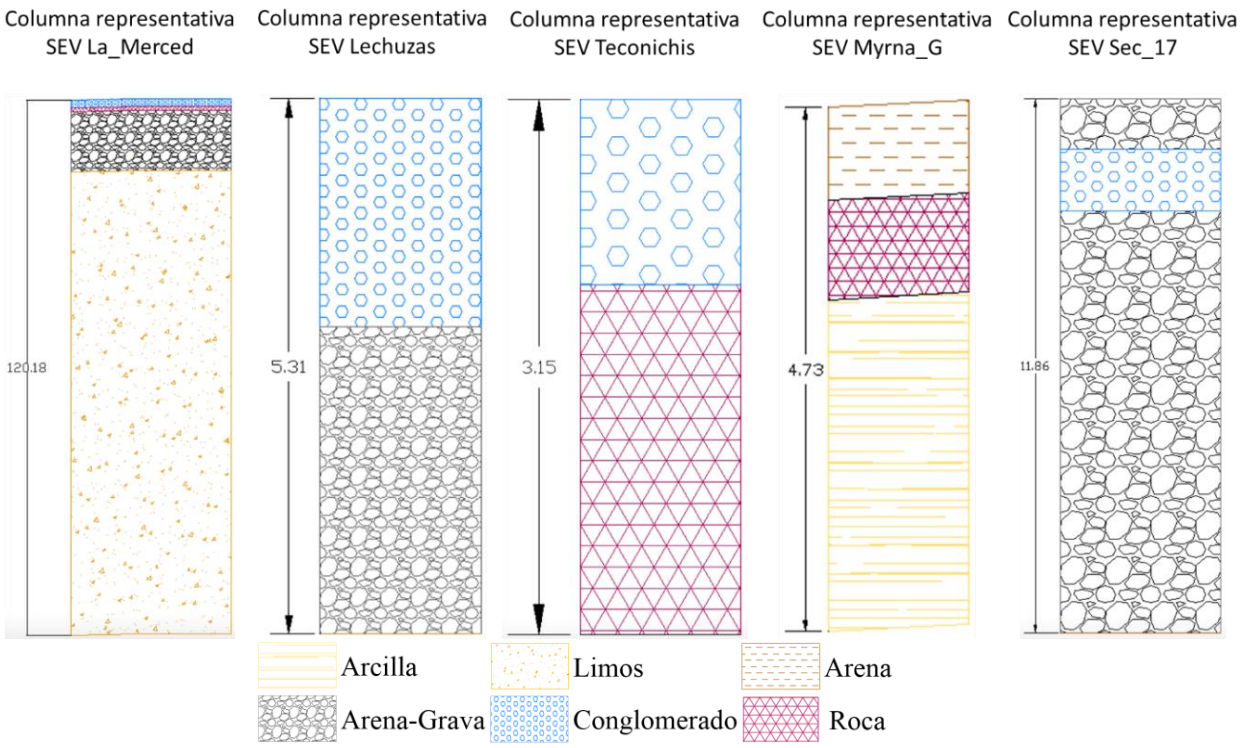


Figura 31. *Representación gráfica de SEV. Parte 1*

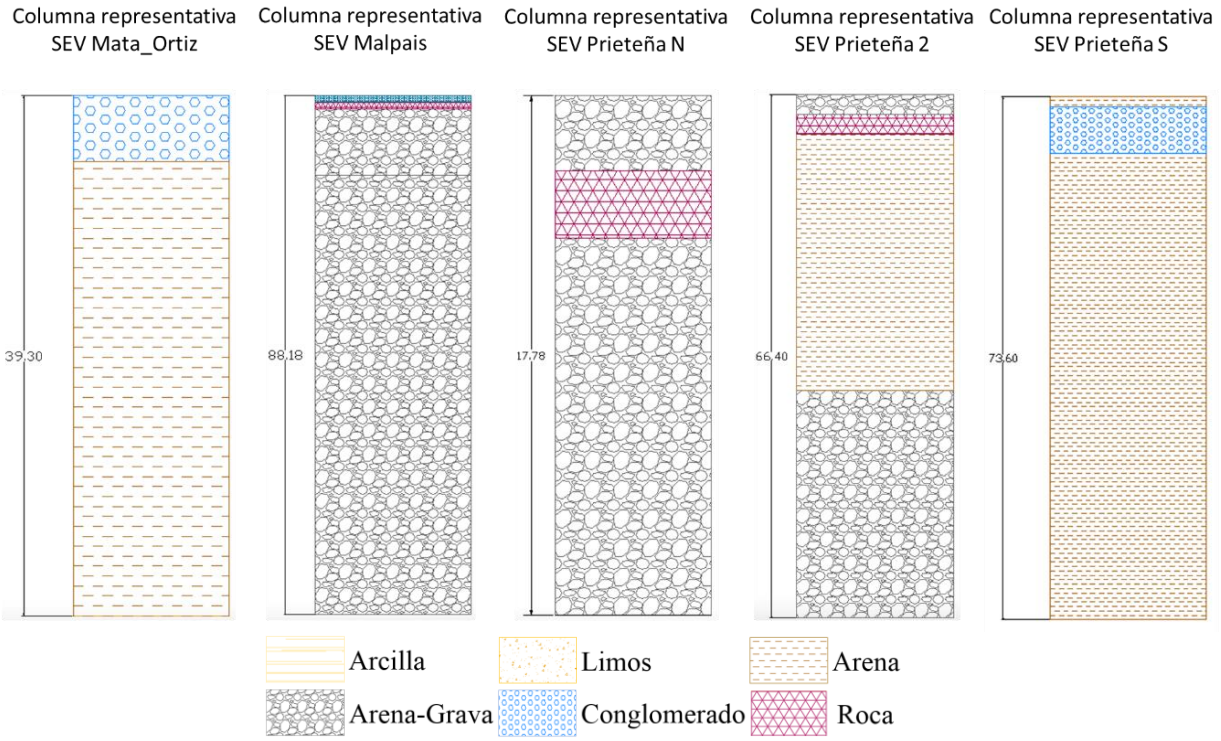


Figura 32*. Representación gráfica de SEV. Parte 2*

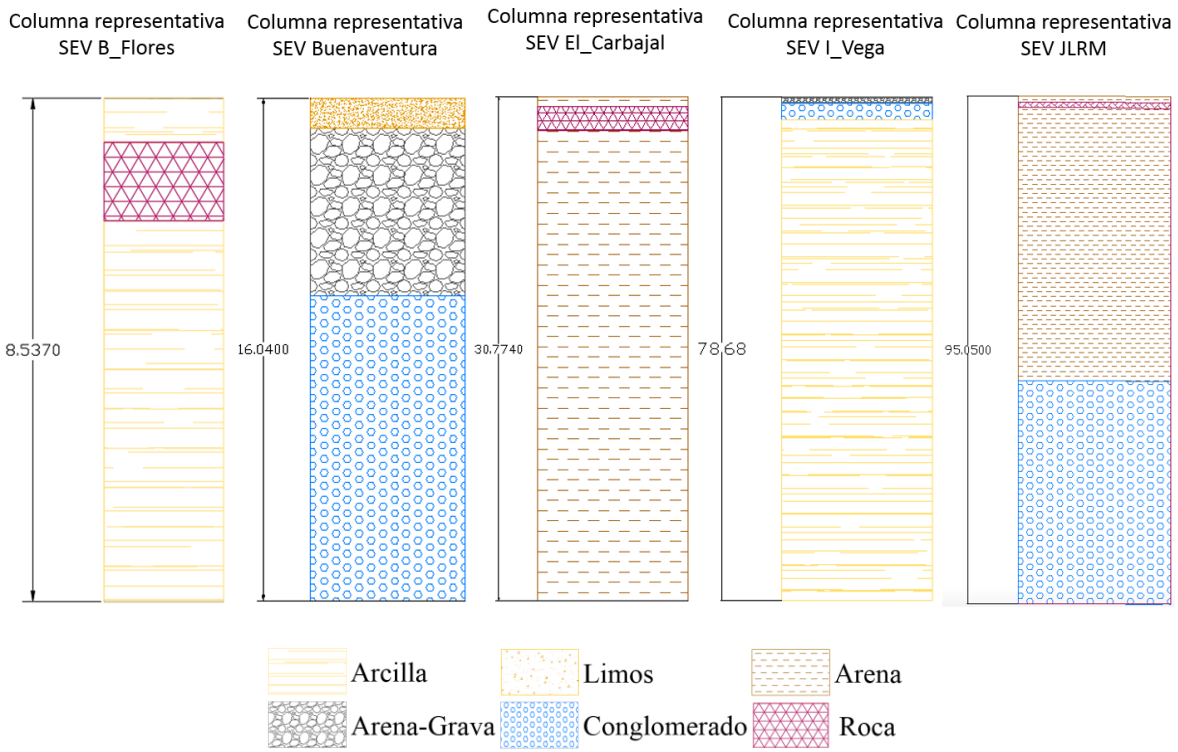


Figura 33. *Representación gráfica de SEV. Parte 3*

Es importante considerar que las representaciones graficas de los SEV´s se realizó a similar escala con fines de visualización, sin embargo, cada sondeo vertical ingreso distintas profundidades, las cuales se especifican en la tabla anterior y/o a la izquierda de cada dibujo (figuras 31 a 33).

Analizando la geología de la zona y la Carta Geológica realizada por el Servicio Geológico mexicano (Carta H13-7, escala 1:250,000), se ve que no existen secciones que describan la zona a profundidad, sin embargo, a poco más de 20 km al SE de distancia de San Buenaventura (figura 34), realizaron un perfil geológico, el cual basados en la geología cartografiada en superficie, puede servir de referencia para corroborar la hipótesis de por qué se manejaron tres unidades geohidrológicas.

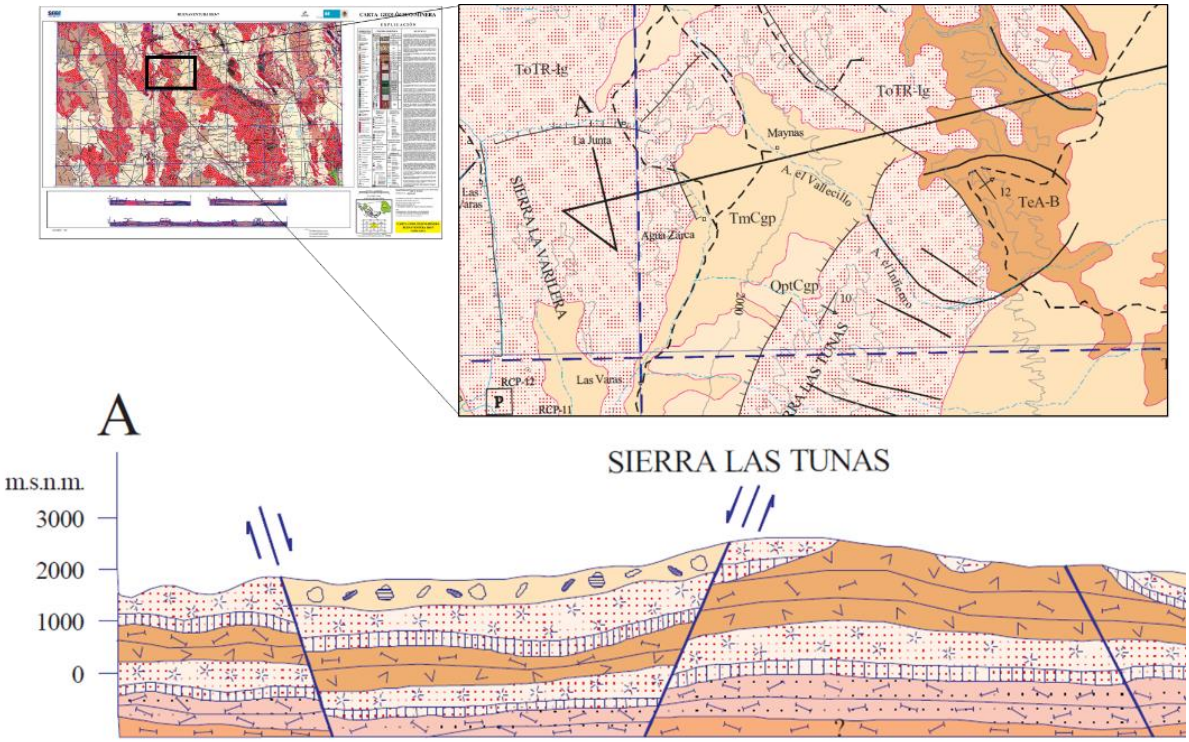


***Figura 34**. Sección trunca realizada por el SGM a 20km SE del área de estudio*

Este perfil, describe que, a pesar de mostrar varios estratos litológicos, todos son estratos resientes de no más de 45 millones de años, principalmente Aluvión del Cuaternario, Tobas andesíticas-riolíticas y conglomerados policíclicos, lo que nos describe rocas de composición variada, de textura granular, rocas ígneas ya descritas anteriormente y sedimentos sin consolidar, ideales para el desarrollo de la agricultura.

Basado en todo lo descrito anteriormente se interpreta agrupando tres Unidades Geoeléctricas (Tabla 9 y figura 36):

1. Suelo granular. Se utilizan rangos de resistividad entre 0 y 120 ohm*metro. Englobando material o suelos predominantemente granulares y que pudieran presentar mayor conductividad hidráulica debido a los intersticios vacíos que pueden quedar en ellos debido al acomodo en el suelo.
2. Suelo semi compacto. Se considera únicamente el conglomerado, con rango de resistividad de 120-400 ohm*metro. El conglomerado se caracteriza por ser una roca producto de la fragmentación de otras rocas, relacionadas directamente con erosión, transporte e intemperismo, por lo cual un conglomerado puede presentar una matriz

o cementante que oponga mayor resistencia para ceder y/o almacenar agua en sus poros.

3. Suelo compacto o roca. Se consideran que son las rocas más antiguas de la región, o el llamado basamento, se presume podrían ser rocas ígneas, las cuales a pesar de tener una menor porosidad efectiva es posible presenten fracturas, lo cual ayuda a otorgar a los pozos de extracción. El rango de resistividades otorgadas para esta unidad geohidrológica fue mayor a 400 ohm*metro.

Tabla 9. *Unidades Geoeléctricas identificadas para la zona de estudio*

DESCRIPCION DE MATERIAL	RANGO DE CONDUCTIVIDAD		UNIDAD GEOELÉCTRICA
ARCILLA	0	15	1 (Beige)
LIMOS	15	30	
ARENA	30	60	
ARENA-GRAVA*	60	120	
CONGLOMERADO	120	400	2 (Rosa)
RX	400	700	3 (Azul)
RX-A	>700		

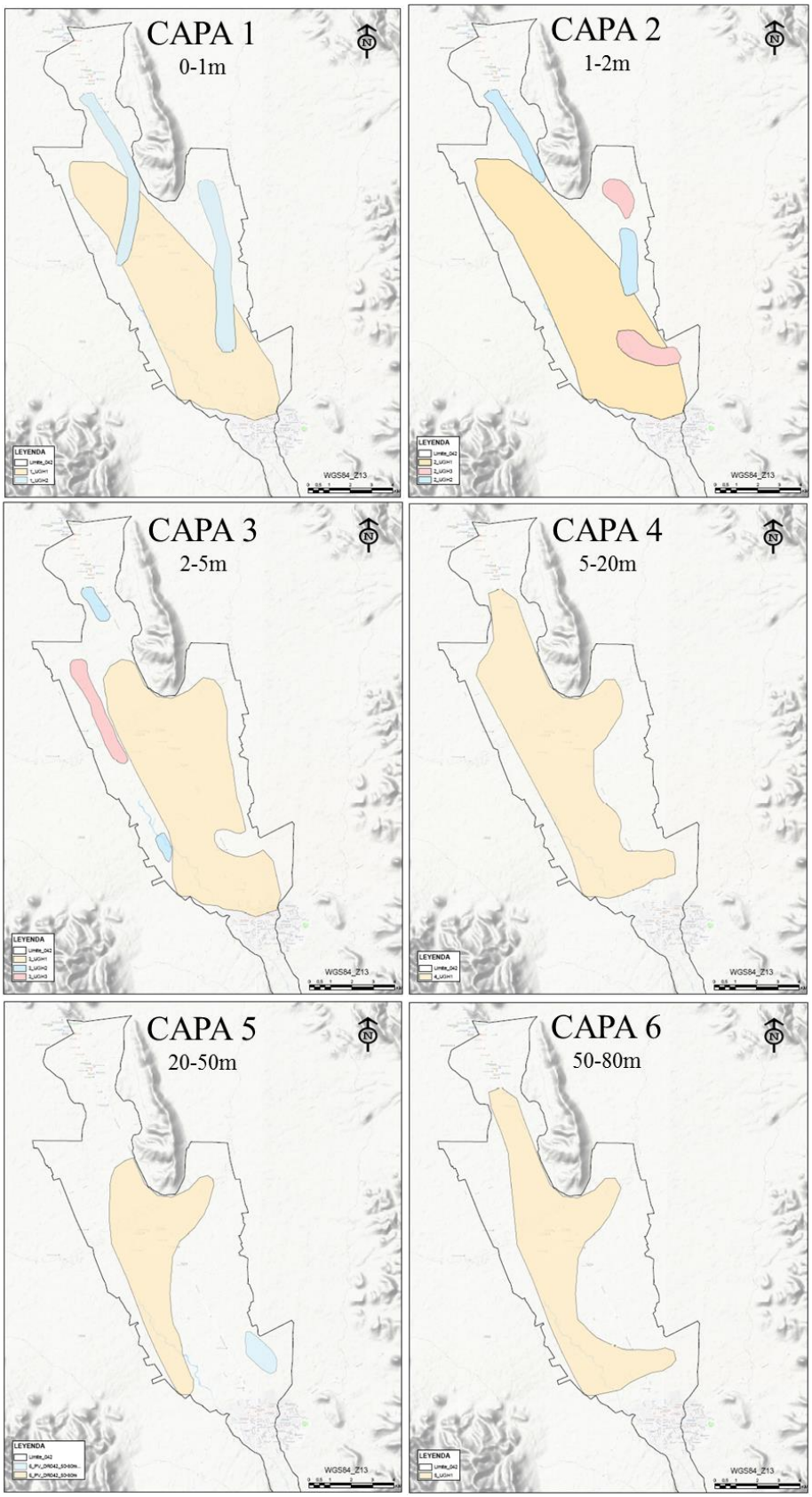


Figura 35. *Interpretación de Unidades Geoeléctricas.*

6.2 HIDROGEOLOGÍA

La caracterización piezométrica se realizó con base a los datos de elevación del nivel de la tabla de agua en los 46 aprovechamientos subterráneas y la elevación topográfica obtenida del CEM. Los datos se interpolaron con apoyo del software ArcMap con el interpolador "*Natural Neighbor*", o vecino natural. Es posible identificar la trayectoria del flujo de agua subterránea generando líneas perpendiculares entre dos curvas de mayor a menor elevación.

6.2.1 Piezometría 2019

En los mapas presentados en el Capítulo 4, referentes a los niveles estáticos históricos, se puede apreciar curvas suavizadas y casi todas con una tendencia uniforme, paralelas entre sí y de manera general se aprecian curvas perpendiculares al Río Santa María; sin embargo, la configuración que resulta de las lecturas 2019 se observa líneas de igual valor se registran más caóticas, con curvaturas que no en todos los casos tenían continuidad, lo que representa un mayor movimiento en los niveles de agua (figura 36).

En primera instancia se observa la porción NW, donde el nivel del agua el nivel de manera más somera, representado con la curva de los 15 metros en el área denominada "Prieteña" dentro del Distrito de Riego y muy cercana al Río Santa María.

En la parte sur del Distrito se aprecia una curva de los 40m de profundidad, las cuales se incrementan hacia el suroeste hasta llegar al punto de mayor abatimiento (Pozo 19B) con 55.5m de profundidad. Llama la atención esta lectura, debido a la cercanía que tiene respecto al Rio, se esperarían niveles más someros de la tabla de agua, sin embargo, se realizaron 3 lecturas de aprovechamientos cercanos a este, los cuales contiene lecturas acordes a esta profundidad.

Tabla 10. *Datos piezométricos obtenidos en campo en enero de 2019, en WGS84 Zona 13.*

No. Pozo	X	Y	Z_CEM	PROF NE (m)	ELEV NE (m)	ELEV. BROCAL	X_GPS	Y_GPS	Z_GPS
10M	254415.1	3319225.1	1485.0	28.5	1456.5	0.52	254,419	3,319,226	1,481
13R	260613.8	3305004.4	1543.0	50.3	1492.7	0.16	260,611	3,305,003	1,546
15C	257632.4	3310402.8	1518.0	29	1489.0	0.33	257,637	3,310,412	1,521
16CL	260618.6	3313669.5	1510.0	37.5	1472.5	0.4	260,626	3,313,663	1,510
17CL	257570.5	3313664.0	1505.0	35	1470.0	0.31	257,559	3,313,664	1,511
18CL	259449.3	3312504.6	1513.0	29	1484.0	0.38	259,447	3,312,513	1,512
19B	261048.4	3304622.6	1549.0	55.5	1493.5	0.35	261,047	3,304,622	1,550
1C	259277.9	3309251.2	1526.0	38	1488.0	0.3	259,286	3,309,253	1,528
1CL	258561.4	3310906.0	1518.0	27.5	1490.5	0.38	258,553	3,310,907	1,520
1M	256566.2	3311343.0	1512.0	20	1492.0	0	256,431	3,311,191	1,512
1P	255524.0	3311051.7	1509.0	26	1483.0				
22C	260677.0	3311415.3	1519.0	30	1489.0	0.26	260,680	3,311,405	1,520
24LL	258323.9	3305674.7	1535.0	42.5	1492.5		258,324	3,305,673	1,534
26C	257148.4	3309250.4	1521.0	30.5	1490.5				
2C	259519.8	3308080.7	1531.0	46	1485.0	0.26	259,512	3,308,077	1,534
34CL	259314.1	3312093.1	1514.0	38.5	1475.5	0.13	259,333	3,312,092	1,513
35CL	258256.3	3313047.6	1510.0	35	1475.0	0.36	258,227	3,313,051	1,512
36CL	258329.8	3314148.6	1502.3	22	1480.3	0.3	258,344	3,314,145	1,508
38B	259737.1	3304467.2	1546.0	62	1484.0				
39MO	253731.8	3319543.4	1483.0	22	1461.0	0.35	253,732	3,319,543	1,477
3C	257145.1	3311363.5	1515.0	21.5	1493.5	0.3	257,155	3,311,358	1,512
3M	256845.3	3312867.4	1511.0	19	1492.0	0.45	256,841	3,312,869	1,503
3P	254999.0	3312131.4	1506.0	25.5	1480.5				
41L	256015.1	3317611.8	1492.5	42.5	1450.0	0.25	256,017	3,317,611	1,489
42LL	255991.6	3309346.4	1518.0	33	1485.0				
43CL	260055.8	3313403.8	1510.0	26	1484.0	0.3	260,066	3,313,404	1,509
46C	258951.8	3306254.2	1535.0	41	1494.0	0.36	258,944	3,306,244	1,535
48CL	260564.3	3315451.3	1505.0	36	1469.0	0.23	260,564	3,315,466	1,508
49SJ	263133.8	3299387.5	1570.0	44	1526.0	0.29	263,125	3,299,385	1,567
4CL	260074.6	3312667.3	1512.0	37	1475.0	0.37	260,064	3,312,666	1,513
53C	258981.0	3307847.6	1531.0	39	1492.0	0.32	258,983	3,307,837	1,531
55C	257490.8	3312121.6	1513.0	29.5	1483.5	0.35	257,489	3,312,123	1,514
56R	260536.9	3304461.5	1544.0	40	1504.0	0.32	260,537	3,304,460	1,542
57L	254520.4	3320535.6	1480.0	31	1449.0	0.4	254,519	3,320,532	1,476
5R	260678.9	3306580.6	1538.0	47.5	1490.5	0.2	260,677	3,306,581	1,539
63C	257409.3	3310717.4	1517.0	26.5	1490.5	0.31	257,414	3,310,722	1,515
65CL	260804.0	3312805.5	1515.0	31	1484.0	0.27	260,816	3,312,807	1,514
6P	254169.7	3313970.6	1501.0	19	1482.0				
6R	259850.0	3306312.9	1538.0	45.5	1492.5				
7M	255779.0	3316322.0	1494.0	30	1464.0	0.32	255,780	3,316,319	1,494
7P	253705.6	3313892.2	1499.8	20.5	1479.3				
8M	255337.7	3317225.3	1491.0	28	1463.0	0.4	255,144	3,317,232	1,486
8P	253666.3	3315275.4	1497.0	8.7	1488.3				
9C	258152.3	3311571.4	1516.0	27.5	1488.5				
9M	254785.6	3318248.5	1487.0	28	1459.0	0.4	254,786	3,318,246	1,481
9P	253323.9	3315869.1	1495.0	30	1465.0	0.15	253,327	3,315,868	1,493

