



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**MODELO DE MEZCLA DE AGUA SUBTERRÁNEA
EN UNA PORCIÓN DEL ACUÍFERO
VALLE DE LEÓN, GUANAJUATO**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A

JUAN PÉREZ QUEZADAS

JURADO EXAMINADOR:

DR. OSCAR A. ESCOLERO FUENTES
DR. JUVENTINO MARTÍNEZ REYES
DR. SERGIO RODRIGUEZ ELIZARRARÁS
DRA. ELOISA DOMÍNGUEZ MARIANI
DR. ALEJANDRO J. CARRILLO CHÁVEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

MODELO DE MEZCLA DE AGUA SUBTERRÁNEA
EN UNA PORCIÓN DEL ACUÍFERO VALLE DE
LEÓN, GUANAJUATO

TESIS

que como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA (AGUA SUBTERRÁNEA)

presenta:

JUAN PÉREZ QUEZADAS

2009

Índice general

AGRADECIMIENTOS	9
RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Generalidades	12
1.2. Localización del Área de Estudio	12
1.2.1. Problemática	13
1.3. Enfoque de la investigación	18
1.3.1. Hipótesis de Trabajo	18
1.3.2. Objetivo	21
1.3.3. Marco Teórico	21
1.3.4. Trabajos Previos	24
1.4. Marco Geológico	26
1.4.1. Marco Regional	26
1.4.2. Marco Local	27
2. RESULTADOS	34
2.1. Metodología	34
2.1.1. Trabajo de gabinete	34
2.1.2. Trabajo de campo	35
2.1.3. Métodos de medición en el laboratorio	37



2.2. Funcionamiento Hidrogeológico Local	38
2.2.1. Modelo Conceptual	38
2.2.2. Superficie Potenciométrica	44
2.2.3. Variación de Niveles Estáticos	44
2.3. Hidrogeoquímica	49
2.3.1. Conductividad Eléctrica	49
2.3.2. Temperatura	54
2.3.3. Elementos Mayores	58
2.4. Mezcla a Partir de Elementos Conservativos	73
2.4.1. Isótopos Estables	73
2.4.2. Composición Isotópica de Agua Meteórica	75
2.4.3. Escenarios de Cálculo de Mezcla	83
3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	88
3.1. Discusión	88
3.1.1. Conclusiones	93
Referencias	95

Índice de figuras

1.1.	Localización del área de estudio. Se encuentra al nor-oeste del estado de Guanajuato en los límites con el estado de Jalisco. Comprende la porción occidental del acuífero Valle de León y abarca una superficie aproximada de 100 km^2 dentro de la carta F14C41, escala 1:50,000 editada por el INEGI	14
1.2.	Características hidrológicas superficiales del área de estudio. Se observa un parteaguas superficial que cruza la autopista a Aguascalientes, una cantidad importante de bordos, ríos intermitentes, así como la zona de riego y las presas San Germán y Trinidad, fuente: [INEGI, 2006]	16
1.3.	Modelo conceptual hidrodinámico para el Valle de León, fuente: [CEASG, 1998]. Presenta las unidades hidroestratigráficas donde se está llevando a cabo el flujo de agua subterránea. El sistema se ha transformado de su forma original a un sistema con conos de abatimiento amplios, zonas de recarga modificadas y retorno de riego	19
1.4.	Diagrama que ejemplifica la hipótesis de trabajo planteada, k_1 y k_2 son las conductividades hidráulicas en dos diferentes medios, estos están en contacto debido al desplazamiento de unidades. Se encuentran saturados y su nivel estático describe un flujo horizontal	20
1.5.	Evolución de la proporción de mezcla de dos tipos de agua subterránea desde un punto A con contenido isotópico inicial de 100 % y su tendencia a un segundo punto B con 0 % de A y 100 % de B, [Clark, et al.1997]	22
1.6.	Diagrama de mezcla ternaria para agua subterránea de una salmuera Canadiense. El miembro extremo de agua de glaciar fue identificado por el empobrecimiento isotópico observado en agua subterránea con profundidad intermedia, donde su composición en $^{18}\text{O} - \text{Cl}^-$ se determino por extrapolación de ^3H libre en agua [Douglas, M., 1997].	23