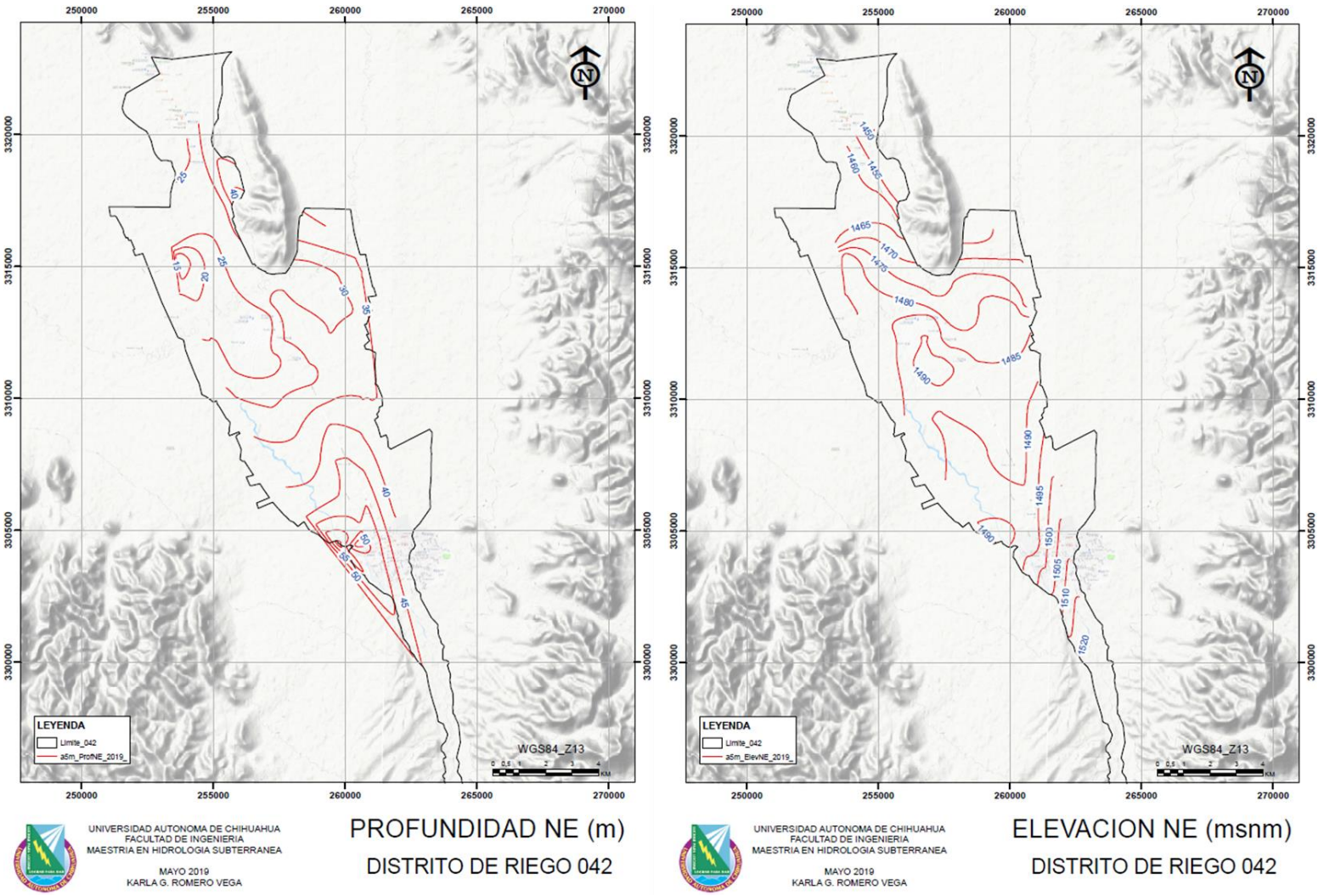


Figura 36. *Izq. Isolíneas de profundidad de nivel estático 2019. Der. Isolíneas de elevación de nivel estático 2019.*

Con las isolíneas de elevación del nivel estático, se realizan las líneas de flujo subterráneo, configurando una línea que "entre" de manera perpendicular a la curva subsecuente de menor elevación. El agua siempre tomará cause de mayor a menor elevación y en la trayectoria más corta posible (figura 37).

Conforme se avanza de la parte SE – NW el nivel de agua se va encontrando a menor profundidad hasta llegar a la curva de los 15 metros ubicada en la porción NW del distrito en el área denominada "Prieteña".

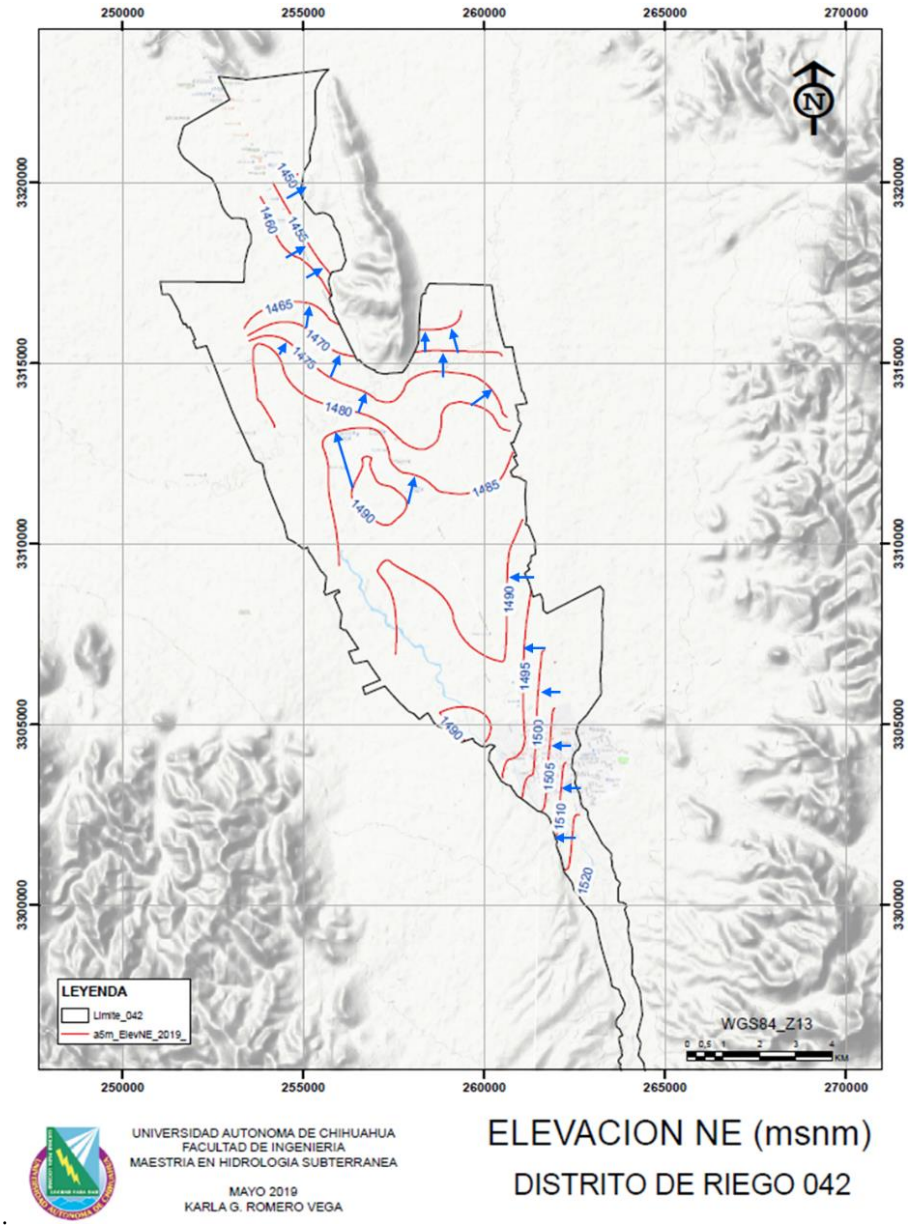


***Figura 37**. Mapa con dirección de flujo de agua subterránea*

6.2.2 Muestras de suelo

Se analizaron siete muestras de suelo en el Servicio Geológico Mexicano, con la intención de conocer los componentes de este, la mayoría de los análisis se realizaron mediante el método de digestión parcial de metales solubles en horno de microondas y/o el método por espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), se analizaron 33 elementos, de los cuales se muestran los resultados en la tabla 11.

Trece de los 33 elementos (Ag, Au, Be, Bi, Mo, Sb, Se, Sn, Te, Tl, U, W) analizados arrojaron resultados por debajo del límite de detección lo que indica su nula o muy baja presencia de este mineral. Sin embargo, con los valores reportados es posible trabajar con Ca, K y Mg, elementos que también fueron medidos en el agua como iones elementales para el balance iónico, el As, debido al impacto en la salud, y el Al, Fe y Zn, como elementos de presencia en rocas ígneas ferromagnesianas, con el objetivo de entender la geología y las alteraciones de la región.

Es importante especificar que solo cuatro de las siete muestras fueron tomadas en dentro del área de estudio, una en el área conocida como La Merced (SVB-0001), otra en la cara Este del cerro denominado El Malpais (SVB-0007), la tercera en Las Lechuzas (SBV-0002), y la última en las inmediaciones de San Buenaventura, en una parcela agrícola destinada al desarrollo de árboles de Nogal (SBV-00003). Las otras tres muestras se tomaron en regiones altas y dentro de algún sistema montañoso aledaño a la región, con el objetivo de encontrar similitudes entre la composición del suelo del valle y la composición del suelo en las zonas altas de los cerros que lo circundan.

Tabla 11. *Resultados de los análisis químicos de suelos emitidos por el SGM*

Método Usado		30-32	30-32	30-32	2A	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32
Límite de detección		1	0.01	10	0.01	10	1	1	0.01	1	1	1
Elemento/Compuesto		Ag	Al	AS	Au	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr
Unidades		mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Conlab	Ident. Campo											
290800	SBV-001	<1	1.33	15	<0.01	110	<1	<1	0.19	1	4	107
290801	SBV-002	<1	1.17	15	<0.01	93	<1	<1	0.15	1	3	98
290802	SBV-003	<1	2.15	<10	<0.01	181	<1	<1	0.38	1	10	66
290803	SBV-003-DPL	<1	2.2	<10	<0.01	187	<1	<1	0.39	1	9	64
290804	SBV-004	<1	2.37	10	<0.01	330	<1	<1	0.3	1	2	64
290805	SBV-005	<1	3.09	<10	<0.01	200	<1	<1	0.71	1	17	90
290806	SBV-006	<1	1.71	13	<0.01	101	<1	<1	0.13	1	6	84
290807	SBV-007	<1	2.27	<10	<0.01	192	<1	<1	0.45	1	9	100

Método Usado		30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32
Límite de detección		1	0.01	0.01	0.01	1	10	0.01	1	10	1	10
Elemento/Compuesto		Cu	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	Sb
Unidades		mg/kg	%	%	%	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Conlab	Ident. Campo											
290800	SBV-001	13	2.25	0.18	0.11	534	<10	0.07	7	211	50	<10
290801	SBV-002	21	2.17	0.18	0.1	522	<10	0.07	6	231	23	<10
290802	SBV-003	16	3.01	0.23	0.24	771	<10	0.06	16	380	17	<10
290803	SBV-003-DPL	16	3.1	0.22	0.24	783	<10	0.06	17	385	17	<10
290804	SBV-004	7	2.48	0.35	0.32	633	<10	0.06	6	141	17	<10
290805	SBV-005	23	4.78	0.25	0.45	957	<10	0.12	32	790	16	<10
290806	SBV-006	11	2.5	0.22	0.11	787	<10	0.07	11	174	16	<10
290807	SBV-007	15	3.92	0.21	0.41	711	<10	0.09	25	541	15	<10

Método Usado		30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32	30-32
Límite de detección		1	10	10	1	10	0.01	10	10	1	10	1
Elemento/Compuesto		Sc	Se	Sn	Sr	Te	Ti	Tl	U	V	W	Zn
Unidades		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Conlab	Ident. Campo											
290800	SBV-001	4	<10	<10	25	<10	0.15	<10	<10	40	<10	62
290801	SBV-002	3	<10	<10	15	<10	0.12	<10	<10	31	<10	67
290802	SBV-003	6	<10	<10	41	<10	0.2	<10	<10	60	<10	66
290803	SBV-003-DPL	6	<10	<10	41	<10	0.22	<10	<10	61	<10	69
290804	SBV-004	6	<10	<10	56	<10	0.14	<10	<10	29	<10	72
290805	SBV-005	9	<10	<10	80	<10	0.4	<10	<10	107	<10	82
290806	SBV-006	5	<10	<10	14	<10	0.18	<10	<10	42	<10	66
290807	SBV-007	5	<10	<10	47	<10	0.34	<10	<10	78	<10	81

Al Oeste del distrito se encuentra la Sierra del Cristo, se tomó una muestra camino al Rancho La Canaleja (SBV-0005) a 6 km (aproximadamente en línea recta) al área de estudio, al Sur-Este se toma la muestra en la Sierra Los Carrizalillos (SBV-0004), en cerros con cortes aledaños a la carretera que va de Buenaventura a Ricardo Flores Magón y al Sur-Oeste, se

tomó la muestra en el Rancho Los Álamos (SBV-0006), a 5 km del área de estudio (aproximadamente en línea recta). Con estos resultados se realizaron los siguientes mapas de isovalores para diferentes elementos.

El Calcio (Ca), fue medido en porcentaje respecto al total de la muestra, si bien en la figura 38 se observan isolíneas de valores bajos, se ve una marcada tendencia de valores altos en la parte Oeste de Distrito 042, es posible que esto se produzca por la composición de la Sierra Cristo, descrita por el SGM como una Toba Riolítica-Ignimbrita, del Cenozoico contiguo a este estrato se presenta un afloramiento de Basalto de edad más reciente (28.7 Ma), el aumento en la proporción del elemento puede surgir por el descenso escurrimientos superficiales y subsuperficiales de minerales formadores de roca con bajo intemperismo.

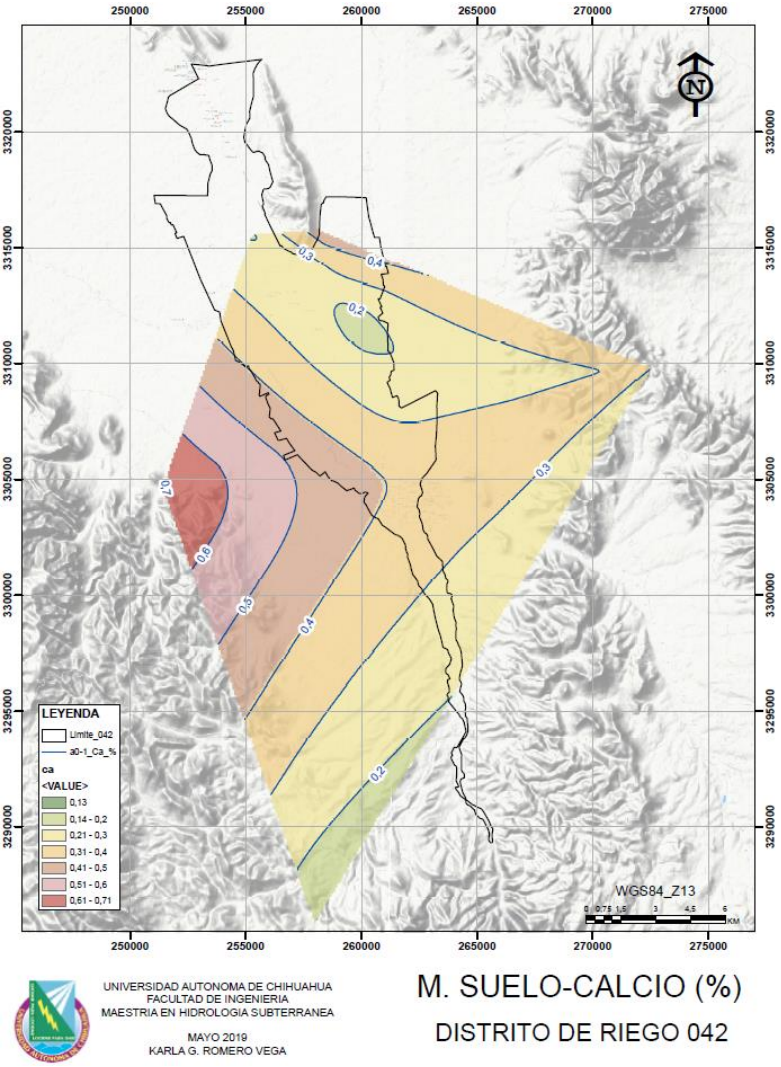


Figura 38. *Planta de Isovalores para Ca con muestras de suelo*

A continuación, se presenta el mapa de isovalores del Potasio (K) (figura 39). La mayor presencia se encuentra en la muestra SVB-004, al Este de la zona de estudio, está área en particular es interesante, ya que en un área pequeña se cuenta con el afloramiento de tres unidades de diferente composición, la Toba Riolítica-Ignimbrita, Basalto y la Toba Andesítica, lo que puede provocar un mayor enriquecimiento iónico en el agua y mayor aporte de minerales y/o elemento producto de la erosión en intemperismo que se deposita en el área. La presencia de Potasio disminuye conforme se avanza a la parte central del Distrito de Riego 042, dato que concuerda con la información obtenida en el balance iónico realizado a las muestras de agua subterránea, ya que ninguna muestra reporto presencia significativa en cuanto al contenido de potasio.

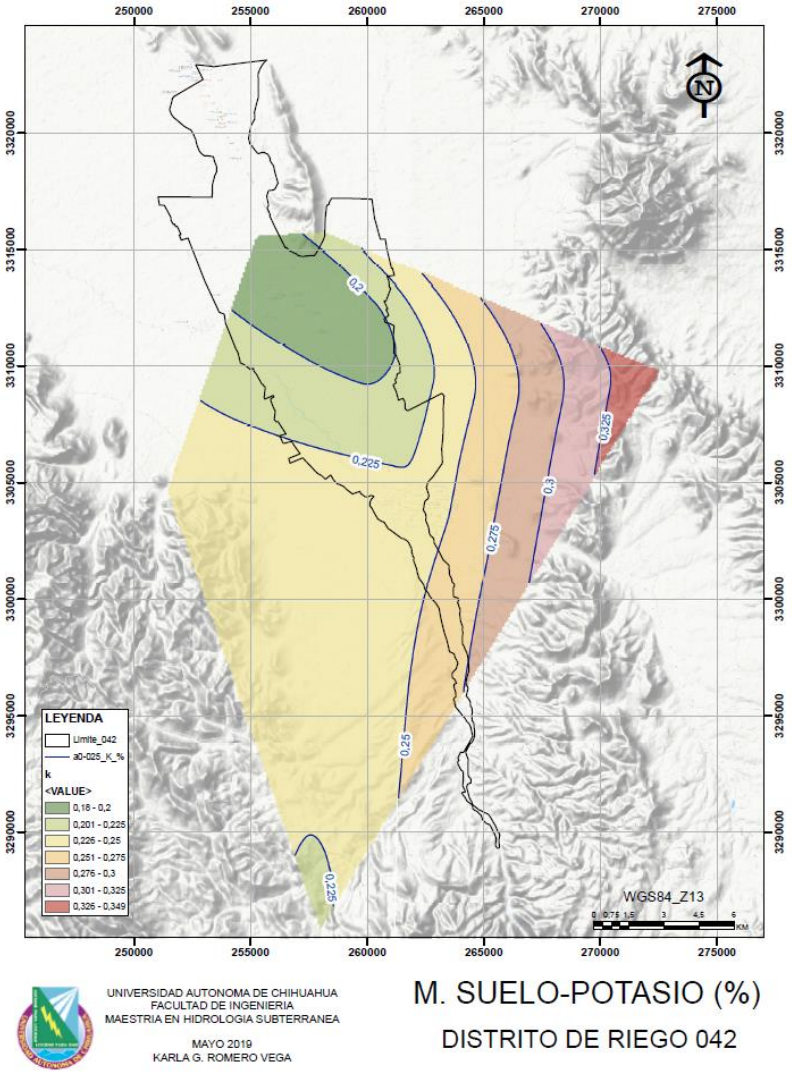


Figura 39. *Planta de Isovalores para K con muestras de suelo*

El Magnesio (Mg), se presenta con una tendencia similar a la del Calcio (figura 40), donde los mayores valores se encuentran a las faltas de la Sierra del Cristo y el contenido porcentual del elemento va descendiendo conforme se acerca a la parte central del Distrito (áreas iluminadas de color verde). Es notorio como las muestras tomadas sobre algún cerro presenta valores más elevados que los que se tomaron en el área de estudio. El Magnesio es un mineral, el cual es afectado fácilmente por el intercambio iónico (Custodio & Llamas, 1996), y al estar (la mayoría de los valores altos) en sistemas montañosos de origen ígneo es posible que se tenga presencia de arcillas en las cuales es muy común se generen estos intercambios.

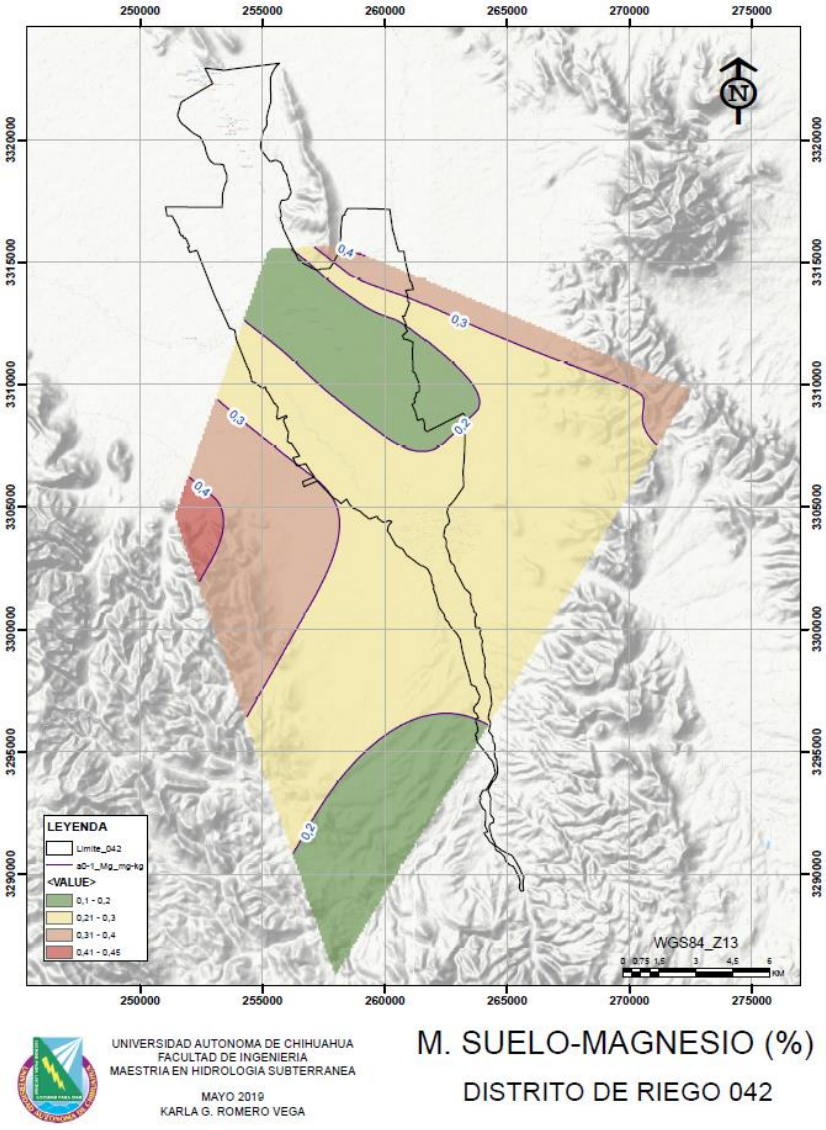


Figura 40. *Planta de Isovalores para Mg con muestras de suelo*

Los siguientes cuatro mapas, referentes al Aluminio (Al), Fiero (Fe), Zinc (Zn) y Estroncio (Sr) en las figuras 41 y 42, describen una tendencia similar a la anterior, con el valor más elevado al Oeste del distrito, en las inmediaciones del Rancho La Canaleja, a los pies de la Sierra del Cristo. Todos estos elementos se encuentran presente en el suelo a baja escala, lo que no representa un problema a la salud respecto a presencia de metales pesados en el agua. La existencia de dichos elementos en el suelo puede ser asociado a la erosión e intemperismo de rocas de origen ígneo, como se tienen en las sierras aledañas tanto en la Sierra del Cristo, como en la Sierra del Carrizalillo (al Oeste y al Este respectivamente). Por un lado, el Al y el Sr relacionados a la presencia de las Riolitas y Basalto; por otro lado, el Fe y el Zn, minerales asociados a rocas ferromagnesianas como el Basalto.

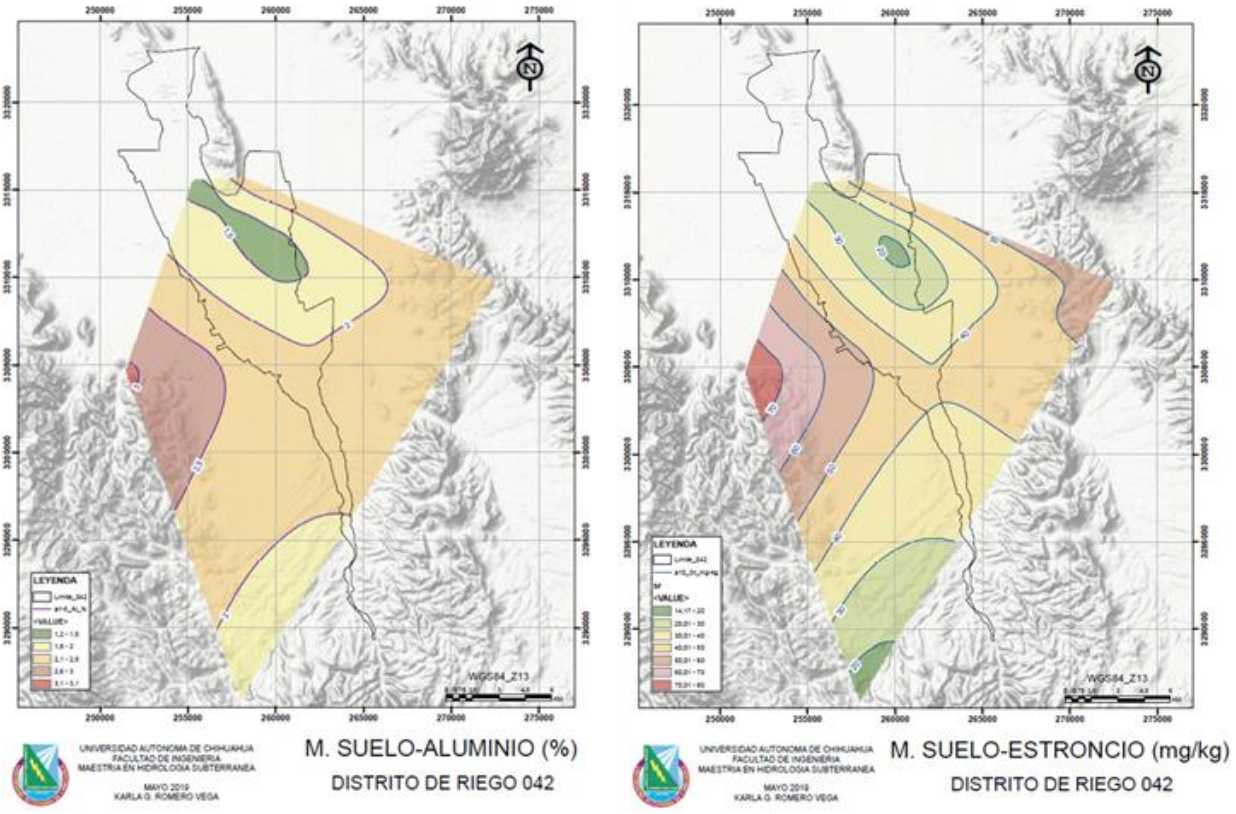


Figura 41. *(Izq.) Planta de Isovalores para Al con muestras de suelo. (Der) Planta de Isovalores para Sr con muestras de suelo.*

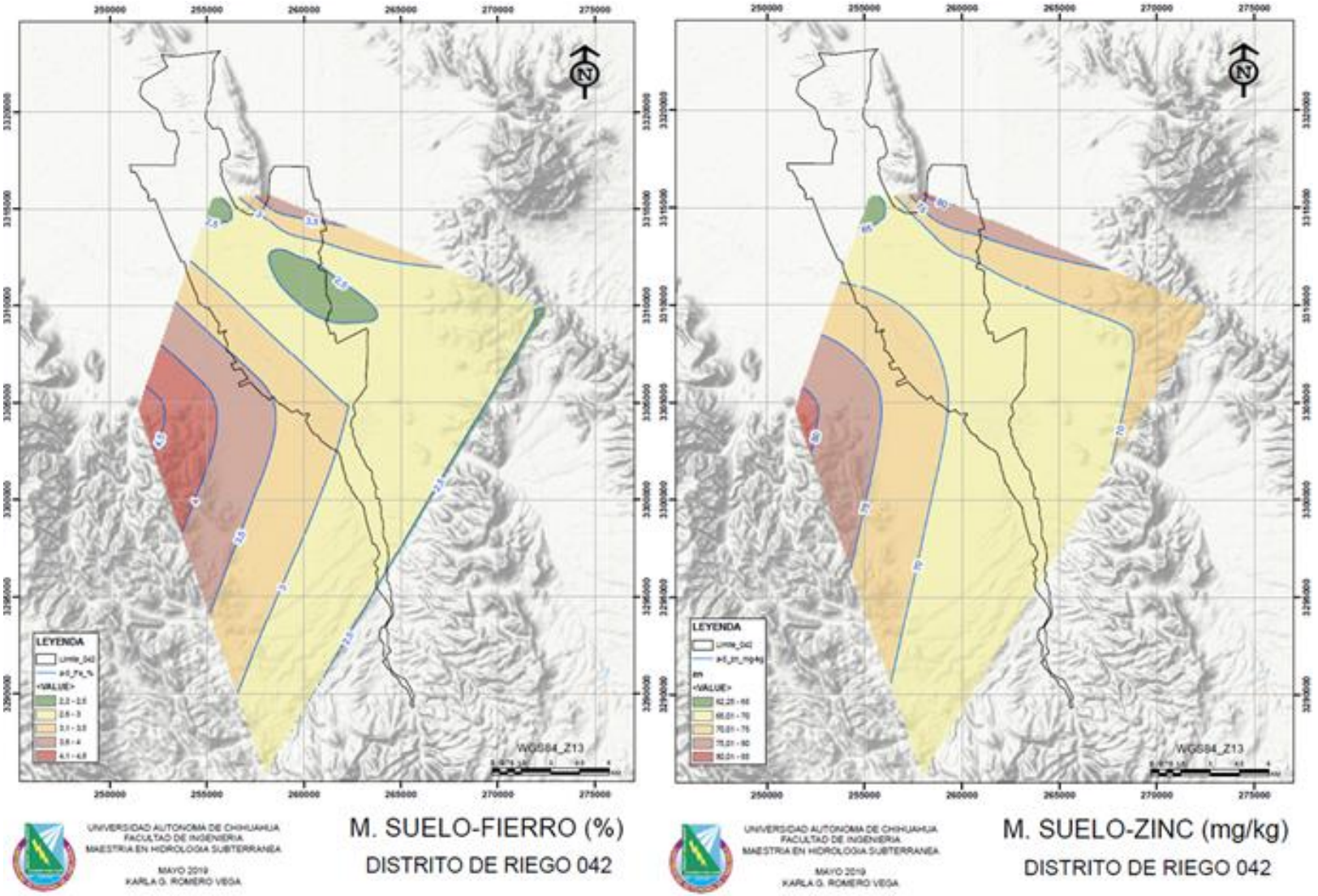


Figura 42. *(Izq.) Planta de Isovalores para Fe con muestras de suelo. (Der) Planta de Isovalores para Zn con muestras de suelo*.

El arsénico es un elemento distribuido extensamente por toda la corteza terrestre (Organización Mundial de la Salud, 2006). En la figura 43 se puede observar que las muestras SBV-005, SBV-004 y SBV-007 presentan o el valor mínimo cuantificable (10 mg/kg) o por debajo de límite de detección inferior; estos resultados reflejan que es posible tener zonas de recarga en estas áreas, y eso puede estar asociado a los escurrimientos provenientes de las montañas aledañas También es posible que al no ser zona agrícola o ganadera (la muestra SBV-006 se encuentra en un rancho ganadero) se tenga menor presencia de fertilizantes y extracción de agua para este tipo de actividades económicas. Debido a las características geográficas y climatológicas, en el estado de Chihuahua el agua subterránea es el principal recurso para el abastecimiento público, así como para usos industriales y el riego agrícola (Espino-Valdes, Barrera-Prieto, & Herrera-Peraza, 2009).

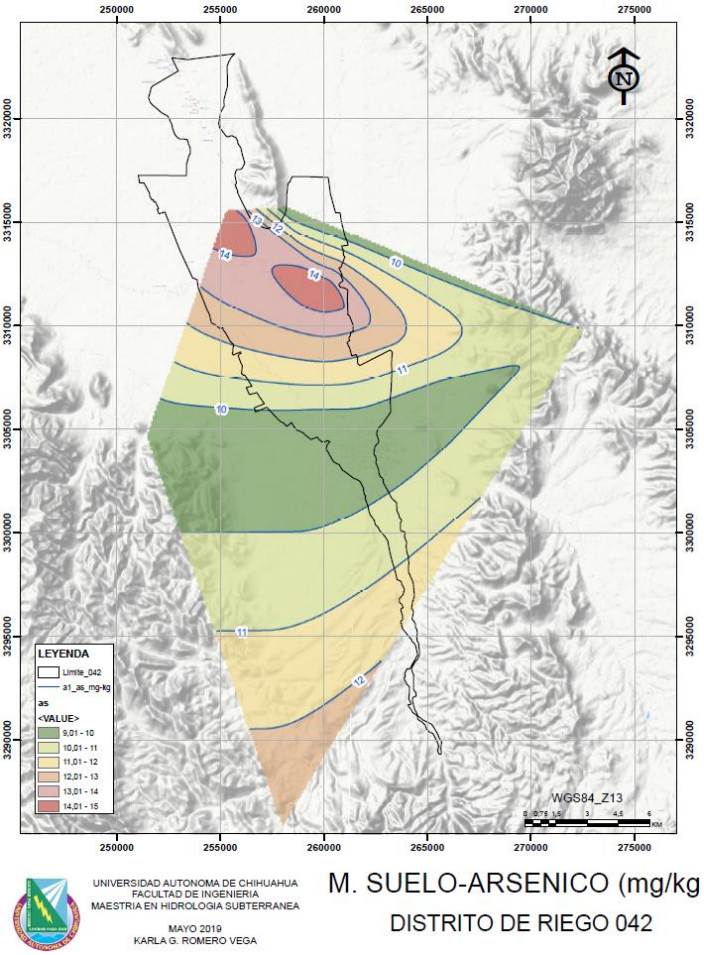


Figura *43*. Planta de Isovalores para As con muestras de suelo.

6.3 HIDROGEOQUÍMICA

Frente a la necesidad del aseguramiento/control de calidad del trabajo analítico en la química del recurso hídrico, el cálculo del balance de iones resulta un procedimiento simple, preciso y cuyos datos son fáciles de interpretar; el mismo que provee una medida clara de la calidad analítica y, en algunos casos, permite ubicar errores analíticos al comparar los datos (Montoya, 2014).

Una vez reportados los resultados por parte del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la UACH se evaluó la precisión de los análisis químicos, la cual se puede controlar mediante diferentes métodos, entre ellos la diferencia entre aniones y cationes (Fagundo, Gonzalez, & Beato, 2002), como se indica en la ecuación 1, a continuación:

$$\%\ Error = \left(\frac{\Sigma\frac{meq}{L}cationes - \Sigma\frac{meq}{L}aniones}{\Sigma\frac{meq}{L}cationes + \Sigma\frac{meq}{L}aniones}\right) * 100 \quad \text{.....Ec 1}$$

Donde los cationes son Na^{+}, K^{+}, Mg^{+2} y el Ca^{+2} y los aniones HCO_3^{-}, SO_4^{-2}, Cl^{-}, F^{-} y el NO_3^{-}. En general el valor del error debe ser menor que el 2% (Matthes, 1982). Sin embargo, Hem (1985) estableció que errores que exceden el 5% son inevitables algunas veces cuando el total de los cationes y aniones en menor de 5 meq/L. Sin embargo, Nordstrom et al. en el 2009 consideró validos los datos hasta con una desviación de <±20%. Donde sugiere que los resultados pueden ser imprecisos debido a los cambios químicos que ocurren durante el tiempo de transporte desde el campo a el laboratorio.

Los cálculos se realizaron en una hoja de cálculo de Excel y en la tabla se refleja un error promedio del 13.9% con un máximo de 23% y un mínimo de 2.13%. La tabla 12 muestra el error obtenido para cada muestra analizada con fines de producir una caracterización hidrogeoquímica. La tabla 13 muestra los valores reportados por el laboratorio.

***Tabla 12**. Porcentaje de error de los resultados analíticos*

ID	Σ Total Catión	Σ Total Anión	% ERROR
1	2.62	2.73	-2.13
2	6.15	4.26	18.17
3	6.91	5.02	15.8
4	4.54	3.48	13.33
5	7.75	5.67	15.43
6	5.23	3.98	13.56
7	6.13	4.6	14.2
8	6.26	4.45	16.82
9	8.89	5.67	22.13
10	6.42	4.67	15.79
11	4.9	3.72	13.68
12	6.19	4.61	14.71
13	6.11	4.61	13.97
14	6.93	4.92	16.97
15	5.28	3.47	20.68
16	4.51	3.21	16.85
17	6.13	4.37	16.71
18	6.37	4.44	17.89
19	7.87	4.92	23
20	4.05	3.39	8.77
21	6.39	4.63	16.01
22	5.97	4.49	14.11
23	3.85	2.76	16.52
24	3.98	3.18	11.14
25	3.75	2.91	12.74
26	4.82	6.61	-15.71

***Tabla 13**. Resultados analíticos de muestras de agua de pozo, Laboratorio Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería, UACH*

ID HGQ	ID Lab	pH a 25 *C	Alcalinidad total mg/l CaCO3	Cloruros*	Conductividad eléctrica µS/cm	Dureza Total*	Dureza cálcica*	Dureza magnésica*	Arsénico	Flúor*	Nitratos*	Solidos totales*	Solidos suspendidos totales*	Sulfatos*	Calcio*	Magnesio*	Sodio*	Potasio*
1	17-244	7.93	114.31	6.41	186	16.44	13.31	3.13	0.0300	1.79	2.27	180	5	6.53	5.33	0.76	47.53	0.81
2	17-230	7.85	178.44	1.63	343	122.02	95.46	26.56	0.0040	2.46	19.56	217	10	9.4	38.23	6.45	52.17	2.4
3	17-236	7.65	209.11	6.9	386	142.63	109.89	32.74	0.0030	1.47	21.97	255	3	10.27	44.01	7.95	56.49	2.26
4	17-229	7.83	142.19	5.91	257	69.89	53.91	15.98	0.0100	1.76	8.47	192	3	11.33	21.59	3.88	54.09	1.49
5	17-245	7.48	231.41	3.45	469	164.03	127.55	36.49	0.0010	1.43	38.5	221	4	12.13	51.08	8.86	59.19	2.85
6	17-242	7.83	161.71	6.4	316	88.55	67.54	21	0.0090	1.66	18.67	195	2	8.53	27.05	5.1	56.87	2.21
7	17-231	7.86	175.65	1.54	258	125.2	95.51	29.69	0.0050	1.55	28.37	242	6	9.6	38.25	7.21	51.71	2.34
8	17-239	7.5	84.01	3.94	370	130.19	95.31	34.88	0.0040	1.63	21.74	162	2	9.73	38.17	8.97	57.8	1.78
9	17-221	7.81	224	9.36	443	199.24	153.12	46.12	0.0010	1.35	34.33	442	16	14.81	61.3	11.2	61.58	3.59
10	17-222	7.86	182	12.32	315	133.23	99.76	33.48	0.0060	1.6	25.78	282	0	9.03	39.95	8.13	54.88	1.94
11	17-240	7.88	144.98	6.9	273	83.02	64.9	18.12	0.0070	1.88	22.22	260	1	8	25.99	4.4	50.18	4.71
12	17-232	7.36	189.59	1.63	348	119.02	93.71	25.9	0.0020	6.9	11.31	265	5	10.67	37.29	6.29	55.6	1.68
13	17-243	7.36	186.8	3.45	369	122.19	93.16	29.03	0.0050	1.61	29.9	209	7	10.27	37.31	7.05	53.85	1.87
14	17-228	7.84	200.74	4.43	385	144.36	107.55	36.81	0.0050	1.63	30.55	187	3	9.6	43.07	8.94	59.19	2.12
15	17-238	7.5	142.19	5.91	197	98.01	74.41	23.6	0.0030	1.67	10.17	194	6	10	29.8	5.73	49.7	5.67
16	17-235	7.8	133.83	3.94	260	83.03	58.85	24.17	0.0060	1.72	9.92	167	0	8.27	23.57	5.87	48.82	1.41
17	17-227	7.8	175.6	6.41	238	123.67	92.16	31.5	0.0260	1.75	25.42	184	6	8.93	36.91	7.65	53.92	3.89
18	17-237	7.46	178.44	10.35	351	128.21	96.83	31.38	0.0020	1.73	17.45	190	1	10.8	38.78	7.62	53.62	2.07
19	17-246	7.75	203.53	7.39	469	166.52	131.77	34.76	0.0020	1.48	21.96	196	2	10.27	52.77	8.44	57.35	4.16
20	17-241	8.01	142.19	5.42	249	75.71	51.54	24.17	0.0000	1.75	7.68	211	2	8.67	20.64	5.87	44.75	1.53
21	17-233	7.45	186.6	10.31	368	136.98	108.77	28.21	0.0020	1.62	19.29	272	0	10.08	43.56	6.85	45.91	1.91
22	17-224	7.83	187.6	7.88	305	141.04	106.25	34.8	0.0030	1.37	15.5	330	2	9.4	42.55	8.45	37.6	2.75
23	17-226	8.02	117.6	2.46	213	45.02	33.73	11.28	0.0250	1.61	4.19	207	1	8.82	13.51	2.74	56.77	1.24
24	17-225	8	131.6	6.9	212	46.73	35.66	11.08	0.0260	1.81	3.08	213	5	10.28	14.28	2.69	58.01	1.13
25	17-223	8.06	126	2.96	204	41.21	31.74	9.47	0.0240	1.81	1.29	190	3	9.03	12.79	2.3	56.65	0.89
26	17-234	7.7	289.96	5.91	265	88.95	68.82	20.14	0.0050	1.53	20.92	175	0	10.9	27.56	4.89	46.33	1.95

* Medidos en mg/l

6.3.1 Comparación con los criterios de calidad

La calidad del agua potable es una cuestión que preocupa en países de todo el mundo por su repercusión en la salud de la población. La experiencia pone de manifiesto el valor de los enfoques de gestión preventivos que abarcan desde los recursos hídricos al consumidor. La OMS elabora normas internacionales relativas a la calidad del agua y la salud de las personas en forma de guías en las que se basan reglamentos y normas de países de todo el mundo (www.who.int, 2008).

La calidad del agua es un atributo definido socialmente en función del uso que se le dé al líquido En México, la Ley de Aguas Nacionales (LAN) es la mayor regulación de donde se derivan todas las reglas, leyes y normas que se aplica la calidad del agua según la actividad que se desarrolle con ella. En el área de estudio se han incluido pozos de uso agrícola, los cuales son administrados por el Distrito de Riego 042 y pozos de uso público-urbano, administrados por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS).

6.3.3.1 Comparación de la calidad del agua con la Norma Oficial Mexicana

Para evaluar la calidad de las aguas subterráneas empleadas para consumo humano se utiliza la Modificación a la NOM-127-SAA1-1994. En la tabla 13 se muestran las concentraciones de los parámetros que están fuera de dicha norma y no es recomendado el consumo humano. En caso del flúor la concentración más alta fue de 6.9 mg/l que corresponde al pozo 28C del DR 042, y se ubica en la porción Este del área de estudio. El arsénico, un elemento presente en gran parte de las aguas subterráneas del estado de Chihuahua debido a procesos de intemperismo de rocas ígneas félsicas, presenta concentraciones bajas y en ocasiones por debajo del límite de detección; sin embargo, se identificaron 3 muestras las cuales exceden ligeramente el límite máximo permisible correspondiente a los pozos 61L, JMAS 5 (El Carbajal), JMAS 3 (Villas del Sol).

6.3.3.2 Evaluación del agua para uso en agricultura

El sodio se encuentra en el suelo en estado combinado y principalmente en forma de sales. Un exceso de sodio en el suelo provoca un deterioro de sus propiedades físicas y químicas e impacta directamente el rendimiento de los cultivos, ya que tiene efectos secundarios afectando la estructura del suelo y su permeabilidad. Sus efectos no dependen solo de su propia concentración, sino también del resto de cationes.

Los diagramas de Wilcox se utilizan para determinar rápidamente la viabilidad del agua para fines de riego agrícola (Figura 44). Las aguas clasificadas como S1, son aguas que pueden ser utilizadas para riego en la mayoría de los suelos con pocos problemas de sodicidad (Cuellar, Ortega, Ramírez, & Sánchez, 2015).

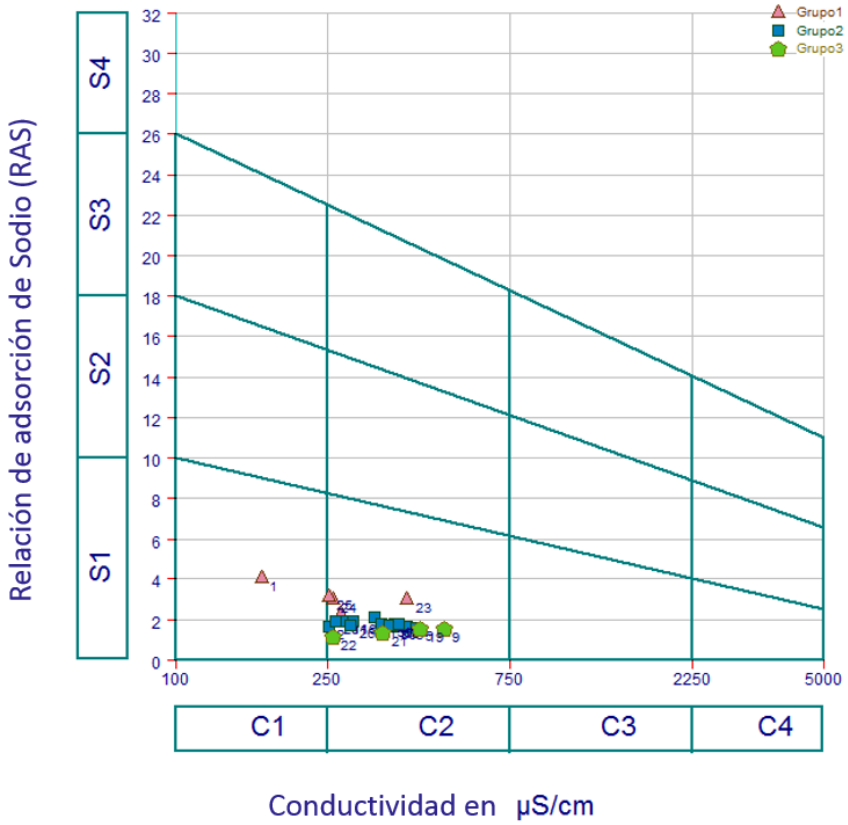


Figura 44. *Diagrama de Wilcox 2018 en escala logarítmica.*

El Laboratorio de Salinidad de Estados Unidos en California, establecido parámetros descritos en las denominadas Normas de Riverside las cuales evalúan la calidad de las aguas de riego (Tabla 14). Según estas Normas el agua analizada se clasifica de la siguiente manera:

***Tabla 14**. Clasificación y calidad del agua según análisis RAS y las Normas Riverside*

Tipo	Calidad y normas de uso
C1	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad
C2	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
S1	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.

6.3.4 Balance iónico

El balance de iones es la verificación de que la suma de miliequivalentes (meq) de aniones es aproximadamente igual a la suma de miliequivalentes de cationes: esto debido a la electroneutralidad del agua, propiedad que puede distorsionarse si ciertos fenómenos (Montoya, 2014), consultar las tablas 15 y 16.