1.7. Marco geológico local. Sección A-A', en las cuales se fundamenta el sistema de flujo y el presente análisis. Las rocas riolíticas son las principales constituyentes del área, Ticu, así como el relleno terciario, Tgi, que compone el Valle y principal acuífero en extracción, tomado de [CEASG, 2004] y modificado de [GEOEVALUACIONES, 1994].	32
2.1. Diagrama esquemático del modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico local fundamentado en 11 cortes litológicos recopilados de la zona, proporcionados por [Escorpion, 1990] y [Reyes, 2007]. En rojo el Conglomerado de Guanajuato, Tcg, en rosa, crema y anaranjado los estratos que componen a la Ignimbrita Cuatralba, Ticu. La dirección del flujo es en sentido A-A', norte-sur, a través del Ticu, recibiendo recarga meteórica y descargando hacia el valle.	40
2.2. Superficie potenciométrica local, construida con datos del nivel estático para el año 1994 y 1996. Describe una dirección de flujo norte-sur. Fuente: [GEOEVALUACIONES, 1994] y [SAPAL, 2002].	45
2.3. Correlación entre la lluvia media anual, extracción total anual y nivel estático para el pozo Poniente 1. Se observa una variación de nivel estático de 45m en un lapso de tiempo de 8 años con tendencia al abatimiento. La extracción bajó de 1,100,000 a 800,000 m ³ /a. Fuente SMN y SAPAL.	46
2.4. Correlación entre la lluvia media anual, extracción total anual y nivel estático para el pozo Poniente 2. Se observa una variación del nivel estático de 10m en un lapso de tiempo de 8 años con tendencia a la recuperación. La extracción es variable con tendencia a disminuir. Fuente SMN y SAPAL.	47
2.5. Correlación entre la lluvia media anual, extracción total anual y nivel estático para el pozo Poniente 7. La variación del nivel estático es de 10m con tendencia a permanecer constante y extracción con tendencia constante. Fuente SMN y SAPAL.	48
2.6. Comportamiento de la conductividad eléctrica en función al tiempo transcurrido de bombeo, para un pozo localizado en las inmediaciones del acuífero Valle de León. En colaboración con Luis Gonzalez H., IMTA,2009.	52



2.7. Extrapolación espacial de la conductividad eléctrica medida en los aprovechamientos, utilizando el método de Kriging. Se observa una acumulación espacial en los alrededores del pozo Poniente 2	53
2.8. Comportamiento de la temperatura en función al tiempo transcurrido de bombeo, en un pozo en las inmediaciones del acuífero Valle de León. En colaboración con Luis Gonzalez H., IMTA, 2009.	56
2.9. Extrapolación espacial de la temperatura medida en los aprovechamientos, utilizando el método de Kriging. Se observa una diferencia espacial de 10 °C que de acuerdo a un gradiente normal correspondería a 300 m de diferencia entre los localizados en la parte norte y sur. .	57
2.10. Correlación entre la profundidad total de pozo y la temperatura. Se asume una tendencia lineal en la parte superior topográfica que se debe a la presencia de la componente profunda, afectada por un gradiente geotérmico normal. Si se asume el modelo de funcionamiento planteado, el comportamiento térmico del resto se debe a la mezcla entre agua termal y agua superficial influenciada y no influenciada antropogénicamente en diferentes proporciones en cada pozo.	59
2.11. Diagramas de Stiff generados con las concentraciones, meq/l, de iones mayores de cada pozo muestreado, a excepción de la noria Piedra Blanca. Se observa que la mayoría se agrupan como Bicarbonatadas-sódicas-potásicas y las demás como Bicarbonatadas cálcicas-sódicas. Construidos con el apoyo de software desarrollado en el GHI, UNAM, visitar pagina http://hidrologia.igeofcu.unam.mx/	66
2.12. Diagrama de Piper. Se ve claramente el grupo de pozos con características iónicas donde dominan las Bicarbonatadas-sódicas, cálcicas y 2 muestras con una clara tendencia a cloruradas.	68
2.13. Tendencia temporal del Cl^- en tres pozos de la Batería Poniente, tomado de [SAPAL, 2007]. El pozo Poniente 2 evoluciona a razón de 20 mg/l año en cloruro proveniente de una fuente externa.	69
2.14. Gráfica que muestra la correlación entre el Cl^- y NO_3^- , principales indicadores de contaminación antropogénica en la zona.	70