Tabla 15. *Balance iónico de cationes.*

ID	Na^{+}	K^{+}	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Conc. (meq/l) Na^{+}	Conc. (meq/l) K^{+}	Conc. (meq/l) Ca^{+2}	Conc. (meq/l) Mg^{+2}	Σ Total Catión	% Na^{+}	% K^{+}	% Ca^{+2}	% Mg^{+2}	Total %
1	47.53	0.81	5.33	3.23	2.07	0.02	0.27	0.27	**2.62**	78.89	0.8	10.18	10.13	100
2	52.17	2.4	38.26	23.14	2.27	0.06	1.91	1.9	**6.15**	36.91	1	31.13	30.96	100
3	56.49	2.26	44.04	26.64	2.46	0.06	2.2	2.19	**6.91**	35.56	0.8	31.88	31.72	100
4	54.09	1.49	21.61	13.07	2.35	0.04	1.08	1.07	**4.54**	51.74	0.8	23.77	23.64	100
5	59.19	2.85	51.12	30.92	2.57	0.07	2.56	2.54	**7.75**	33.23	0.9	33	32.83	100
6	56.87	2.21	27.07	16.37	2.47	0.06	1.35	1.35	**5.23**	47.28	1.1	25.88	25.75	100
7	51.71	2.34	38.28	23.15	2.25	0.06	1.91	1.9	**6.13**	36.7	1	31.24	31.08	100
8	53.62	2.07	38.81	23.47	2.33	0.05	1.94	1.93	**6.26**	37.27	0.9	31.02	30.86	100
9	61.58	3.5	61.37	37.12	2.68	0.09	3.07	3.05	**8.89**	30.12	1	34.52	34.34	100
10	54.88	1.94	39.98	24.18	2.39	0.05	2	1.99	**6.42**	37.15	0.8	31.12	30.96	100
11	50.18	4.71	26.01	15.73	2.18	0.12	1.3	1.29	**4.9**	44.55	2.5	26.56	26.42	100
12	55.6	1.68	37.56	22.57	2.42	0.04	1.88	1.86	**6.19**	39.02	0.7	30.32	29.97	100
13	53.85	1.87	37.34	22.58	2.34	0.05	1.87	1.86	**6.11**	38.3	0.8	30.54	30.38	100
14	59.19	2.12	43.11	26.07	2.57	0.05	2.16	2.14	**6.93**	37.15	0.8	31.11	30.95	100
15	49.7	5.67	29.82	18.04	2.16	0.15	1.49	1.48	**5.28**	40.92	2.8	28.24	28.09	100
16	48.82	1.41	23.59	14.27	2.12	0.04	1.18	1.17	**4.51**	47.05	0.8	26.14	26.01	100
17	53.92	3.89	36.94	22.34	2.34	0.1	1.85	1.84	**6.13**	38.25	1.6	30.14	29.98	100
18	57.8	1.78	38.2	23.1	2.51	0.05	1.91	1.9	**6.37**	39.46	0.7	29.99	29.83	100
19	57.35	4.16	52.81	31.94	2.49	0.11	2.64	2.63	**7.87**	31.69	1.4	33.56	33.39	100
20	44.75	1.53	20.66	12.49	1.95	0.04	1.03	1.03	**4.05**	48.1	1	25.53	25.4	100
21	45.91	1.91	43.6	26.37	2	0.05	2.18	2.17	**6.39**	31.22	0.8	34.1	33.92	100
22	37.6	2.75	42.59	25.95	1.63	0.07	2.13	2.13	**5.97**	27.39	1.2	35.68	35.75	100
23	56.77	1.24	13.52	8.18	2.47	0.03	0.68	0.67	**3.85**	64.13	0.8	17.56	17.48	100
24	58.01	1.13	14.29	8.64	2.52	0.03	0.71	0.71	**3.98**	63.43	0.7	17.97	17.87	100
25	56.65	0.89	12.72	7.69	2.46	0.02	0.64	0.63	**3.75**	65.6	0.6	16.94	16.85	100
26	46.33	1.95	27.58	16.68	2.01	0.05	1.38	1.37	**4.82**	41.83	1	28.64	28.49	100

Tabla 16 *. Balance iónico de aniones, error % y Promedio iónico*

ID	Cl^-	SO^{-2}_4	HCO^-_3	NO_3	F^-	Conc. (meq/l) Cl^-	Conc. (meq/l) SO^{-2}_4	Conc. (meq/l) HCO^-_3	Conc. (meq/l) CO^{-2}_3	Conc. (meq/l) NO_3	Conc. (meq/l) F^-	Σ Total Anión	% Cl^-	% SO^{-2}_4	% HCO^-_3	% CO^{-2}_3	% NO_3	% Error	Prom. Iónico
1	6.41	6.53	139.46	2.27	1.79	0.18	0.14	2.29	0	0.04	0.09	**2.73**	6.61	4.98	83.6	0	1.34	-2.13	2.68
2	1.63	9.4	217.7	19.56	2.46	0.05	0.2	3.57	0	0.32	0.13	**4.26**	1.08	4.6	83.9	0	7.41	18.17	5.2
3	6.9	10.27	255.11	21.97	1.47	0.19	0.21	4.18	0	0.35	0.08	**5.02**	3.87	4.26	83.3	0	7.06	15.8	5.96
4	5.91	11.33	173.47	8.47	1.76	0.17	0.24	2.84	0	0.14	0.09	**3.48**	4.79	6.79	81.8	0	3.93	13.33	4.01
5	3.45	12.13	282.32	38.5	1.43	0.1	0.25	4.63	0	0.62	0.08	**5.67**	1.71	4.45	81.6	0	10.9	15.43	6.71
6	6.4	8.53	197.29	18.67	1.66	0.18	0.18	3.23	0	0.3	0.09	**3.98**	4.53	4.46	81.3	0	7.56	13.56	4.61
7	1.54	9.6	214.29	28.37	7.39	0.04	0.2	3.51	0	0.46	0.39	**4.6**	0.94	4.35	76.3	0	9.94	14.2	5.36
8	10.35	10.8	217.7	17.45	1.66	0.29	0.23	3.57	0	0.28	0.09	**4.45**	6.55	5.05	80.1	0	6.32	16.82	5.35
9	9.36	14.81	273.28	34.33	1.16	0.26	0.31	4.48	0	0.55	0.06	**5.67**	4.65	5.44	79.1	0	9.77	22.13	7.28
10	12.32	9.03	222.04	25.78	1.54	0.35	0.19	3.64	0	0.42	0.08	**4.67**	7.43	4.03	77.9	0	8.9	15.79	5.55
11	6.9	8	176.88	22.22	1.88	0.19	0.17	2.9	0	0.36	0.1	**3.72**	5.23	4.48	78	0	9.64	13.68	4.31
12	1.63	10.67	231.3	11.31	6.9	0.05	0.22	3.79	0	0.18	0.36	**4.61**	1	4.83	82.3	0	3.96	14.71	5.4
13	3.45	10.27	227.9	29.9	1.61	0.1	0.21	3.74	0	0.48	0.08	**4.61**	2.11	4.64	81	0	10.5	13.97	5.36
14	4.43	9.6	244.9	30.55	1.61	0.12	0.2	4.01	0	0.49	0.08	**4.92**	2.54	4.07	81.7	0	10	16.97	5.92
15	5.91	10	173.47	10.17	1.67	0.17	0.21	2.84	0	0.16	0.09	**3.47**	4.8	6	81.9	0	4.73	20.68	4.38
16	3.94	8.27	163.27	9.92	1.72	0.11	0.17	2.68	0	0.16	0.09	**3.21**	3.46	5.37	83.4	0	4.98	16.85	3.86
17	6.41	8.93	214.23	25.42	1.61	0.18	0.19	3.51	0	0.41	0.08	**4.37**	4.13	4.25	80.3	0	9.37	16.71	5.25
18	3.94	9.73	224.49	21.74	1.73	0.11	0.2	3.68	0	0.35	0.09	**4.44**	2.5	4.57	83	0	7.91	17.89	5.4
19	7.39	10.27	248.31	21.96	1.48	0.21	0.21	4.07	0	0.35	0.08	**4.92**	4.23	4.34	82.7	0	7.19	23	6.4
20	5.42	8.67	173.47	7.68	1.75	0.15	0.18	2.84	0	0.12	0.09	**3.39**	4.5	5.32	83.8	0	3.65	8.77	3.72
21	10.31	10.08	227.65	19.29	1.62	0.29	0.21	3.73	0	0.31	0.09	**4.63**	6.27	4.54	80.6	0	6.72	16.01	5.51
22	7.88	9.4	228.87	15.5	1.37	0.22	0.2	3.75	0	0.25	0.07	**4.49**	4.94	4.36	83.5	0	5.57	14.11	5.23
23	2.46	8.82	143.47	4.19	1.61	0.07	0.18	2.35	0	0.07	0.08	**2.76**	2.51	6.66	85.3	0	2.45	16.52	3.3
24	6.9	10.2	160.55	3.08	1.73	0.19	0.21	2.63	0	0.05	0.09	**3.18**	6.11	6.68	82.8	0	1.56	11.14	3.58
25	2.96	9.03	153.72	1.29	1.78	0.08	0.19	2.52	0	0.02	0.09	**2.91**	2.87	6.47	86.7	0	0.72	12.74	3.33
26	5.91	10.9	353.75	20.92	1.53	0.17	0.23	5.8	0	0.34	0.08	**6.61**	2.52	3.44	87.7	0	5.1	-15.7	5.71

6.3.5 Parámetros de Campo

Las propiedades del agua se dividen en físicas y químicas. Las propiedades físicas están relacionadas con su disposición espacial, la cual hace que el agua en su forma líquida no se presente como una molécula aislada, sino formando polímeros (dímeros y trímeros) que se encuentran sujetos a constante formación y destrucción. Estos polímeros se encuentran unidos mediante puentes de hidrógeno y le confieren al agua una serie de peculiaridades (Fagundo, Gonzalez, & Beato, 2002) por lo que para cualquier estudio es muy importante no pasar por alto dichas propiedades. Medir estos parámetros en campo es importante para evitar alteraciones por manipulación.

6.3.5.1 Temperatura

El agua de lluvia que recarga a los acuíferos tiene una temperatura algo inferior a la temperatura ambiente local y si el agua que se infiltra es de río, normalmente tiene una temperatura solo ligeramente diferente a ella (Custodio & Llamas, 2001).

Una vez que el agua está en el terreno, intercambia calor con el mismo. En este proceso el elevado calor específico del agua (1cal/g) frente al del terreno seco actúa como un importante regulador de temperatura. Mientras que el aporte de calor interno (por gradiente geotérmico) es prácticamente constante durante muy largos periodos de tiempo, el aporte de calor solar está sometido a un ciclo diurno y un ciclo anual más unas acciones irregulares (Custodio & Llamas, 2001).

La temperatura del agua afecta directamente a la solubilidad de las sales y en general a todas sus propiedades químicas y a su comportamiento microbiológico. En la Tabla 17 se pueden apreciar los datos de temperatura que se recabaron directamente en campo.

6.3.5.2 Conductividad eléctrica

Existe una relación entre la conductividad eléctrica (CE) y la cantidad de sales disueltas en el agua, aunque no es lineal, da una idea de la calidad del agua (Peña Diaz, 2006).

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad de un material o sustancia para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él (Alvarez Rivera, et al., 2005). Esta es expresada en µohm/cm y multiplicada por 0.7 da el total de sales disueltas (STD) en mg/l en el agua, cuando la temperatura es de 25 ^{0}C (Davis & DeWiest, Hydrogeology, 1966). La conductividad eléctrica que fue medida *in situ* se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17*. Datos de CE, SDT, Temperatura y pH obtenidos en campo*

ID	CE µohm/cm	SDT	TEMP ^{0}C	PH	ID	CE µohm/cm	SDT	TEMP ^{0}C	PH	ID	CE µohm/cm	SDT	TEMP ^{0}C	PH
1	168	118	25.3	8.2	10	372	260	22.5	7.2	19	437	306	21.6	7.0
2	252	177	23.1	7.7	11	278	197	24.4	7.9	20	261	184	23.9	7.6
3	404	280	23.7	7.6	12	377	263	20.6	7.7	21	349	245	20.6	7.7
4	272	194	23.3	7.5	13	376	263	23.4	8.0	22	259	250	21.7	7.7
5	427	300	23.0	7.2	14	375	265	23.2	7.9	23	404	280	21.1	7.2
6	333	234	23.7	7.7	15	345	241	21.3	7.2	24	259	182	21.5	7.5
7	368	258	24.6	7.6	16	290	204	22.3	7.4	25	252	176	21.2	7.3
8	369	260	22.1	7.3	17	364	256	23.0	7.5	26	287	200	24.1	7.9
9	505	353	22.3	7.3	18	382	267	21.5	7.3					

6.3.5.3 Planos de isolíneas de Sólidos Disueltos Totales

El termino SDT (TDS, en inglés) describe la cantidad total de sales disueltas en el agua. Los SDT y la conductividad eléctrica están estrechamente relacionadas. Cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua mayor será el valor de conductividad eléctrica. La mayoría de los sólidos que permanecen en el agua subterránea tras una filtración son iones disueltos.

La presencia de los SDT es un buen parámetro para identificar áreas con mayores cargas iónicas. En el mapa de la Figura 45 se observan los valores de este parámetro que en general son bastante bajos, aunque existen dos áreas con mayor presencia de SDT, una al sureste en los pozos de agua para uso público urbano y otra cercana a la Col. Rodrigo M. Quevedo.

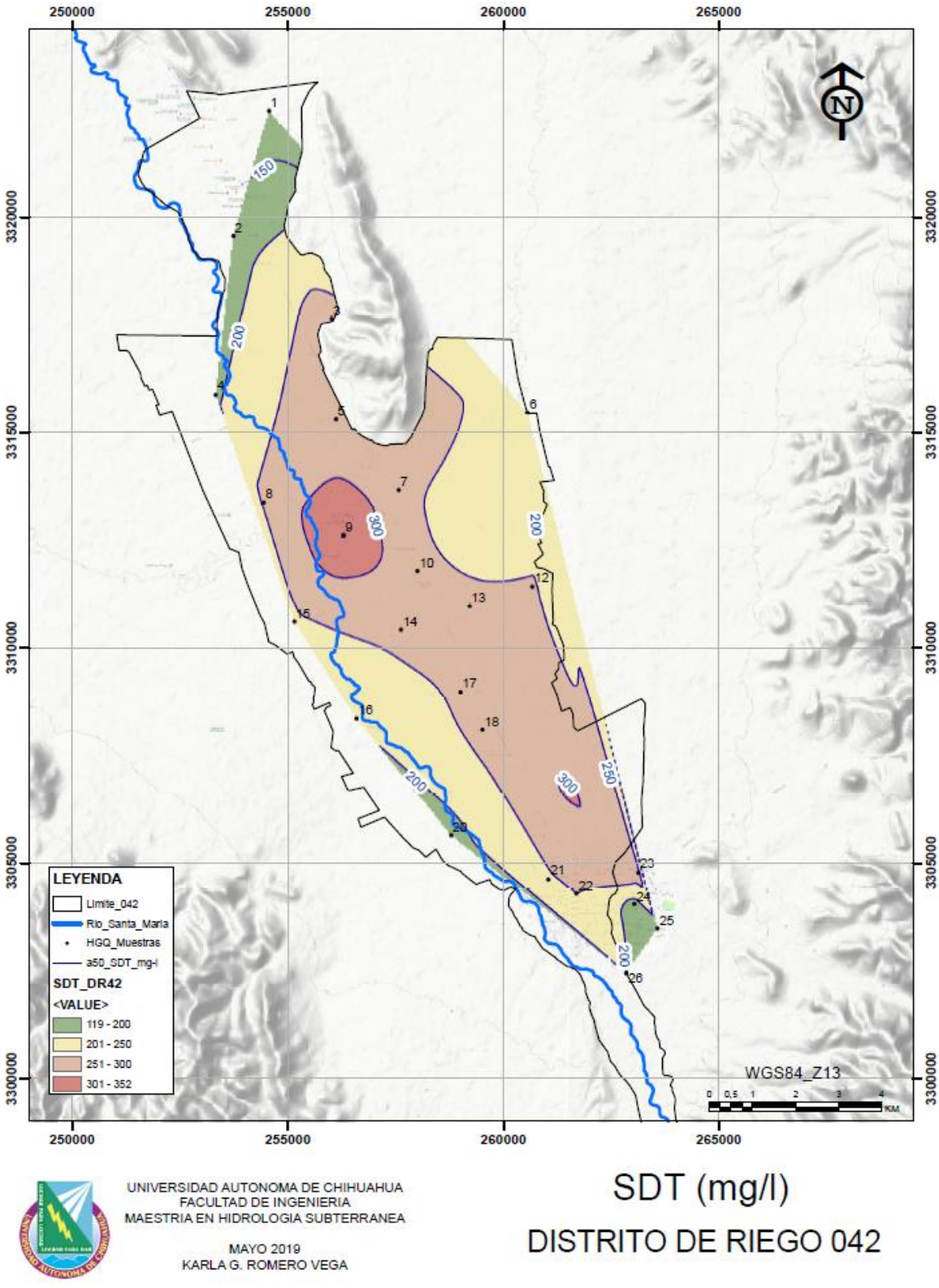


***Figura 45**. Distribución de concentración de los SDT en el DR 042.*

6.3.6 Hidrogeoquímica del área de estudio

Para la aplicación de los métodos hidrogeoquímicos en el estudio de calidad del agua, es necesario tomar en cuenta el balance hídrico y parámetros geoquímicos que caractericen a cada sistema (Fagundo & Gonzalez, Hidrogeoquímica, 2005).

Los factores químico-físicos están regidos por las leyes termodinámicas que controlan la disolución de los minerales, estos factores desempeñan un papel importante en la forma en que las aguas naturales adquieren su composición química (Fagundo & Gonzalez, Hidrogeoquímica, 2005).

La composición química del agua refleja, en parte, el medio geológico a través del cual circula. La concentración de los componentes depende principalmente del tiempo que ésta permanece en contacto con las rocas apartadoras; cuanto más prolongado es el contacto, mayor es la salinidad total o la concentración de algún elemento en específico. También depende de la velocidad del flujo del agua y de la distancia recorrida por la misma. Conforme aumente la profundidad, las condiciones favorecen más a la solución de algunos componentes por su menor pH y contenido de oxígeno en la roca (Custodio & Llamas, 2001).

El sílice está presente generalmente en las rocas ígneas y éstas generalmente son oxidadas por el agua provocando óxidos de silicio que son lo que predominan en las aguas subterráneas. Los mayores cationes y aniones encontrados en el agua subterránea son el calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonato, sulfatos y los cloruros (Driscoll, 1986). Tales datos dejan en evidencia que en cualquier parte de la geografía están presentes los minerales ya sea en forma aislada o en forma de roca, por lo que, al contar con aguas subterráneas el ambiente geológico siempre influenciará las características de ésta.

6.3.6.1 Clasificación de las muestras por su composición química

La representación gráfica de los datos hidrogeoquímicos constituye una herramienta de trabajo muy eficiente en la interpretación de las propiedades del agua, así como para hacer comparaciones. También permite ver con facilidad el comportamiento y evolución de un

agua en un territorio determinado y a través del tiempo (Fagundo & Gonzalez, Hidrogeoquímica, 2005).

Con los resultados obtenidos del balance iónico de las 26 muestras analizadas se lograron identificar 3 grupos de agua con características similares, los cuales se muestran en los diagramas de Piper y Schöeller y se describen a continuación.

Grupo 1. Aguas Bicarbonatadas Sódicas (Na-HCO_3^-)

Cinco son las muestras que han quedado clasificadas mediante los diagramas de Collins, Piper y Schoeller (Figuras 46, 47 y 48) como agua Bicarbonatada Sódica. Dentro del área de estudio, su localización se puede dividir en dos áreas, una en la porción sureste del DR 042 y dos en la parte noroeste. Este grupo se encuentra bien definido en el porcentaje de cationes ya que todas las muestras exceden en sodio el 50% del valor de los cationes. La muestra con mayor concentración de Na es la muestra 1 al Norte del DR 042 en la localidad de Abdenago C. García.

En el diagrama de Piper las muestras aparecen agrupadas en la parte inferior izquierda del rombo. En el diagrama de Schöeller se ve cómo el comportamiento de cationes y aniones tienen un desarrollo similar.

***Tabla 18**. Clasificación de agua según su contenido iónico*

ID	% Na^{+}	% K^{+}	% Ca^{+2}	% Mg^{+2}	Valor Máximo	Catión Dominante	% Cl^{-}	% $SO^{-}_{2}{}_{4}$	% HCO^{-}_{3}	% NO_3	% F^{-}	Valor Máximo	Anión Dominante	% Error	Tipo de Agua	Clasificación
1	78.9	0.8	10.2	10.1	78.9	Na	6.6	5	83.6	1.3	3.4	83.6	HCO-3	-2.1	Na-Bicarbonatos	GRUPO_1
2	36.9	1	31.1	31	36.9	Na-Ca-Mg	1.1	4.6	83.9	7.4	3	83.9	HCO-3	18.2	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
3	35.6	0.8	31.9	31.7	35.6	Na-Ca-Mg	3.9	4.3	83.3	7.1	1.5	83.3	HCO-3	15.8	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
4	51.7	0.8	23.8	23.6	51.7	Na	4.8	6.8	81.8	3.9	2.7	81.8	HCO-3	13.3	Na-Bicarbonatos	GRUPO_1
5	33.2	0.9	33	32.8	33.2	Na-Ca-Mg	1.7	4.5	81.6	10.9	1.3	81.6	HCO-3	15.4	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
6	47.3	1.1	25.9	25.8	47.3	Na-Ca-Mg	4.5	4.5	81.2	7.6	2.2	81.2	HCO-3	13.6	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
7	36.7	1	31.2	31.1	36.7	Na-Ca-Mg	0.9	4.3	76.3	9.9	8.5	76.3	HCO-3	14.2	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
8	37.3	0.8	31	30.9	37.3	Na-Ca-Mg	6.5	5.1	80.1	6.3	2	80.1	HCO-3	16.8	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
9	30.1	1	34.5	34.3	34.5	Ca-Mg-Na	4.7	5.4	79.1	9.8	1.1	79.1	HCO-3	22.1	Ca-Mg-Na-Bicarbonatos	GRUPO_3
10	37.1	0.8	31.1	31	37.1	Na-Ca-Mg	7.4	4	77.9	8.9	1.7	77.9	HCO-3	15.8	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
11	44.6	2.5	26.6	26.4	44.6	Na-Ca-Mg	5.2	4.5	78	9.6	2.7	78	HCO-3	13.7	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
12	39	0.7	30.3	30	39	Na-Ca-Mg	1	4.8	82.3	4	7.9	82.3	HCO-3	14.7	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
13	38.3	0.8	30.5	30.4	38.3	Na-Ca-Mg	2.1	4.6	81	10.5	1.8	81	HCO-3	14	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
14	37.2	0.8	31.1	30.9	37.2	Na-Ca-Mg	2.5	4.1	81.7	10	1.7	81.7	HCO-3	17	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
15	40.9	2.8	28.2	28.1	40.9	Na-Ca-Mg	4.8	6	81.9	4.7	2.5	81.9	HCO-3	20.7	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
16	47	0.8	26.1	26	47	Na-Ca-Mg	3.5	5.4	83.4	5	2.8	83.4	HCO-3	16.8	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
17	38.3	1.6	30.1	30	38.3	Na-Ca-Mg	4.1	4.3	80.3	9.4	1.9	80.3	HCO-3	16.7	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
18	39.5	0.7	30	29.8	39.5	Na-Ca-Mg	2.5	4.6	83	7.9	2.1	83	HCO-3	17.9	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
19	31.7	1.4	33.6	33.4	33.6	Ca-Mg-Na	4.2	4.3	82.7	7.2	1.6	82.7	HCO-3	23	Ca-Mg-Na-Bicarbonatos	GRUPO_3
20	48.1	1	25.5	25.4	48.1	Na-Ca-Mg	4.5	5.3	83.8	3.7	2.7	83.8	HCO-3	8.8	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2
21	31.2	0.8	34.1	33.9	34.1	Ca-Mg_Na	6.3	4.5	80.6	6.7	1.8	80.6	HCO-3	16	Ca-Mg_Na-Bicarbonatos	GRUPO_3
22	27.4	1.2	35.7	35.8	35.8	Mg-Ca-Na	4.9	4.4	83.5	5.6	1.6	83.5	HCO-3	14.1	Mg-Ca-Na-Bicarbonatos	GRUPO_3
23	64.1	0.8	17.6	17.5	64.1	Na	2.5	6.7	85.3	2.5	3.1	85.3	HCO-3	16.5	Na-Bicarbonatos	GRUPO_1
24	63.4	0.7	18	17.9	63.4	Na	6.1	6.7	82.8	1.6	2.9	82.8	HCO-3	11.1	Na-Bicarbonatos	GRUPO_1
25	65.6	0.6	16.9	16.9	65.6	Na	2.9	6.5	86.7	0.7	3.2	86.7	HCO-3	12.7	Na-Bicarbonatos	GRUPO_1
26	41.8	1	28.6	28.5	41.8	Na-Ca-Mg	2.5	3.4	87.7	5.1	1.2	87.7	HCO-3	-15.7	Na-Ca-Mg-Bicarbonatos	GRUPO_2

Es posible que la marcada presencia del Na en estas muestras se deba al intemperismo de las rocas ígneas presentes en los sistemas montañosos que circundan la zona, que da como resultado la presencia de arcillas, así como la posibilidad de reacciones de intercambio iónico en ellas.

Tabla 19. *Grupo de agua 1, Aguas Bicarbonatadas Sódicas*

ID_HGQ	Nombre del Pozo	Tipo Aprovechamiento	Localización	Tipo de Agua
1	61L	Pozo agrícola	DR_042	Na-Bicarbonatos
4	9P	Pozo agrícola	DR_042	Na-Bicarbonatos
23	JMAS 1	Público urbano	Buenaventura. Chamizal	Na-Bicarbonatos
24	JMAS 3	Público urbano	Buenaventura. Villas del sol	Na-Bicarbonatos
25	JMAS 4	Público urbano	Buenaventura. Progreso	Na-Bicarbonatos

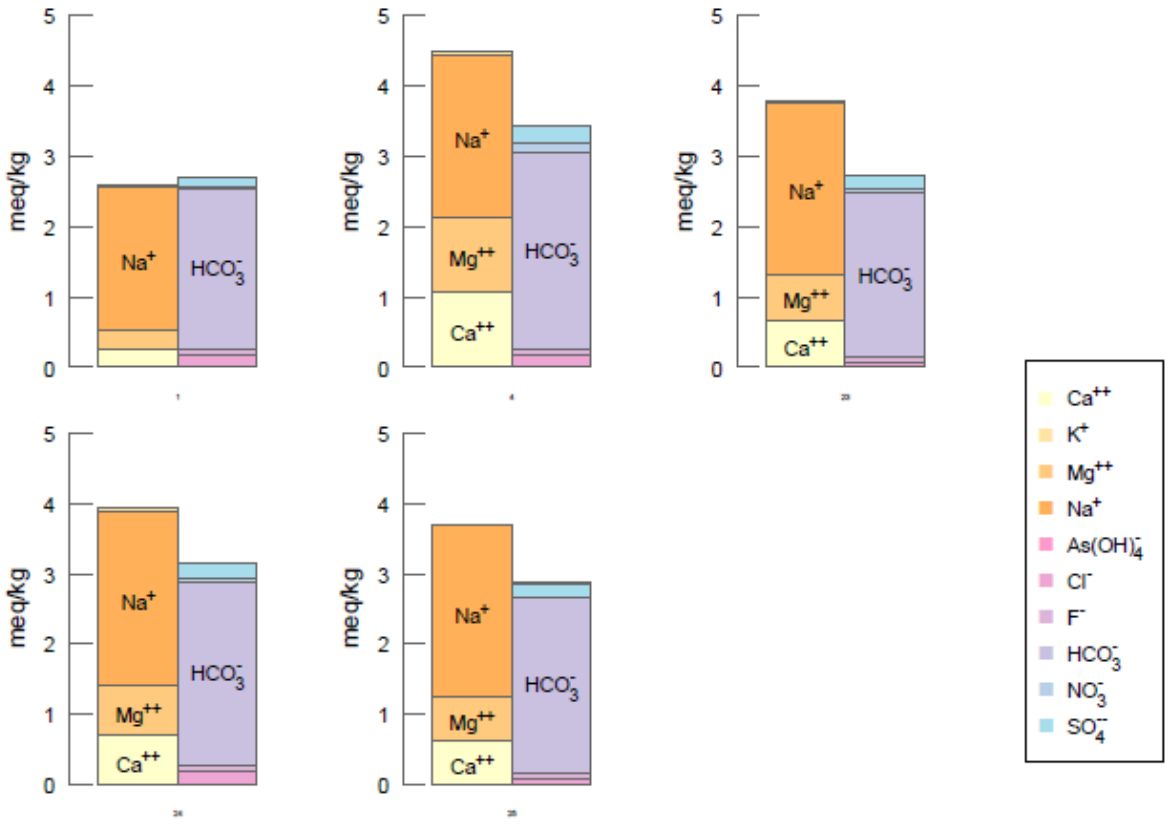


Figura 46*. Diagramas de Collins correspondientes al Grupo 1.*

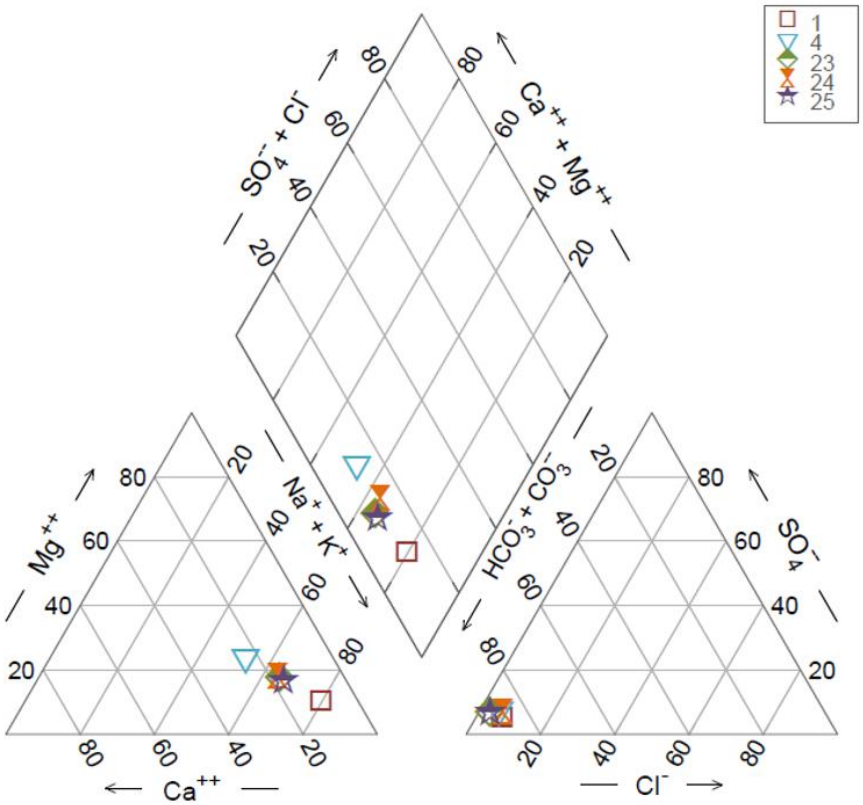


Figura 47. *Diagrama de Piper correspondiente al Grupo 1*

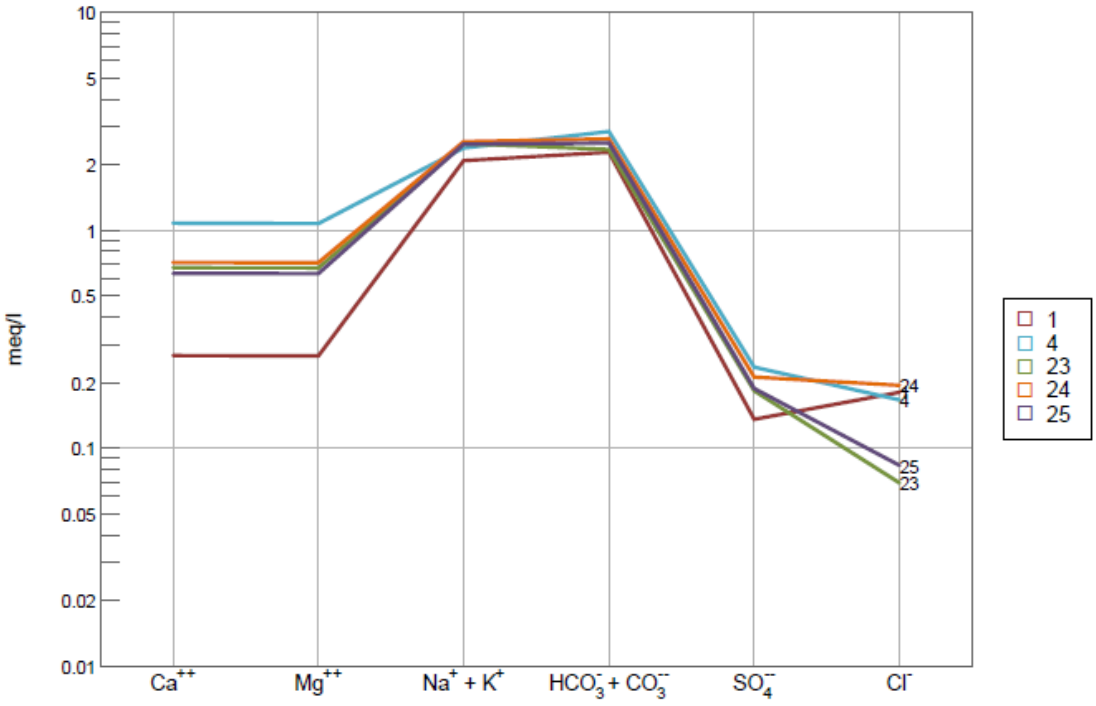


Figura 48*. Diagrama de Schöeller correspondiente al Grupo 1.*

Grupo 2. Aguas Bicarbonatadas Sódicas Cálcicas Magnésicas (Na-Ca-Mg-HCO_3^-)

En este grupo se encuentran la mayor cantidad de muestras, como puede observarse en las figuras 49, 50 y 51. Se denomina de esta manera basados en el porcentaje de concentración que contiene cada muestra y se asigna el nombre de mayor a menor concentración de cationes. Nuevamente el catión dominante es el Na, sin embargo, en menor proporción con respecto las muestras del Grupo 1. Los porcentajes de los iones Ca^{+2} y el Mg^{+2} son muy similares y en algunas ocasiones la diferencia entre un valor y otro llega a ser menor al 1% por lo que, a pesar de ser una constante en concentración como cationes secundarios, la discrepancia entre ellos es mínima.

En el diagrama de Piper se visualiza fácilmente la distribución de las 17 muestras, pudiendo observar que se encuentran en la porción baja del rombo, pero cercanas a la línea de 60% de la suma (Ca^{+2} + Mg^{+2}). Custodio y Llamas (2001) explican que la presencia de calcio y magnesio en el agua se puede deber a los ataques a rocas con feldespatos y otros silicatos, minerales presentes en las rocas ígneas.

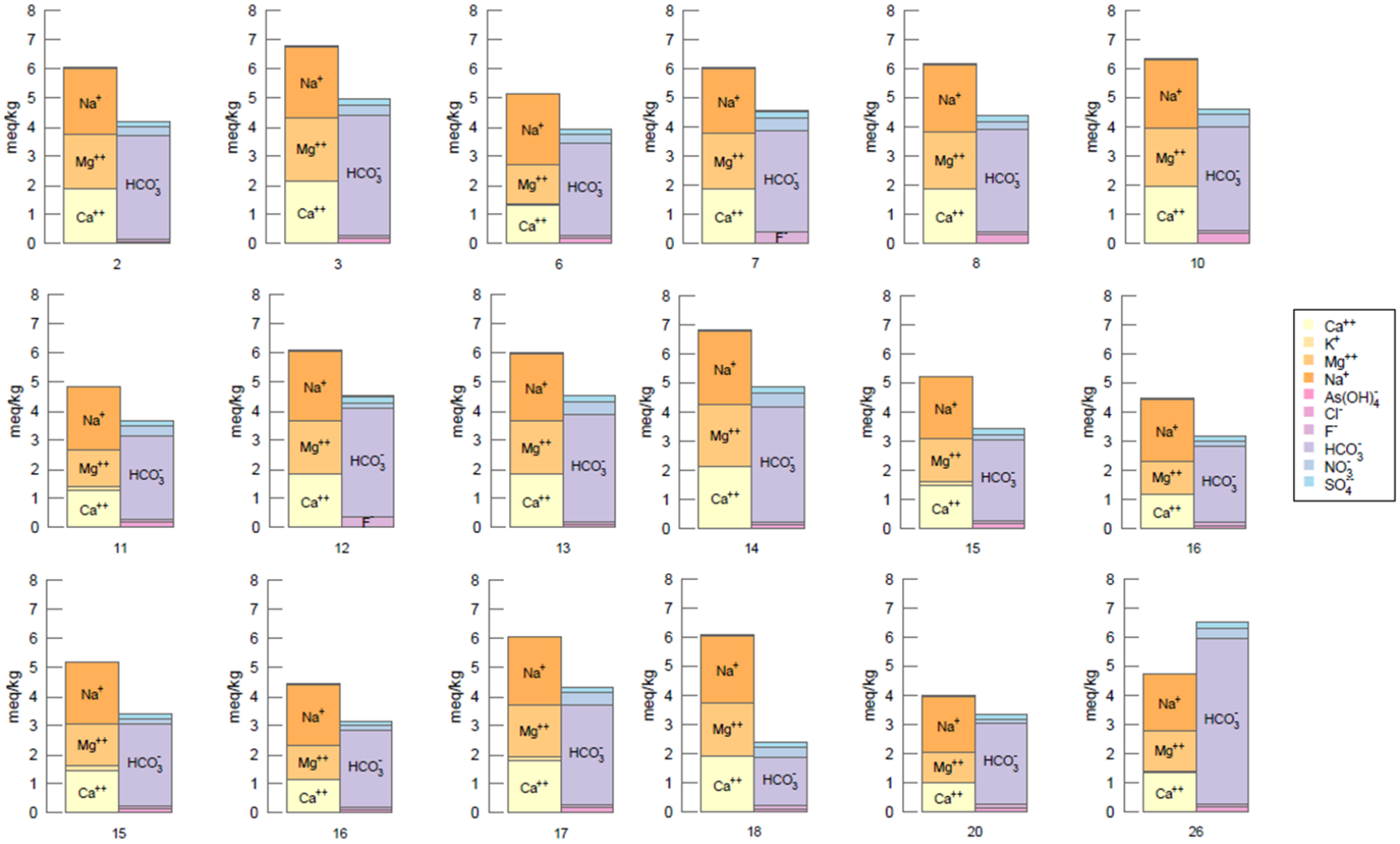


Figura 49. *Diagrama de Collins o barras, muestras del Grupo 2*

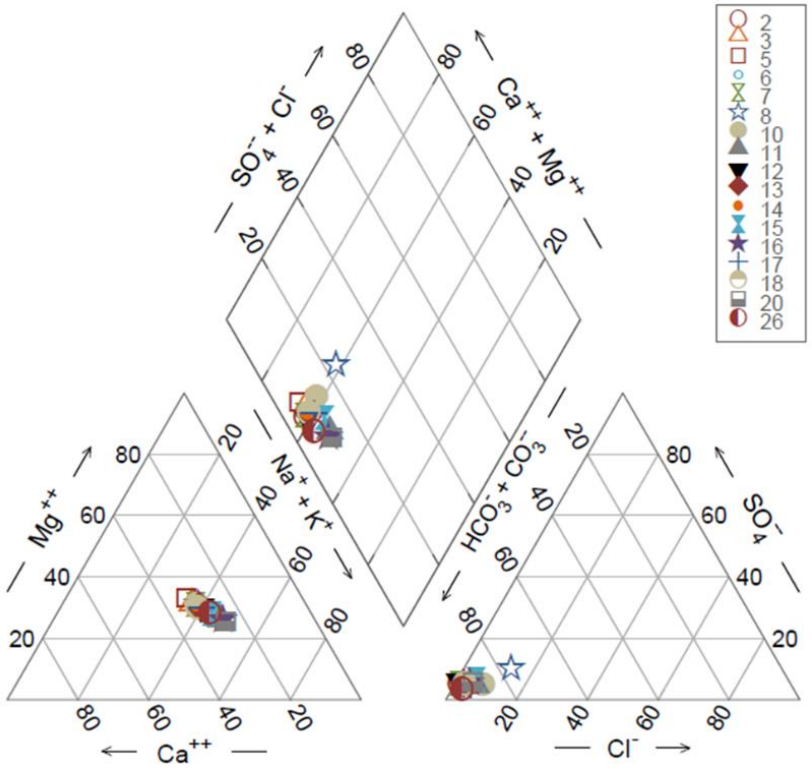


***Figura 50**. Diagrama de Piper correspondiente al Grupo 2*

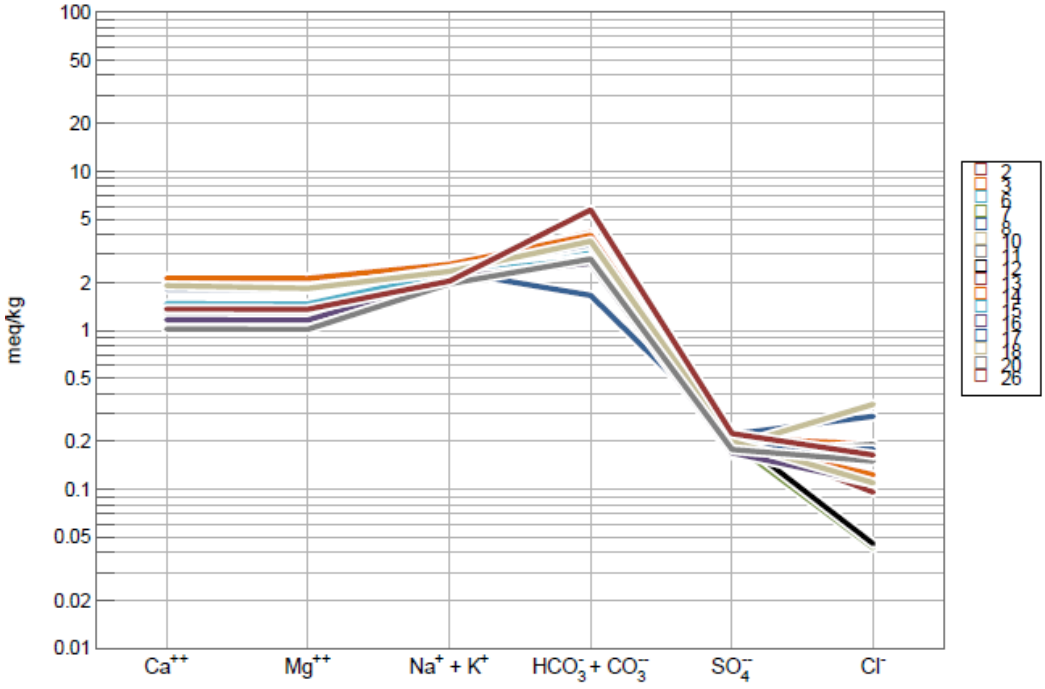


***Figura 51**. Diagrama de Schöeller correspondiente al Grupo 2.*

Grupo 3. Aguas Bicarbonatadas-Mixtas.

Cuatro son las muestras que han quedado dentro de esta clasificación de acuerdo con las figuras 52, 53 y 54. En el área de estudio, su localización corresponde a dos áreas, una en la parte centro-sur del DR 042 y otra en la parte central. Este grupo cuenta con la peculiaridad que los tres cationes principales (Na, Mg, Ca) se encuentran en concentraciones muy similares entre sí. Se denominan de esta manera, ya que no se consideró adecuado separar una sola muestra (Muestra 22) en otro grupo ya que el Magnesio es ligeramente mayor (por aproximadamente 0.2% que el Calcio), adicional a esto, en los diagramas de Piper y Schöeller, las muestras presentan una conducta similar.

En el diagrama de Piper las muestras aparecen agrupadas ligeramente por arriba del 50% del rombo. En el diagrama de Schöeller se puede apreciar que el comportamiento de cationes y aniones es similar.

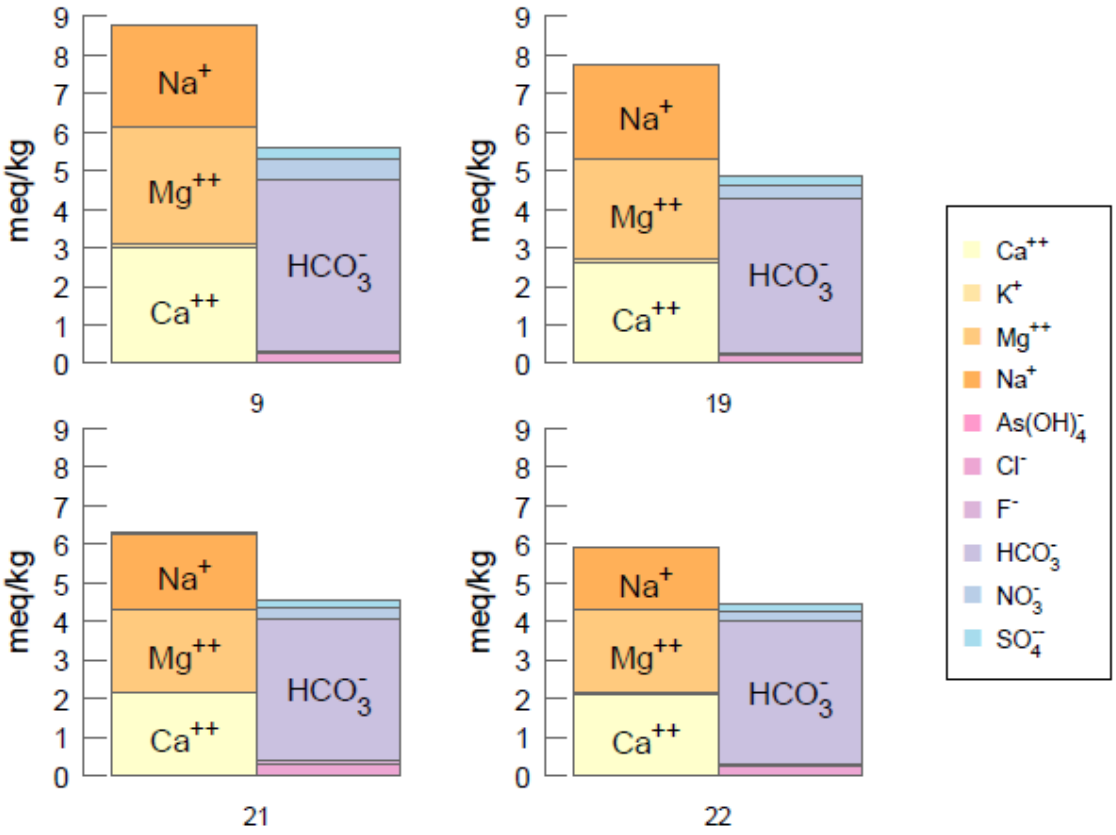


***Figura 52**. Diagrama de Collins o barras del Grupo 3*

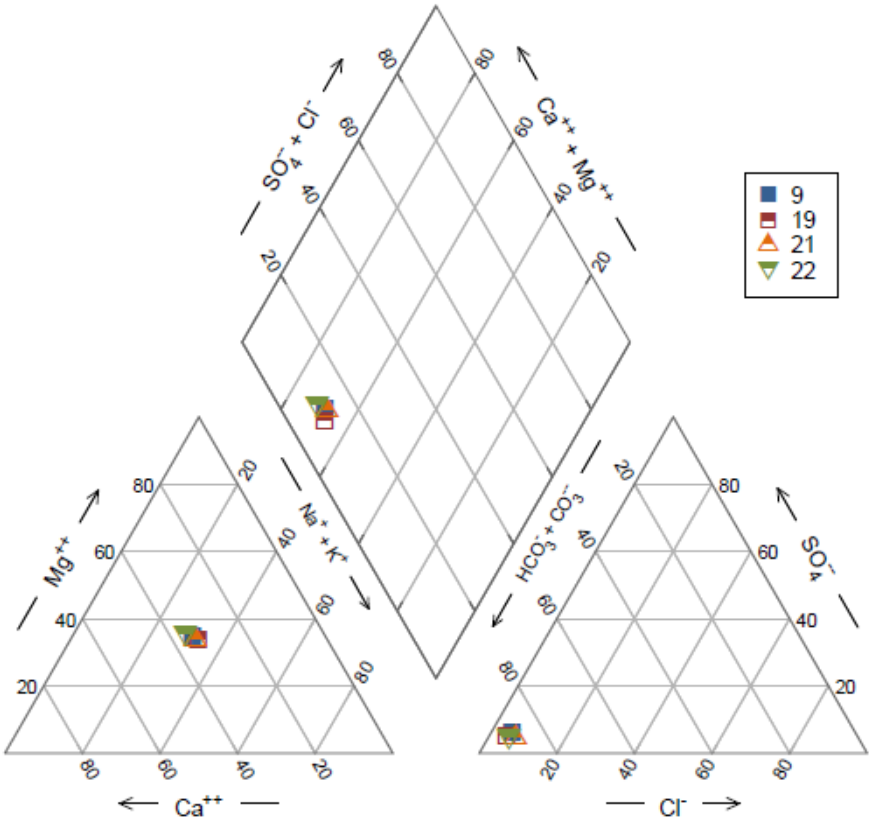


Figura 53. *Diagrama de Piper correspondiente al Grupo*

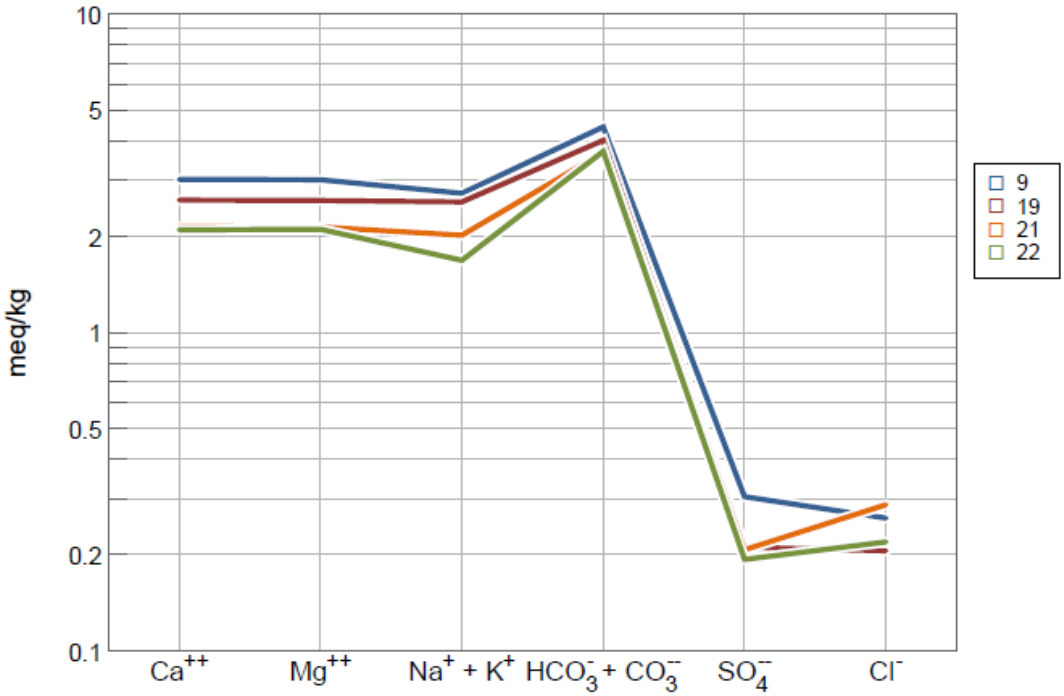


Figura 54. *Diagrama de Schoeller correspondiente al Grupo 3*

6.3.6.2 Clasificación de las muestras mediante diagramas de Stiff

El diagrama propuesto por Stiff en 1951 (Davis & DeWiest, 1966) en temas relacionados con la caracterización de aguas, permite apreciar rápidamente los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y a las variaciones de las relaciones entre cationes o aniones (Carreón, Ramírez, & Vega, 1995). El diagrama de Stiff tiene la ventaja de poder plasmarse fácilmente en un plano, lo que resulta sumamente útil para hacer rápidas comparaciones cualitativas (Davis & DeWiest, 1966).