2.15. Extrapolación espacial con el método de kriging del cociente Ca/Na, relacionado con el intercambio catiónico que pudiera presentarse en el Tgi, tomando en cuenta que también puede deberse al aporte vertical proveniente de agua superficial, lo que cambia su firma química.	72
2.16. Correlación $\delta^{18}O$ y δ^2H descrita por las muestras tomadas en ambos lados del trazo de la falla León, [Craig, 1961], [Cortés et al., 1997]. La pendiente que forma la línea de evaporación corresponde a lo que [Gonfiantini, 1986], encuentra para humedades relativas, h, entre 75 y 95%	78
2.17. Correlación entre temperatura, T, y $\delta^{18}O$. Dentro del círculo se presenta la componente profunda común de las zonas, norte y sur, la cual presenta una firma isotópica similar al agua meteórica contemporánea que da origen a las líneas de mezcla diferentes para los dos lugares y con tendencia a agua superficial presente en cada lugar	80
2.18. Propuesta de modelo de mezcla de tres componentes extremo para la zona en estudio, agua meteórica subterránea contemporánea muy parecida al agua meteórica contemporánea y agua influenciada antropogénicamente	83
2.19. Segundo escenario: Correlación de los valores obtenidos contra los calculados tomando como miembros extremos, lluvia contemporánea, pozo Poniente 23 y noria Piedra Blanca. . . .	86
2.20. Segundo escenario, miembros extremos, lluvia promedio contemporánea, pozo Poniente 23 y noria Piedra Blanca	87

Índice de Tablas

2.1. Valores de conductividad hidráulica, k , para los diversos materiales geológicos que constituyen el acuífero Valle de León, tomados de [Hernández,1991], [CEASG, 1998]	38
2.2. Características ingenieriles de algunos pozos localizados en la zona de estudio. Los datos de la Batería Poniente fueron extraídos de videos tomados desde el año 1997 a 2001 y reportados por [SAPAL, 2002].	43
2.3. Parámetros físicos medidos en campo y su correspondiente desviación estandar, σ , calculada con datos medidos a partir del año 2000 hasta 2006, proporcionados por el SAPAL, así como, dato de agua de lluvia para San Luis Potosí, [Cardona, 2007]	50
2.4. Conductividad térmica de algunas rocas [Domenico, 1990]	55
2.5. Fuentes naturales de iones en agua, tomado de [Singhal et al., 1999]	60
2.6. Resultados de iones mayores y balance de electroneutralidad para la zona en estudio. . .	64
2.7. Capacidad de intercambio iónico para las principales especies arcillosas	73
2.8. Resultados isotópicos obtenidos en las estaciones recolectoras de lluvia para la temporada 2005. El promedio de esta pareja isotópica es (-9.4, -65).	75
2.9. Resultados isotópicos de muestras obtenidas en pozos localizados en ambos lados al trazo de la falla León y resultados de manantiales muestreados en la temporada de secas 2008 .	77
2.10. Proporciones de mezcla obtenidas bajo el primer escenario	84

NO SOLO EL DINERO Y EL TIEMPO SON ESCASOS:
TODO LO QUE EXISTE SE CONVIERTE EN UN RECURSO ESCASO CUANDO
PUEDE TENER MÚLTIPLES USOS
Museo Interactivo de Economía, MIDE
México D.F. Agosto de 2008