En el mapa de la figura 55 se pueden apreciar los tres grupos que se describieron anteriormente. Aún sin tomar en cuenta los antecedentes descritos, dicho mapa facilita la agrupación de muestras ya que los polígonos graficados de cada muestra se ubican geográficamente en el mismo y representados por "formas similares", las cuales son fáciles de asociar. Con los análisis realizados anteriormente se han coloreado los polígonos dependiendo el grupo en el que se clasificó, quedando el Grupo 1 en color rojo; Grupo 2 en color azul y Grupo 3 en color verde.

6.3.6.3 Plano de concentración de iones principales del Distrito de Riego 042

Los mapas que se muestran a continuación se realizaron con interpolaciones desarrolladas con el software ArcMap con el método "*Natural Neighbor*" o de vecindad natural. Utiliza un algoritmo que encuentra el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre éstas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor (Sibson, 1981).

También se conoce como interpolación de Sibson o de "robo de área". Sus propiedades básicas son: que es local, utiliza solo un subconjunto de muestras que circundan a un punto de consulta y asegura que las alturas interpoladas estarán dentro del rango de las muestras utilizadas. No infiere tendencias ni produce picos, depresiones, crestas o valles que no estén ya representados por las muestras de entrada. La superficie pasa por las muestras de entrada y es suave en todas partes, excepto en las ubicaciones de las muestras (http://desktop.arcgis.com/es, 2016).

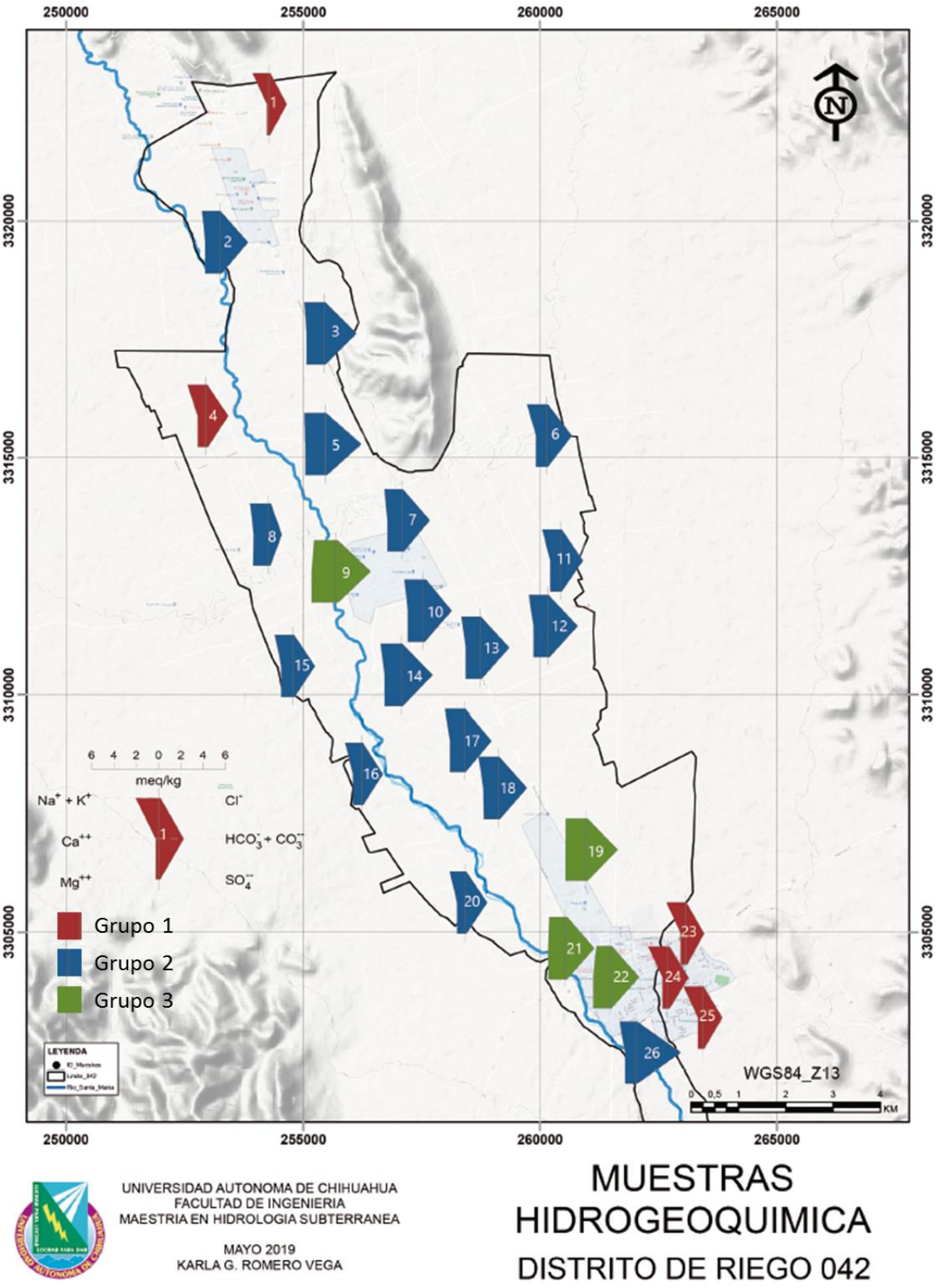


Figura 55. *Mapa de distribución de diagramas de Stiff.*

Los mapas que se presentan a continuación son referentes a iones que definen la clasificación del grupo de agua al que pertenecen y llegan a tener presencia dominante en el agua. Estos iones son el HCO_3^- (Bicarbonato) Ca^{++} (Calcio) y Na^+ (Sodio). Sin embargo, no solamente los iones son elementos prioritarios para estudiar en una caracterización hidrogeológica, es importante también considerar algunos elementos y compuestos como son el Arsénico (As), Flúor (F) y los nitratos (NO_3^-). Estos últimos, considerados parámetros de alto impacto ya que pueden ocasionar efectos adversos en la salud ya que algunas de las muestras colectadas proceden de fuentes que abastecen de agua para el consumo público-urbano de la región.

Bicarbonatos (HCO_3^-)

En capítulos anteriores se ha descrito las posibles fuentes del ion HCO_{3-}, el cual es posible que provenga de la disolución de CO_2 atmosférico o del suelo. También se puede asociar a la disolución de calizas y dolomías ayudada por el CO_2 y/o ácidos naturales (húmicos, oxidación de sulfuro, etc.). En la zona del Distrito de Riego 042 no se tienen antecedentes de aportaciones de CO_2 (reducción de sulfatos, reducción de hierro y aportes magmáticos) el contenido en carbono disuelto permanece constante y muchas veces puede suponerse que el contenido de HCO_3- es casi constante (Custodio & Llamas, 2001), debido a que es el anión dominante en todas las muestras de agua.

El mapa esta realizado con los resultados analíticos proporcionados por el laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la UACH, reportados en mg/l. Con esta información se puede observar dos zonas con mayor concentración (3 muestras) una se encuentra en la parte central de la zona de estudio, las tres por arriba de los 270 mg/l. La Organización Mundial de la Salud en su publicación Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua: metodología pormenorizada de gestión de riesgos para proveedores de agua de consumo edición 2009 no considera los bicarbonatos como un peligro típico que afecte las cuencas de captación.

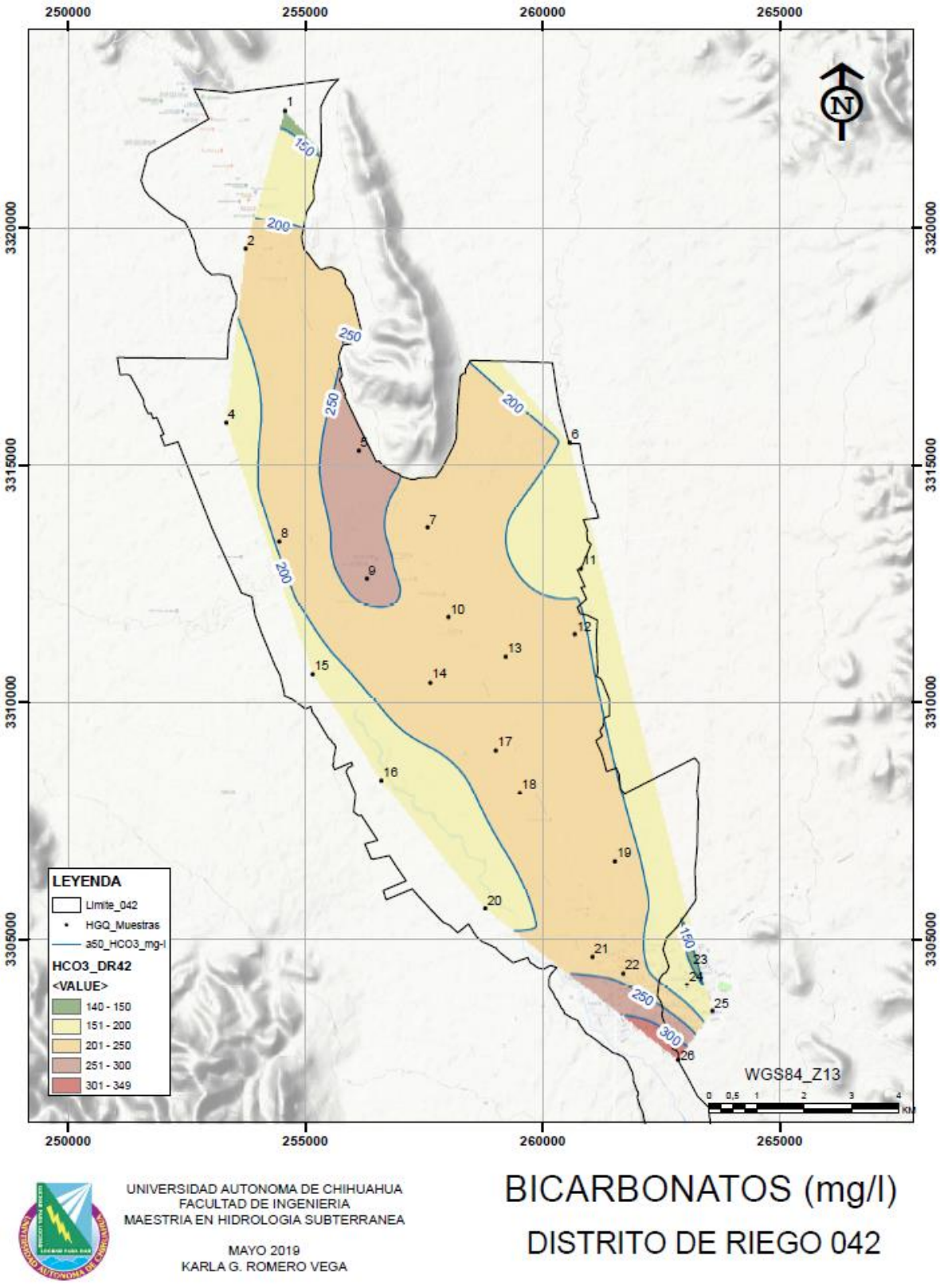


***Figura 56**. Distribución de concentración de HCO3 en el DR 042.*

Calcio (Ca^{+2})

Las concentraciones más elevadas de calcio en el área de estudio (Figura 57) se localiza en el área central del distrito (Pozo JMAS-Col. Quevedo con 61.37 mg/l). Ni la NOM, ni la OMS, describen la presencia de Calcio como un parámetro de monitoreo constante que represente algún riesgo para la salud.

Debido a las características geológicas del área, se asume que la presencia del calcio puede proceder del ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos de las rocas ígneas presentes en la zona. El calcio está frecuentemente en estado de saturación y su estabilidad en solución depende del equilibrio de CO_2 - HCO_3^- – CO_3^{-2}. El calcio puede precipitarse con facilidad y es muy afectado por los cambios iónicos (Custodio & Llamas, 2001).

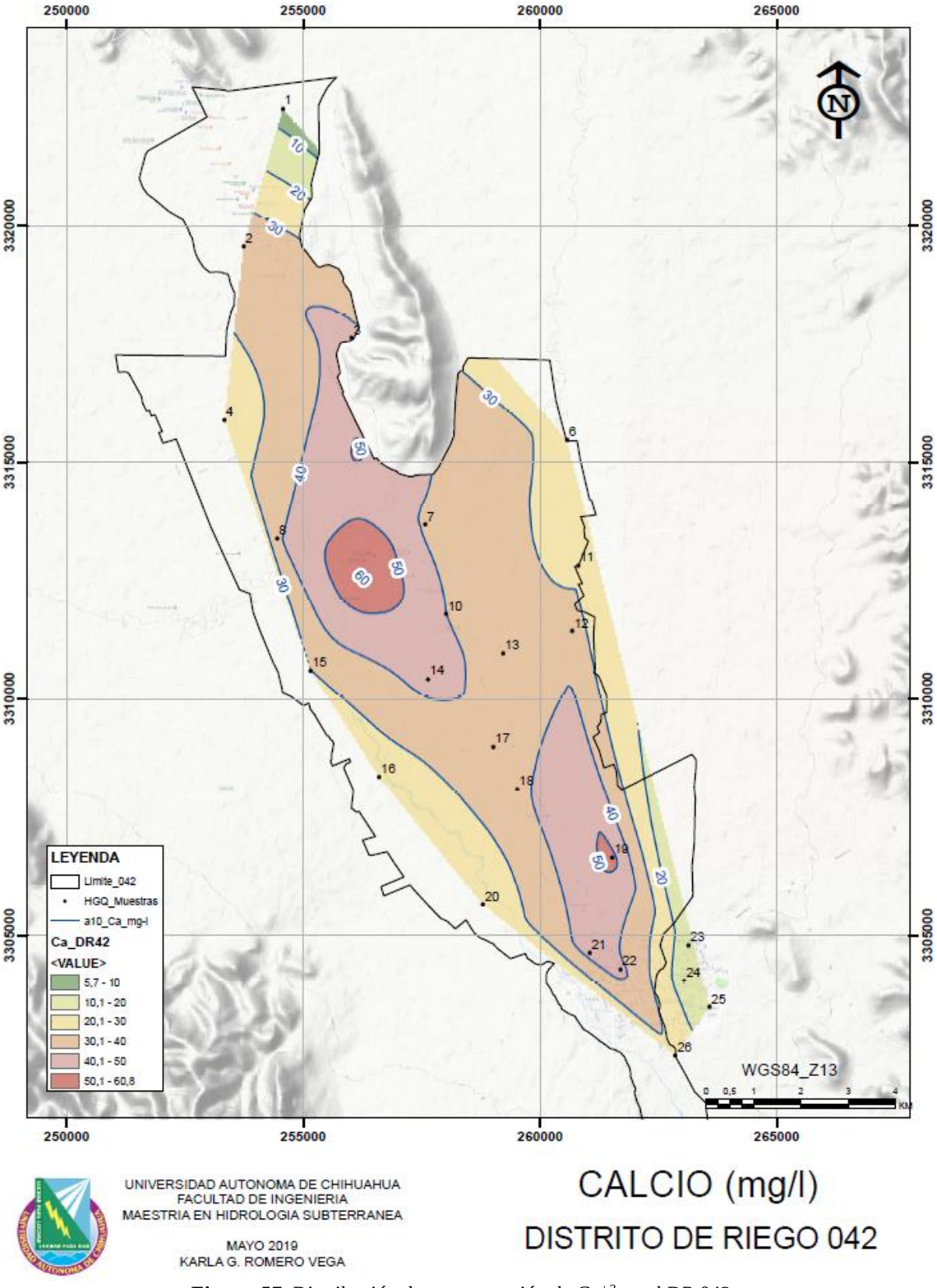


Figura 57. *Distribución de concentración de Ca^{+2} en el DR 042.*

Sodio (Na^+)

Las mayores concentraciones del ion Sodio se encuentran en la porción central con dirección al NW del área de estudio. Los pozos 9, 5 y 14 con valores de 61.58, 59.19 y 59.19, respectivamente.

El umbral gustativo del sodio en el agua depende del anión asociado y de la temperatura de la solución. A temperatura ambiente, el umbral gustativo promedio del sodio es de 200 mg/l aproximadamente. No se ha calculado ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud (Organización Mundial de la Salud, 2006).

El sodio el catión más abundante en el agua de mar y es muy soluble (Custodio & Llamas, 2001), por lo que es muy abundante y común en zonas costeras y en el lavado de sedimentos de origen marino; sin embargo, el área de estudio no presentan antecedentes genéticos este tipo de rocas, por lo que se asume que la presencia del catión Na^+ se debe al ataque de los feldespatos, feldespatoides y otros silicatos, presentes en las rocas ígneas que se encuentran en la zona de estudio y posteriores reacciones de intercambio iónico en las arcillas resultantes.

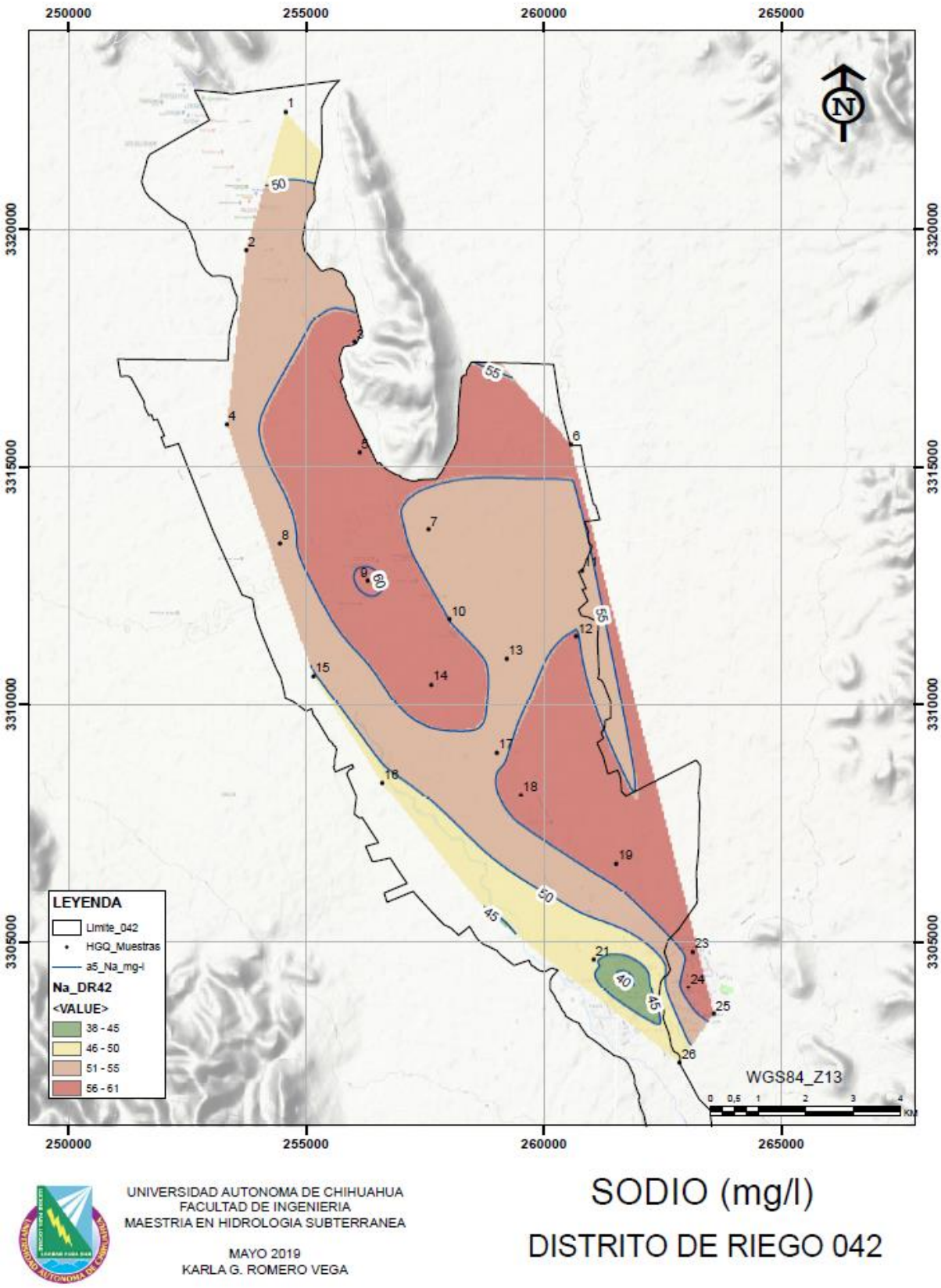


***Figura 58**. Distribución de concentración de Na^+ en el DR 042.*

Nitratos (NO_3^-)

El nitrato es un ion de origen natural que forma parte del ciclo del nitrógeno. El nitrato se utiliza principalmente en fertilizantes inorgánicos. La concentración de nitrato en aguas subterráneas y superficiales suele ser baja, pero puede llegar a ser alta por filtración o escorrentía de tierras agrícolas o debido a la contaminación por residuos humanos o animales como consecuencia de la oxidación del amoniaco y fuentes similares (Organización Mundial de la Salud, 2006).

La presencia de nitratos y nitritos en el agua se ha asociado con la metahemoglobinemia, sobre todo en lactantes alimentados con biberón. La presencia de nitratos puede deberse a la aplicación excesiva de fertilizantes o a la filtración de aguas residuales u otros residuos orgánicos de las aguas superficiales y subterráneas (Organización Mundial de la Salud, 2006). La Norma Oficial Mexicana estipula 10 mg/l, como límite máximo permisible para aguas de consumo humano. El laboratorio encargado de realizar los análisis químicos a las 26 muestras de agua reporta los nitratos en mg/l, la norma marca los límites para dicho parámetro en "Nitratos como N" (nitratos como nitrógeno), por lo que para realizar la comparación fue necesario dividir el valor reportado por el laboratorio entre 4.43. Este valor se obtiene de la división entre el peso molecular del NO_3 (62) y el peso atómico del N (14). La presencia de nitratos en el área de estudio podría estar asociada al uso y manejo de fertilizantes para el desarrollo de la principal actividad económica de la región, agricultura y ganadería. Si bien en los últimos 10 años se ha venido desarrollando el drenaje y el tratamiento de aguas residuales, aun es común el uso de fosas sépticas, lo que también puede producir un aumento en la presencia de nitratos. Sin embargo, aunque estas dos prácticas son comunes en la región, ninguna muestra excede el límite de Nitratos como Nitrógeno marcado por la NOM.

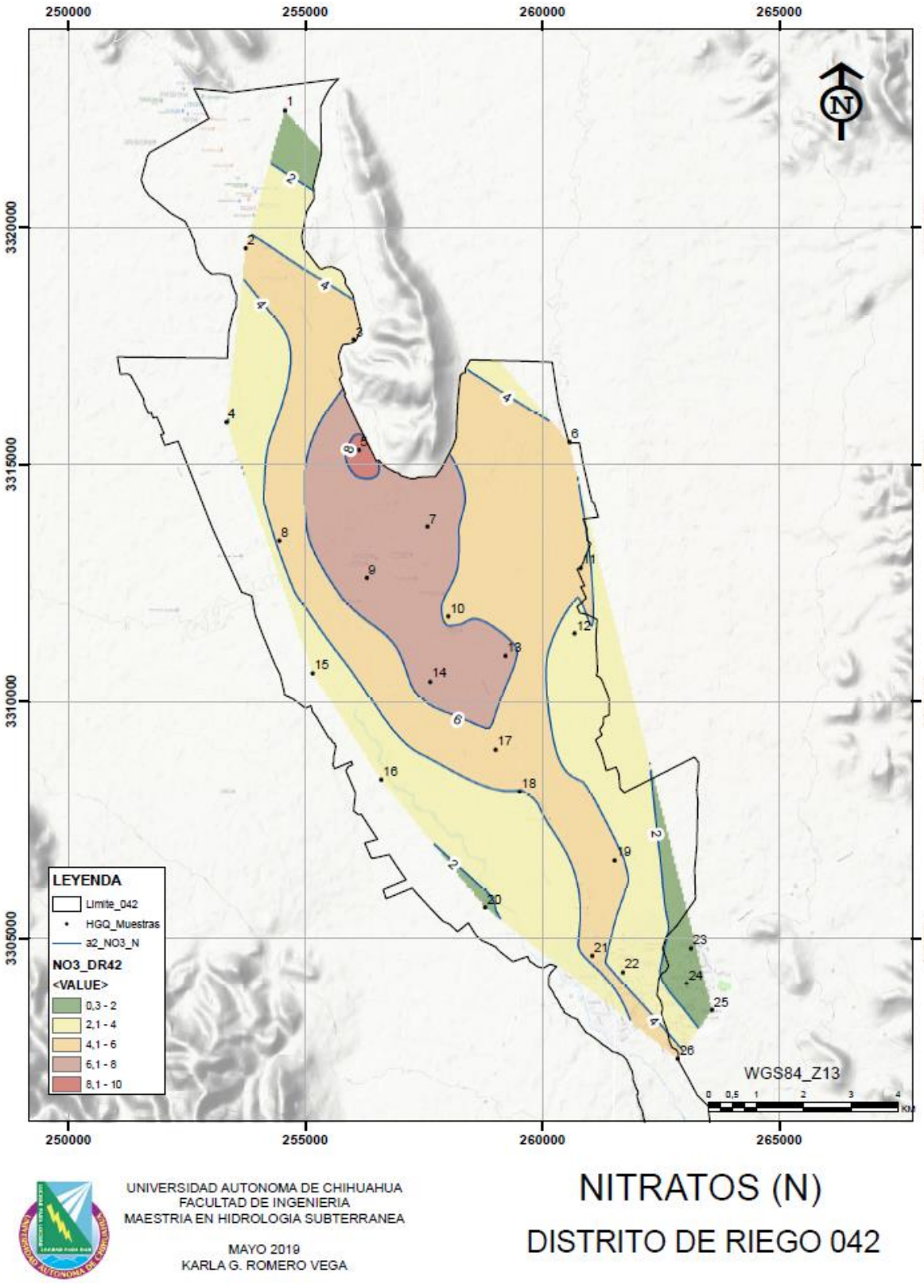


***Figura 59**. Distribución de concentración de NO_3^- como Nitrógeno en el DR 042.*

Fluoruros (F^-)

El contenido de flúor de la corteza terrestre es aproximadamente de 0.3 g/kg y se encuentra en forma de fluoruros en diversos minerales. La mayoría del fluoruro en aguas de consumo es de origen natural (Organización Mundial de la Salud, 2006).

La incorporación del flúor al cuerpo tiene efectos beneficiosos y negativos, los límites de ingesta que producen estos dos efectos opuestos no están muy separados entre sí (www.who.int, 2008). La OMS recomienda el valor de referencia para el fluoruro en el agua potable un límite máximo de 1.5 mg/l (WHO, 1996). En México el flúor está limitado en la norma de agua potable Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 a un valor de 1.5 mg/l.

De las 26 muestras analizadas para el desarrollo de esta investigación, 21 muestras presentan valores por encima de lo estipulado en la NOM como límite máximo permisible para aguas de consumo humano (ver figura 60). Se han llevado a cabo muchos estudios epidemiológicos sobre los posibles efectos adversos resultantes de la ingestión prolongada de fluoruro a través del consumo de agua. Estos estudios demuestran que el fluoruro afecta principalmente a los tejidos óseos (huesos y dientes). En muchas regiones con un índice alto de exposición al fluoruro, éste es una causa significativa de muerte (Organización Mundial de la Salud, 2006). Si bien las muestras exceden el 1.5 establecido por la NOM, la mayoría de los valores se encuentran muy cercanos al límite máximo.

La presencia de flúor en el agua puede deberse a un proceso de disolución de minerales emplazados principalmente en rocas de origen ígneo (aunque falta caracterizarlas para ver si hay topacio, o si se deben a intemperismo de tobas) como las riolitas que se encuentran en zonas aledañas al área de estudio.

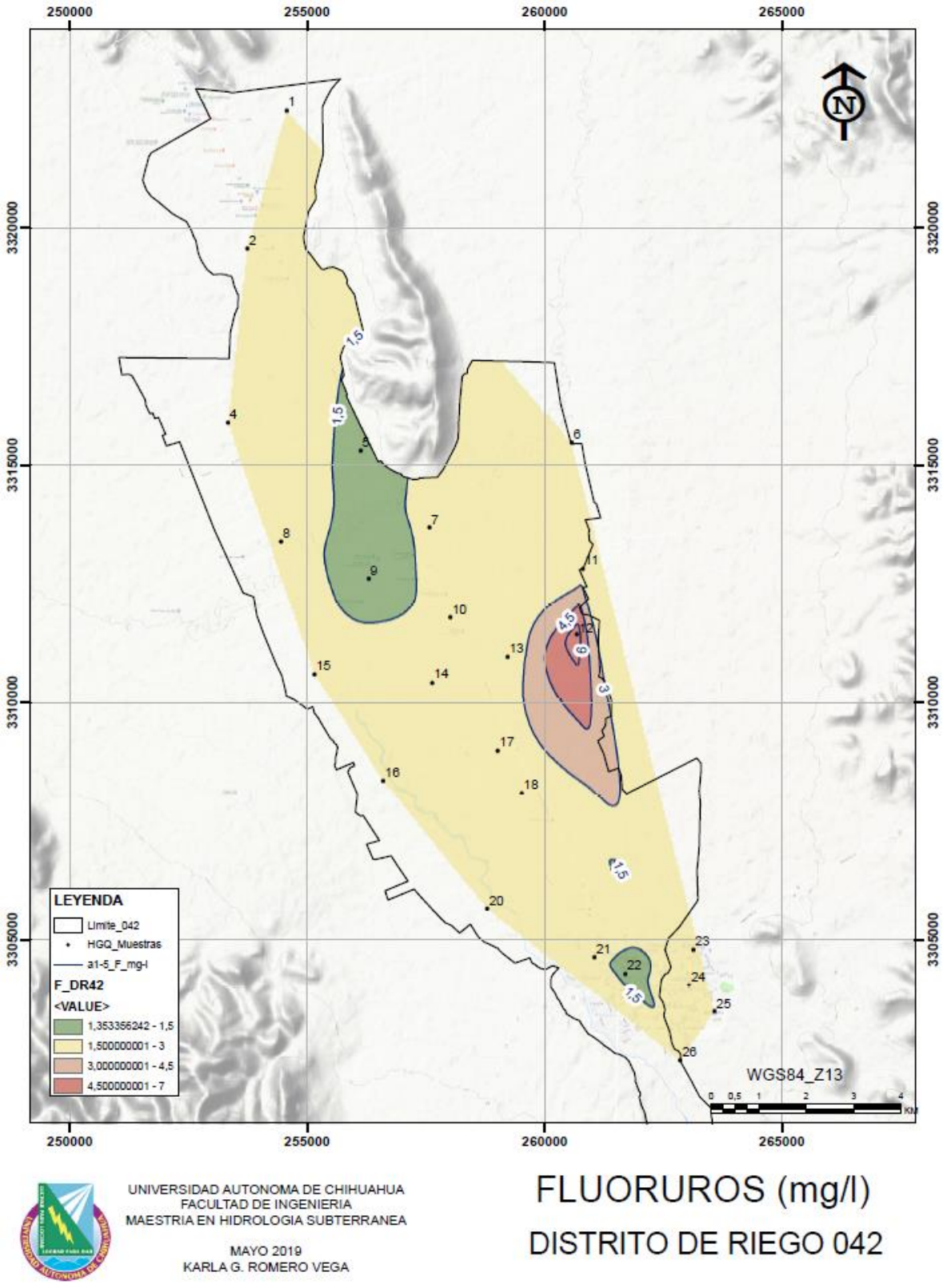


Figura 60. *Distribución de concentración de F^- en el DR 042.*

Arsénico (As)

El arsénico es un elemento distribuido extensamente por toda la corteza terrestre, en su mayoría en forma de sulfuro de arsénico o de arseniatos y arseniuros metálicos (Organización Mundial de la Salud, 2006). El Arsénico forma parte de la estructura química de más de 200 minerales, principalmente asociados a yacimientos minerales ricos en sulfuros, aunque también se encuentra presente en menor proporción en otros minerales formadores de roca; se ha encontrado que las riolitas, además de F^-, también contiene cantidades importantes de arsénico las cuales pueden ser incorporadas en solución durante su contacto con el agua subterránea en condiciones de oxidación (Ortega, 2009).

La principal fuente de arsénico del agua de consumo es la disolución de minerales y menas de origen natural. En algunas zonas, el arsénico del agua de consumo afecta significativamente a la salud, por lo tanto, se considera una sustancia a la que debe darse una prioridad alta en el análisis sistemático de fuentes de agua de consumo. Con frecuencia, su concentración está estrechamente relacionada con la profundidad del pozo (Organización Mundial de la Salud, 2006).

Como se observa en la Tabla 20 y en la figura 61, las muestras 1, 17 y 24, sobrepasan ligeramente el límite máximo permisible, establecido por la NOM, situadas en el norte, centro y sureste del área de estudio respectivamente.

Tabla 20. *Tabla de concentración de As en mg/l*

ID	As mg/l
1	0.030
2	0.004
3	0.003
4	0.01
5	0.001
6	0.009

ID	As mg/l
7	0.005
8	0.004
9	0.001
10	0.006
11	0.007
12	0.002

ID	As mg/l
13	0.005
14	0.005
15	0.003
16	0.006
17	0.026
18	0.002

ID	As mg/l
19	0.002
20	0
21	0.002
22	0.003
23	0.025
24	0.026

ID	As mg/l
25	0.024
26	0.005

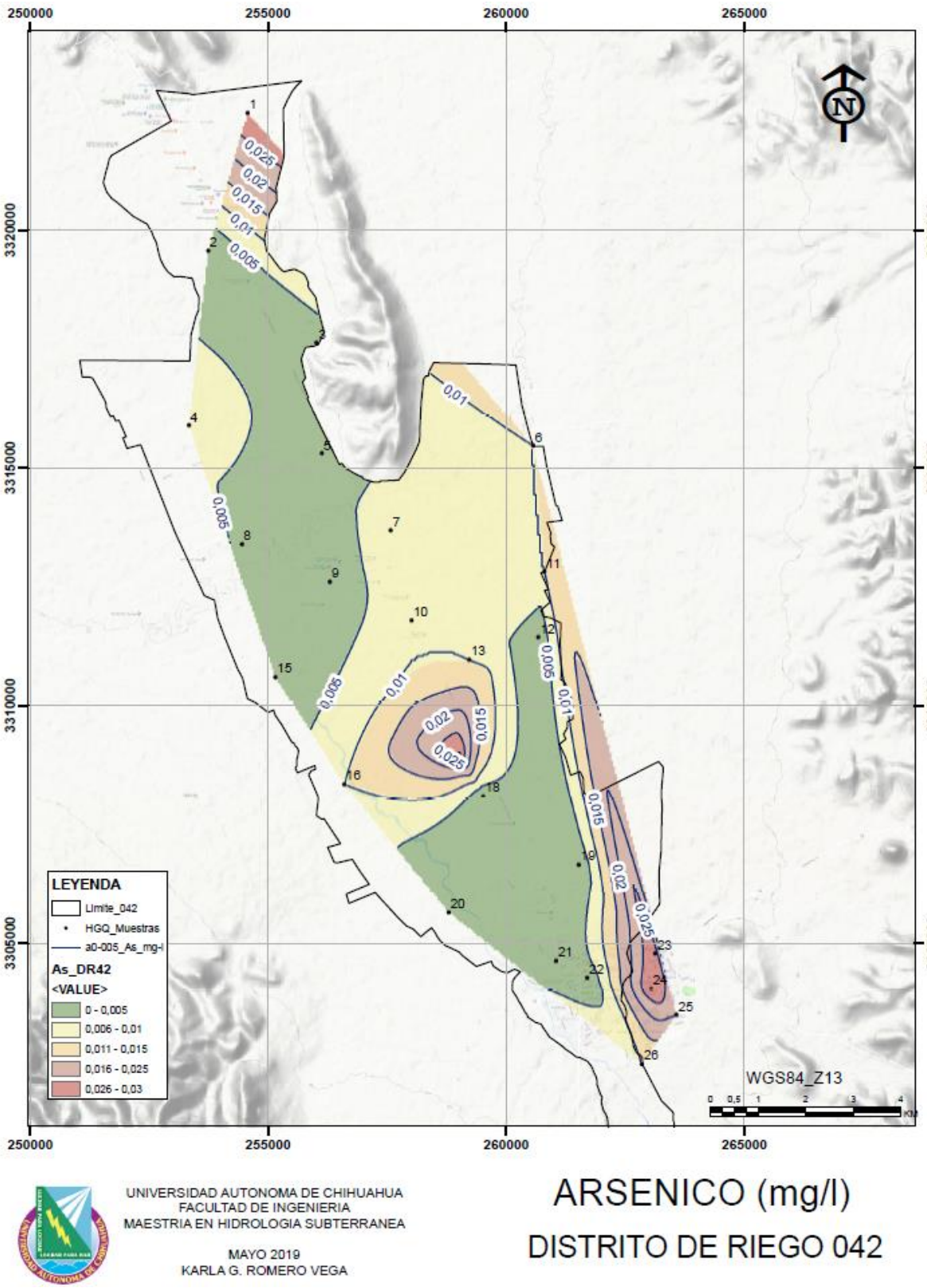


Figura 61. *Distribución de concentración de As en el DR 042.*

6.3.6.4 Evolución de calidad del agua subterránea

Se cuenta con pocos datos históricos que permiten comparar y realizar análisis y/o proyecciones a largo plazo, sin embargo, con los datos disponibles proporcionados por la Junta Central de Agua y Saneamiento de Chihuahua y la tesis llamada "Caracterización hidrogeoquímica y presencia de flúor en la porción noroeste del estado de Chihuahua, México" realizada por la M. I. Alma Y. Precoma, se realizaron gráficos comparativos, de los pozos con información disponible, en su mayoría pozos de uso público-urbano. Se graficaron elementos como flúor, arsénico y los sulfatos y cloruros (figuras 62 a 67). Analizando los datos, no se observa una clara tendencia que permita predecir cambios notables en el comportamiento del elemento respecto al tiempo.

Los primeros datos fueron medidos en lapsos de tiempo de aproximadamente un año entre un dato y otro, sin embargo, tenemos un lapso de aproximadamente diez años sin mediciones hasta las realizadas por esta investigación.

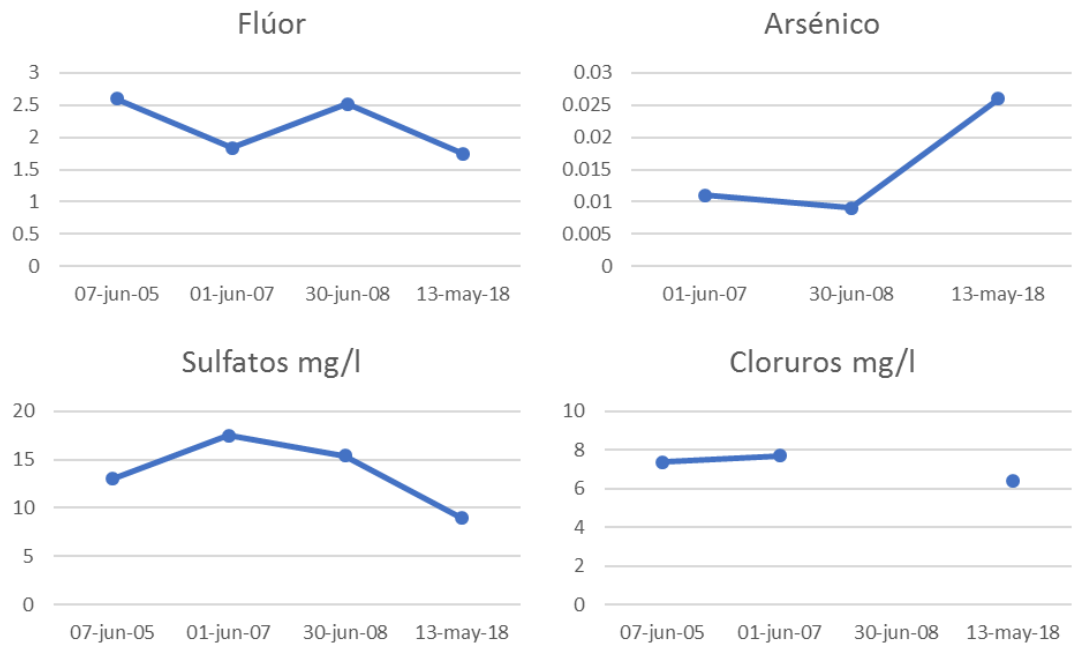


Figura 62. *Gráficas de valores históricos para el pozo No. 7, administrado por la JMAS en la Col. El Carbajal.*

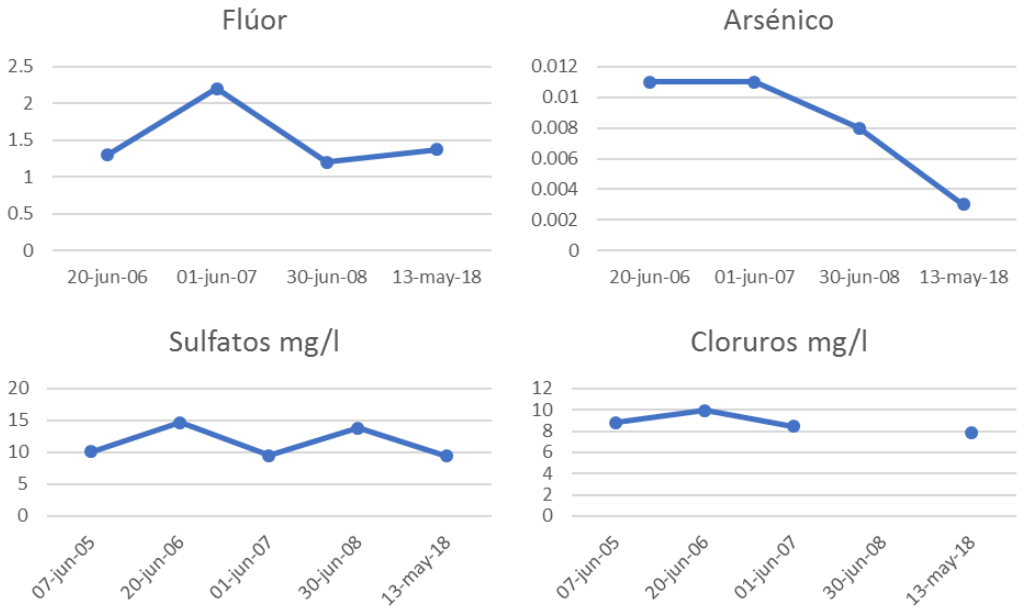


Figura 63. *Gráficas de valores históricos para el pozo No. 22, administrado por la JMAS aledaño a la Primaria M. Guadalupe Quintanilla.*

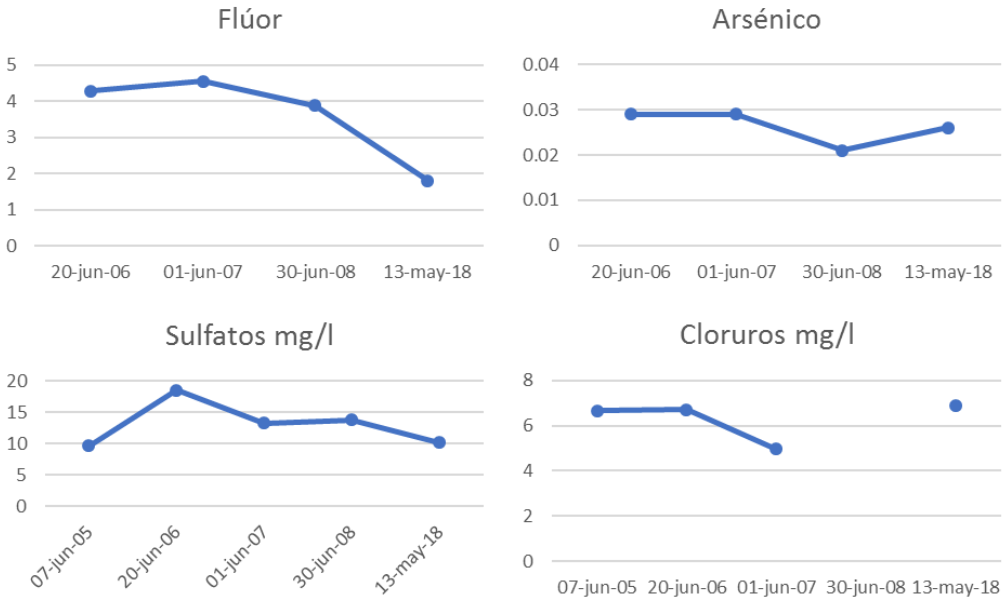


Figura 64. *Gráficas de valores históricos para el pozo No. 13, administrado por la JMAS en la Col. Villas del Sol.*