AGRADECIMIENTOS

Con el objetivo de dar seguimiento al análisis del comportamiento del sistema hidrogeológico Valle de León, aportar información actualizada y fortalecer el modelo de funcionamiento hidrodinámico actual, el Grupo de Hidrología Isotópica, GHI, coordinado por la Fis. Alejandra Cortés Silva, sometió un proyecto de colaboración técnica al Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA. Es a través de este proyecto, actualmente aprobado y con vigencia hasta el año 2011, de donde se desprende esta aportación, la cual no se hubiera podido llevar a cabo sin el apoyo del Dr. Sergio Ajuria Garza a quien agradezco especialmente y a la beca que recibí a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT. Quiero agradecer especialmente a la Fis. Cortés todo el apoyo motivacional, académico, de infraestructura y financiero, que me fue proporcionado a través de becas asociadas a los diferentes proyectos de investigación en los que hemos venido participando, y que amablemente me proporcionaron el Instituto de Geofísica, UNAM, Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro, CONCyTEQ, el Instituto de Geología de la UNAM, y el Centro de Geociencias, UNAM, campus Juriquilla. Agradezco a mi tutor, Dr. Oscar Escolero Fuentes, el aporte de conocimientos teóricos durante el transcurso de la maestría y su apoyo para la integración de éste trabajo. A los doctores Jesús Carrera, Luis Araguas, Juventino Martínez, Eloisa Domínguez, Alejandro Lozano, Alejandro Carrillo y Sergio Rodríguez por su amabilidad, sencillez y sugerencias que aportaron a este trabajo. Agradezco enormemente al personal administrativo y del Laboratorio del SAPAL, pues sin su aporte no hubiera sido posible realizar este trabajo. De la misma manera agradezco al personal del Laboratorio de Isótopos Estables M. en C. Edith Cienfuegos y M. en C. Pedro Morales. También quiero agradecer al Sr. Manuel Ortega y familia, por que sin su apoyo hubiera sido complicado concretar este trabajo. A toda mi familia, compañeros del posgrado y personal administrativo que desde la posición que ocupan proporcionaron apoyo, correcciones, críticas y principalmente aportaciones que enriquecieron más aún este trabajo, Stefani Kralish, Joaquín Pérez, Jesús Barrera, Rocío Salas, Lalita, Gaby, Pit y Ricardo, Julia, Guillermo, Javier, Pepe, Laura, Decirey, Nora.



Agradezco especialmente al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM, por haberme abierto las puertas al conocimiento en la materia, por haber puesto a mi disposición su infraestructura y además por el valioso apoyo en la impresión de esta tesis.

Gracias a todos!!!!



RESUMEN

Se identifican tres componentes extremo de agua subterránea en la parte poniente del acuífero Valle de León, a partir del análisis de una base de datos obtenida de 21 pozos localizados en las inmediaciones al trazo de la falla normal León, la cual pone en contacto rocas ignimbríticas y un relleno indiferenciado. La base de datos se compone de iones mayores, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , datos físicos, temperatura, T, y Conductividad Eléctrica, CE, así como isótopos estables $\delta^{18}O$ y δ^2H . Las líneas equipotenciales generadas sugieren una dirección de flujo norte-sur. La concentración de iones mayores indican interacción agua-roca y aporte superficial de sales, agrupándose en bicarbonatadas sódicas, sódicas-cálcicas y cloruradas. Utilizando al (Cl^- , $\delta^{18}O$ y δ^2H) como trazadores, se proponen tres componentes de mezcla, con valores (1,194 mg/l, -7.7 ‰, -60 ‰) para agua superficial, ($8.1 \text{ mg/l} \pm 1$, -10.62 ‰, -70 ‰) para una componente no alterada identificada como flujo lateral originada en la parte norte del área de estudio, y agua meteórica (0.5 mg/l, -9.4 ‰, -65 ‰) con un rango de variación de 1.9 ‰ para $\delta^{18}O$ y 17 ‰ para δ^2H , respectivamente. Se calcularon las proporciones de las componentes extremo en pozos seleccionados bajo diferentes escenarios de cálculo utilizando el software MIX y cálculos tradicionales, obteniéndose que, la proporción de la componente de flujo lateral que se origina en las rocas ignimbríticas se extrae a través de la mayoría de los pozos con una proporción de 0 hasta 99.8%. La componente de riego esta siendo extraída principalmente en los pozos más cercanos a la presa San Germán y al Río Turbio y varia de 12.4 hasta 0% y finalmente la componente de precipitación contemporánea va de 0 hasta 99.7%. Un cálculo alternativo, duplica la proporción de agua tipo Piedra Blanca presente en el pozo Poniente 2, 27.8%, y propone nuevos valores para las proporciones de mezcla encontradas en el sistema. Una estimación del aporte de agua tipo Piedra Blanca sobre el pozo Poniente 2 considerando una extracción de $1,000,000 \text{ m}^3/a$ es de $124,000 \text{ m}^3/a$ de acuerdo a la proporción más baja y $278,000 \text{ m}^3/a$ considerando la proporción más alta.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