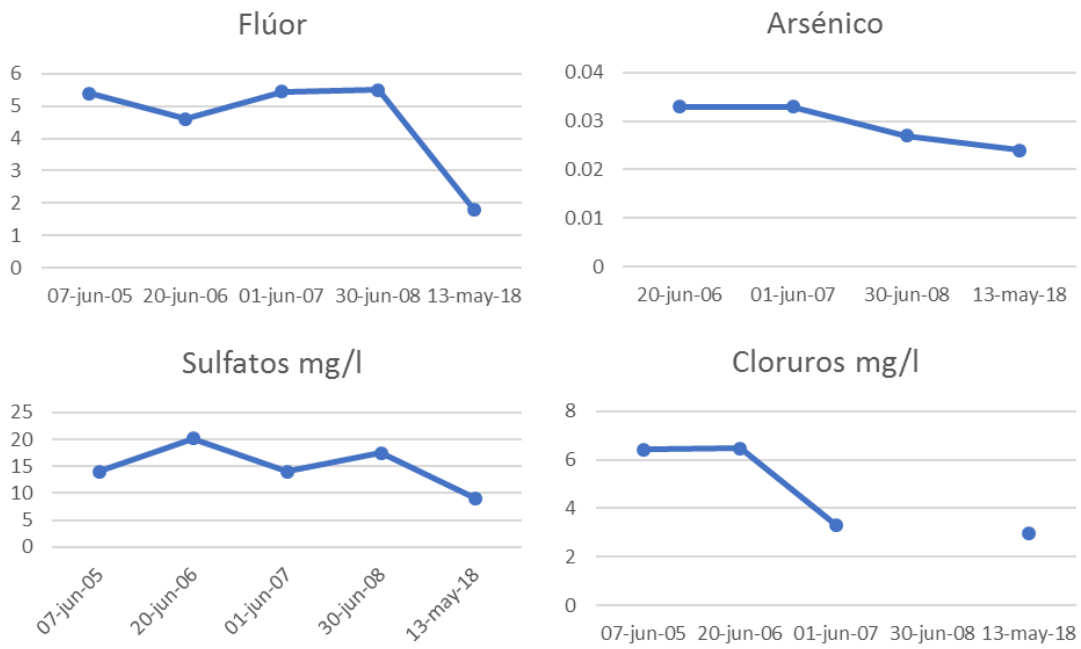


Figura 65. *Gráficas de valores históricos para el pozo No. 23, administrado por la JMAS, en la Col. Progreso.*

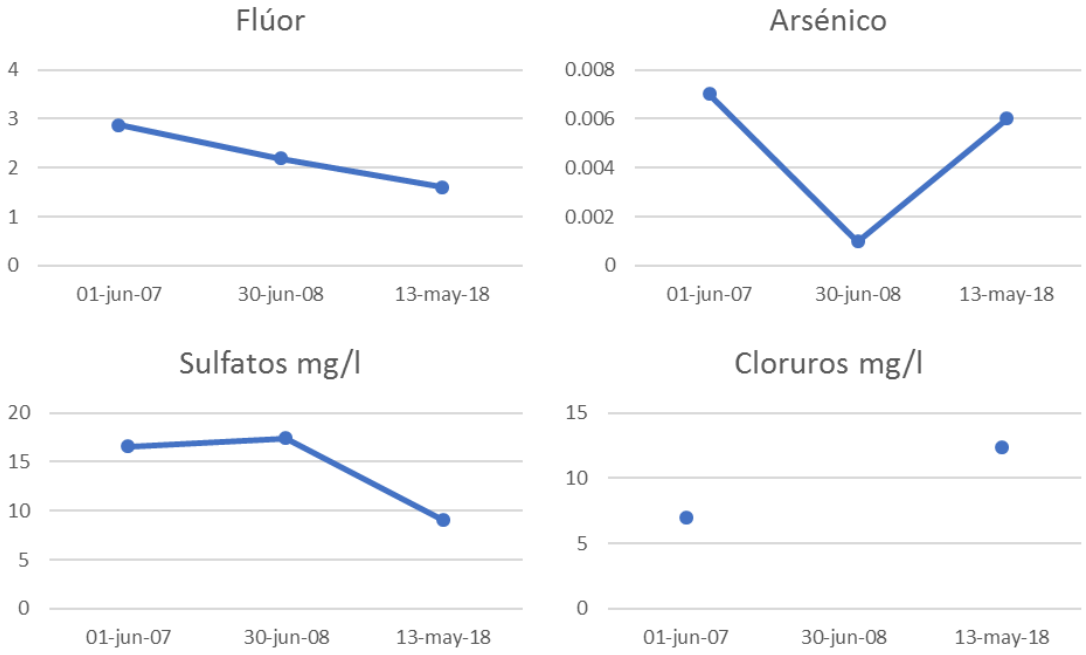


Figura 66. *Gráficas de valores históricos para el pozo No. 10, administrado por la JMAS, en la Col. Rodrigo M. Quevedo.*

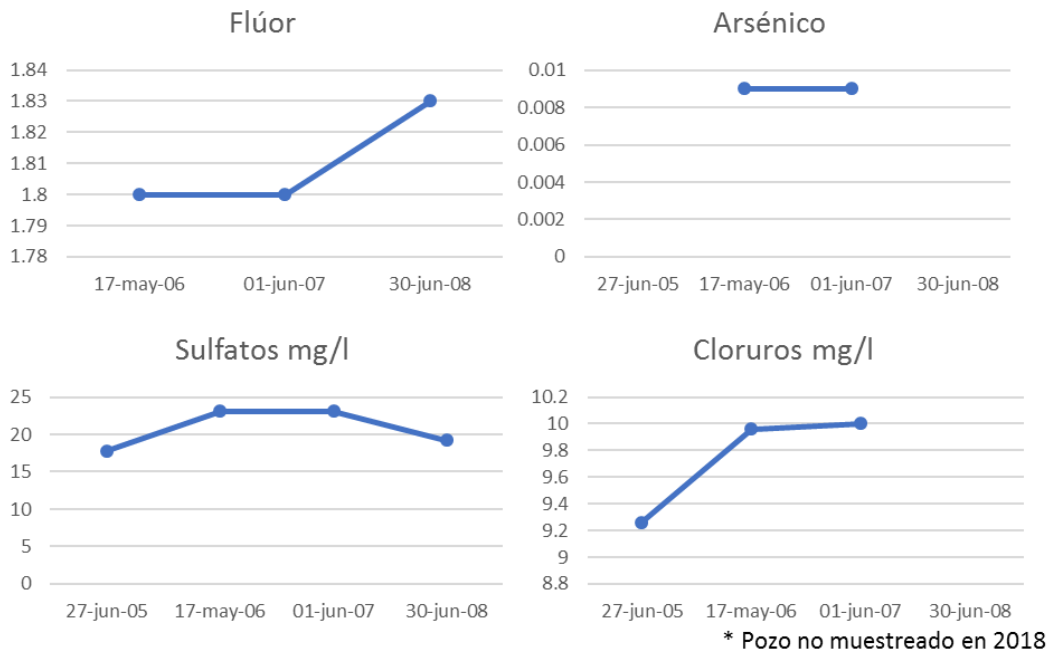


Figura 67. *Gráficas de valores históricos para el pozo JMAS en el Barrio de los Flores, administrado por la JMAS, en la Col. De los Flores.*

Los cuatro parámetros presentados presentan diferentes comportamientos entre sí. El flúor no presenta una tendencia uniforme en los diferentes pozos ni entre sí. En diferentes periodos de tiempo, se observa una variación que sube y baja la concentración, una disminución implicaría una recarga al acuífero o un aumento en el volumen con agua reciente, un aumento en el valor, por el contrario, representaría una disminución en el volumen del nivel de agua y una extracción de agua con mayor tiempo de contacto con la roca (agua más antigua). El arsénico, presenta un comportamiento similar al del flúor, en cuanto al aumento y disminución de la concentración, sin embargo, es importante considerar que este elemento se cuantifica en proporciones muy bajas, por lo que, si bien el gráfico describe altibajos, los valores no se despegan sugiriendo errores sino una tendencia donde las pequeñas variaciones pueden atribuirse a que los análisis se realizaron en diferentes laboratorios y diferentes épocas. Los sulfatos y cloruros que se muestran en las gráficas

representan variaciones en el valor reportado, sin embargo, en cuanto a calidad del agua no representan cambio significativo.

Para establecer evoluciones y tendencias más significativas es importante contar con una mayor población de muestras que permita un análisis más amplio.

***Tabla 21**. Resumen de parámetros analizados históricos por pozo.*

FECHA	ID	Localización	F	As	Temp	pH	Ce µS/cm	Sulfatos mg/l	Cloruros mg/l	Acidez	Alcalinidad total mg/l CaCO3	Dureza Total mg/l	Dureza cálcica mg/l	Dureza magnésica mg/l	Nitratos mg/l	Solidos Totales	SDT	Calcio mg/l	Sodio mg/l	Potasio mg/l
07-jun-05	17	JMAS 5-Carbajal	2.6		20	7.4	435	13	7.36	10.98	180.86	123.67	85.99	37.68	2	240	235			
01-jun-07			1.84	0.011	24	7.7		17.5	7.7						3		283	30.08	43.5	3.2
30-jun-08			2.52	0.009				15.4								270	270	38.7		
13-may-18			1.75	0.026	23	7.5	364	8.93	6.41		175.6	123.67	92.16	31.5	25		256	36.91	53.92	3.89
07-jun-05	22	JMAS 2-Carmeño	1.4		23	7.5	442	10.1	8.79	15.56	182.81	154.59	107.25	47.34	2	263	259			
20-jun-06			1.3	0.011	21	7.5	382	14.7	9.96	7.3	183.2	151.61	67.42	84.19	3	262	261			
01-jun-07			2.2	0.011	25.1	7.8		9.48	8.44			135.86	99.58	36.28	13		216	39.88	32.4	3.18
30-jun-08			1.2	0.008				13.83								278	278	47.4		
13-may-18			1.37	0.003	21.7	7.7	259	9.4	7.88		187.6	141.04	106.25	34	16		250	42.55	37.6	2.75
07-jun-05	24	JMAS 3-Villas del sol	4.4		19	7.9	323	9.7	6.65	7.78	124.31	66.67	47.34	19.33	0	250	247			
20-jun-06			4.28	0.029	26	8	287	18.5	6.72	3.66	129.69	64.02	44.33	19.69	1	208	207			
01-jun-07			4.55	0.029	20.8	7.6		13.25	4.96			76.5	61.18	15.32	6		281	24.5	43.2	1.82
30-jun-08			3.88	0.021				13.8								214	213	22.9		
13-may-18			1.81	0.026	21.5	7.5	259	10.2	6.9		131.6	46.73	35.66	11.08	3		182	14.28	58.01	1.13
20-jun-06	25	JMAS 4-Progreso	4.6	0.033	28	8.1	293	20.2	6.47	2.75	130.68	54.51	38.8	15.71	1	218	218			
07-jun-05			5.4		18	8	329	14	6.41	6.86	126.26	54.11	42.51	11.6	0	257	247			
01-jun-07			5.44	0.033	27.2	8.1		13.97	3.31			82.03	72.06	9.97	7		214	28.86	50.81	1.8
30-jun-08			5.5	0.027				17.48								227	225	16.4		
13-may-18			1.81	0.024	21.2	7.3	252	9.03	2.96		126	41.21	31.74	9.47	1		176	12.79	56.65	0.89
01-jun-07	10	JMAS-Quevedo	2.87	0.007	22	7.5		16.57	6.95			160.5	125.95	34.55	24		354	50.44	55.8	3.34
30-jun-08			2.19	0.001				17.4								342	338	50.6		
13-may-18			1.6	0.006	22.5	7.2	372	9.03	12.32		182	133.23	99.76	33.48	26		260	39.95	54.88	1.94
13-may-18	9	JMAS-Esc. Quevedo	1.35	0.001	22.3	7.3	505	14.81	9.36		224	199.24	153.12	46.12	34		353	61.3	61.58	3.5
13-may-18	23	JMAS 1-Chamizal	1.61	0.025	21.1	7.2	404	8.82	2.46		117.6	45.02	33.73	11.28	4		280	13.51	56.77	1.24
27-jun-05		JMAS-B_Flores	1.97		19	7.5	438	17.8	9.26	15.1	247.9	152.66	112.2	40.46	4	381	360			
30-jun-08			1.83					19.22								353	353	64		
17-may-06			1.8	0.009	20	7.8	525	23.1	9.96	6.41	260.87	167.13	74.79	74.79	4	365	365	x		
01-jun-07			1.8	0.009	20	7.8		23.1	10						4		365	29.96	62.5	3.2

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

Desde mediados del año 2017 se comenzó a desarrollar esta investigación, con el objetivo de obtener información actualizada que permita sentar las bases para desarrollar trabajos futuros en la región y en algún momento se pueda desarrollar un modelo matemático que permita predecir el comportamiento del flujo del agua subterránea, pues la principal actividad económica de la región es la agricultura en su mayoría irrigada con agua de aprovechamientos subterráneos aunque también se utiliza agua derivada de la Presa El Tintero en el municipio de Namiquipa. Las conclusiones obtenidas se desglosan en el mismo orden en que se desarrolló la tesis.

7.1 Geofísica

Se realizaron e interpretaron 15 SEV's a lo largo del Distrito de Riego, lo que permite realizar una interpretación general de 0-80m de profundidad. Se interpretaron tres Unidades Geoeléctricas (UGE), basadas en tres rangos de resistividad trabajados durante la investigación. La llamada UGE1, es la de mayor presencia en la zona, representando resistividades bajas (alta conductividad hidráulica), características de suelos y materiales no consolidados, características esperadas en zonas agrícolas. Se presentan otras dos unidades (UGE2 y UGE3) en mucha menor proporción, fue posible correlacionarlas.

De manera general se recomienda desarrollar mallas para la elaboración de SEV´s más cercanos entre uno y otro, y de mayor amplitud, de manera que permita interpretar información a mayor profundidad y realizar una interpretación con mayor densidad de datos. Se recomienda realizar los sondeos en áreas relativamente secas y que no hayan sido regadas recientemente, así como no hacerlos sobre caminos de terracería, ya que la compactación y el terraplén que se pudo haber realizado para estos puede representar una mayor resistencia al paso de la electricidad y no es una característica real del terreno.

También se sugiere realizar SEV´s cercanos a lo interpretado como UGE2 y UGE3, tratando de encontrar su continuidad y/o límites, así como corroborar la existencia de altas conductividades cercanas a la superficie.

Es conveniente realizar SEV´s en los límites de cerro del Malpais, en el cerro, y en la cara W, cerca de la riolita descrita por el SGM con el objetivo de explicar con mayor detalle las concentraciones iónicas del agua e identificar una posible zona de recarga. Finalmente, ampliar los sondeos eléctricos al Sur del Distrito en el área denominada San José.

7.2 Hidrogeología

Se identificó el tipo de drenaje en el acuífero; se encontró un registro en un reporte técnico realizado por el geólogo Waitz (1927), donde reporta la presencia de agua artesiana, sin embargo, los aprovechamientos subterráneos hacen interpretar que actualmente el acuífero tiene un comportamiento de acuífero libre donde la presión que tiene el agua a profundidad es similar a la presión atmosférica. El tipo de drenaje que presenta el área se describe como detrítico, aun que a pesar de que el área central del valle se utiliza con fines agrícolas, el agua baja de las partes altas de las montañas hasta converger al río Santa María.

Se realizó una campaña piezométrica para actualizar los niveles piezométricos del Distrito de Riego, en el mes de enero 2019, esperando que todos o la gran mayoría de los pozos se encontraran apagados. Se midieron 46 pozos de los 80 del Distrito. Se recomienda continuar con las mediciones de nivel estático, al menos una vez al año al fin del ciclo agrícola (diciembre o enero) con el objetivo de acumular datos y poder realizar evoluciones con una mayor población de datos.

Se determinó la dirección de los flujos preferentes dentro del acuífero Buenaventura; se identifica un flujo general de sur a norte, similar al flujo superficial del Rio Santa María. Sin embargo, debido a las extracciones realizadas en los pozos se localiza un flujo local ligeramente marcado por las concentraciones de algunos iones.

7.3 Hidrogeoquímica

Se recolectaron muestras mediante una campaña en pozos agrícolas del distrito de riego; así como algunos pozos agrícolas con información piezométrica antigua. Un total de 26 muestras se mandaron analizar al laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la UACH.

Se identificaron las concentraciones de los iones mayores (Na, K, Mg, Ca, Cl, SO_4, NO_3, CO_3, HCO_3) más F y As en las muestras de agua; se analizaron las muestras identificando todos los parámetros en el protocolo, se desarrolla el balance iónico para identificación de las familias de agua y realizan mapas de concentración por ion.

Se determinó la calidad del agua de consumo y riego agrícola que se utiliza en la región; se revisaron los resultados y se compararon con la Norma Oficial Mexicana, donde en relación con la calidad del agua analizada se refleja que en general el agua es adecuada para el consumo humano, y solo algunas muestras presentan valores ligeramente superiores respecto al As mientras que la mayoría de las muestras presentan valores por arriba de 1.5 mg/l de flúor. El resto de los parámetros se encuentra dentro de lo estipulado por las normas correspondientes. Las muestras tomadas de pozos utilizados para el riego agrícola se clasificaron mediante un diagrama de Wilcox, y según las normas del laboratorio de suelos de Estados Unidos, el agua de pozos agrícolas es de baja a mediana salinidad y bajo sodio, lo que la hace una adecuada agua para desarrollar la actividad agrícola. Mediante los diagramas de Stiff, Piper, Collins y Schöeller, para agrupar las aguas, se identificaron tres grupos de agua.

Se evaluó el agua de acuerdo con criterios de potabilidad para el consumo según la Norma Oficial Mexicana (NOM 127-SSA 1994). La mayoría de las muestras analizadas presentan excelente calidad para consumo humano, solo el flúor presenta valores que exceden la NOM, muy probablemente debido al contacto del agua con rocas ígneas. Solo las muestras 1, 17 y 24 presentan valores muy pequeños por arriba de la Norma (0.030, 0.026 y 0.026 mg/l) en cuanto al arsénico, para disminuir la ingesta y exposición a estas concentraciones se recomienda consumir agua tratada por el método de ósmosis inversa, siendo el proceso más adecuado en relación costo/eficiencia.

Con el objetivo de disminuir el riesgo de fluorosis dental, se recomienda utilizar crema dental sin flúor. El resto de los parámetros analizados quedan lejanos al límite de estipulado por lo que se considera un agua de adecuada calidad para el consumo, una vez que se le dé el tratamiento de cloración que marca la ley.

Se recomienda continuar con el muestreo de agua al menos dos veces al año (una en temporada de lluvia y otra en invierno), con el objetivo concentrar una mayor población de muestras y aumentar al rango de tiempo, poder realizar gráficas de tendencias.

8. Referencias

Alvarez Rivera, U., Manilla Mogollan, D., Romero Martinez, L., Vega, M., Gonzalez, I., Ortega, G., . . . Vazquez, S. (2005). *Quimica II. Manual de actividades experimentales para el alumno.* Mexico: UNAM.

Arias, M. E. (2002). Informe de prospección geo eléctrica en la isla del Coco, Costa Rica. *Revista Geologica de America Central*, 12.

Carreón, C., Ramírez, J., & Vega, M. (1995). Aplicación del diagrama de Stiff como herramienta geoquimica en la exploración geotérmica del valle de Mexicali, Baja California. *Ingeniería Hidráulica en México*, 37-46.

CNA. (1994). *Manual para evaluar recursos hidráulicos subterráneos.*

CNA. (2007). *Plan Director. Union de Asociaciones de Usuarios de Aguas Subterraneas del Acuifero Cuahutemoc, Chihuahua, S. R.L. de I.P. de C.V. Mexico.*

CNA. (2013). *Formulación del Plan Director para la Modernización Integral del Riego del Distrito de Riego 042 Buenaventura, Chihuahua.* Chihuahua.

CNA. (2015). *Actualizacion de la disponibilidad media anual de agua en el acuifero Buenaventura (0804), Estado de Chihuahua.* Diario oficial de la Federacion.

Collazo, M. P., & Montaño, J. (2012). *Manual de Agua Subterránea.* Montevideo: Ministerio de Ganaderia, Agricultura y Pesca.

CONABIO. (14 de 03 de 2008). Hidrologia. Mexico.

Cuellar, E., Ortega, M., Ramírez, C., & Sánchez, I. (2015). Evaluacion de la relacion de adsorcion de sodio de las aguas de la red hidrografica del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agricolas*, 977-989.

Custodio, & Llamas. (2001). *Hidrologia subterranea.* Barcelona, España: Omega, S.A.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrologia Subterranea.* Barcelona: Omega.

Davis, S. N., & DeWiest, R. (1966). *Hydrogeology.* John Wiley & Sons Inc.

Davis, S. N., & DeWiest, R. J. (1966). *Hydrogeology.* John Wiley & Sons.

Dominguez-Faus, R., Powers, S., Burken, J., & Alvarez, P. (1 de May de 2009). The water consumption and agrochemical use during biofuel production could adversely impact both availability and quality of a precious resource. *Environmental Science and Technology*, 3005-3010.

Donado-Garzon, L. D. (2000). *Hidrologia.* Colombia.

Driscoll, F. G. (1986). *Groundwater and wells.* USA: Johnson Division.

EPA. (19 de Enero de 2017). *www.epa.gov.* Obtenido de https://www.epa.gov/quality/managing-quality-environmental-data-epa-region-9

Espino-Valdes, M. S., Barrera-Prieto, Y., & Herrera-Peraza, E. (2009). Precencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*, 8-18.

Estrada Gutierrez, G. (2008). *Conceptos basicos de hidrologia.* Chihuahua, Chih.: Universidad Autonoma de Chihuahua.

Fagundo, J. R., & Gonzalez, P. (2005). *Hidrogeoquímica.* La Habana: CENAMENT.

Fagundo, J. R., & González, P. (2005). *Hidrogeoquímica.* La Habana: Ministerio de Salud Publica.

Fagundo, J. R., Gonzalez, P., & Beato, O. (2002). *Hidrogeoquimica e Hidrologia Isotópica.*

Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology.* New Jersey: Prentice Hall.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater.* New Jersey: Prentice-Hall.

Freeze, R., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater.* Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
Gomez-Alvarez, A. (1999). *Particularmente importante es la contaminación provocada por las altas concentraciones de algunos metales pesados y su incre- mento en los efectos adversos causados por la persisten- cia y el fenómeno de biomagnificación.*
Hantush. (1969). *Hydraulics of wells. Advances in hydroscience.* Academic Press.
http://desktop.arcgis.com/es. (2016). Obtenido de http://desktop.arcgis.com/es: http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-natural-neighbor-works.htm
Huizar, R., Carrillo, J. J., & Juarez, F. (2016). Fluoruro en el agua subterránea: niveles, origen y control natural en la región de Tenextepango, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 40-58.
IMTA. (2006). Estudio para la operación y manejo sustentable del acuífero Casas Grandes, Chihuahua.
INEGI. (2004). *Guia para la interpretacion de cartografia edafologia.* Aguascalientes.
INEGI. (2017). *Guia para la interpretacion de cartografia Uso del suelo y vegetacion.* Aguascalientes.
INEGI. (2017). *Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación.* Aguascalientes.
Lopez, R. C., & Kenneth, A. G. (2013). *Quimica.* Madrid: MacGraw-Hill.
Matthes, G. (1982). *he Properties of Groundwater.* John Wiley & Sons Inc.
Montoya, S. (9 de 6 de 2014). *http://gidahatari.com*. Obtenido de Gidahatari: http://gidahatari.com/ih-es/factores-que-influencian-el-balance-ionico
Morcillo, J. (1989). *Temas básicos de química.* Granada: Alhambra Universidad.
OMS. (2001). *Arsenic and arsenic compounds.* Ginebra: WHO.
OMS. (15 de 02 de 2018). *https://www.who.int/es*. Obtenido de https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic
Orellana, E., & Mooney, H. (1966). *Tablas y curvas patron para sondeos electricos verticales sobre terrenos estratificados.* Madrid: Interciencia.
Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice. Vol. 1: Recomendaciones.* Ginebra: Ediciones de la OMS.
Ortega, A. M. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma–Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, 143-161.
Peña Diaz, S. (2006). *Introducción a la hidrología subterránea.*
Peña Díaz, S. (2006). *Introducción a la hidrología subterránea.*
Sawyer, C., & McCarthy, P. (1978). *Chemestry for environmental Engineering.* USA: Mc Graw Hill International.
Sears, & Zemansky. (2009). *Física universitaria con física moderna. Volumen 2.* Mexico: Pearson Educacion.
Sheriff, R. E. (1991). *Geophysics.*
Shlklomanov, I., & Rodda, J. C. (2004). *World water resources at the beginning of the 21st century.* Cambridge: Cambridge University Press.
Sibson, R. (1981). *A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation.* Nueva York: John Wiley & Sons.

Tricart, J., & Cailleux, A. (1965). *Introductionàlageómorphologieclimatique.* Paris: Societ́é d'ed́ itiond'enseignementsupérieur.
Universidad Estatal de Moscú. (2000). *IPI2Win Guía de usuario.* Moscú.
Waitz, P. (1927). *Las condiciones geológicas de las Boquillas y vasos del Tintero y de La Plazuela sobre el Rio de Santa María, y las hidrológicas de los Valles de San Buenaventura y San Luis. Estado de Chihuahua.* San Buenaventura.
WHO. (1996). Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Vol. 2. Health criteria and other supporting information. Geneva.
www.who.int. (2008). Obtenido de Organizacion Mundial de la Salud: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/guidelines/es/
www.xtec.cat. (s.f.). Obtenido de http://www.xtec.cat/~gjimene2/llicencia/students/08tecnicas.html