En el Municipio de León se encuentra uno de los corredores industriales más productivos y una de las zonas agrícolas más importantes del país. La actividad industrial histórica ha sido la manufactura de calzado, como consecuencia, se tratan pieles para su posterior industrialización. Se estima que una piel de vaca contiene por lo menos 10 kg de sal para su conservación. Por otro lado, la actividad agrícola, intensiva en León, se ha concentrado en la producción de trigo, sorgo, avena, alfalfa y maíz. La tasa de crecimiento poblacional es de 2.1% anual para el municipio. El clima es templado con temperatura media anual de 18°C. La precipitación media anual es de 698 mm/a. La temperatura máxima es de 35.3 °C y la mínima de 0 °C, [INEGI, 2006].

1.2. Localización del Área de Estudio

El municipio de León se encuentra en el centro de la República Mexicana, al poniente del estado de Guanajuato, comprende 1,219.67 km^2 y equivale al 4.8% de la superficie del estado. Tiene los siguientes límites: al norte con el municipio de San Felipe, al este con los de Guanajuato y Silao, al sur con los de Silao, Romita, y al noroeste con San Francisco



del Rincón y el estado de Jalisco. La ciudad de León, cabecera municipal, esta situada a los $101^{\circ}41'$ longitud poniente y $21^{\circ}07'22''$ latitud norte. Al norte de la ciudad, el terreno es montañoso hasta encontrar la Sierra de Comanja o de Ibarra, en los límites con los municipios de Ocampo y San Felipe. Hacia el noreste esta el Cerro del Gigante, 2,884 msnm. Al noroeste es también montañoso y se encuentra localizada la subprovincia fisiográfica Altos de Jalisco. El centro del municipio, el suroeste, sur y sureste, son parte de la llanura de El Bajío. El Río de los Gómez, afluente del Turbio, que a su vez es tributario del Lerma, se forma en las vertientes de Comanja, Cerro Gordo e Ibarrilla cruza la ciudad donde se le unen los arroyos del Muerto y Machihues. El Río de La Laborcita o de Duarte nace en los Cerros de Otates y sale al municipio de Romita por el sureste, volviendo a entrar al de León por Santa Ana del Conde.

La zona de estudio abarca una superficie aproximada de 100 km^2 , representada cartográficamente abarca la carta F14C41, editada por [INEGI, 2006]. Corresponde políticamente al municipio de León, Guanajuato, se localiza al nor-oeste de la ciudad de León, en los límites con el estado de Jalisco. Se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico; en particular, en el límite entre las subprovincias Altos de Jalisco y Bajío Guanajuatense. Estas se encuentran representadas por un conjunto de lomas y mesetas de mediana elevación con suave pendiente en la cima y fuerte en las laderas, así como, grandes Valles con lomeríos, fig. 1.1. Se encuentra estructuralmente delimitada por la falla León en dirección $N27^{\circ}E$. La parte topográficamente superior se ve afectada por fallas y fracturas locales con dirección paralela a los trazos de las fallas regionales. En las inmediaciones al trazo de la falla León, existen pozos particulares y del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León, SAPAL, con una profundidad promedio de 350 m, los cuales aportaron la información necesaria a este trabajo.

1.2.1. Problemática

La Comisión Estatal de Agua de Guanajuato, CEASG, en 2001, reportó que en el Valle de León existen 1,156 pozos activos, de ellos 797 son utilizados para el uso agrícola; 245 para

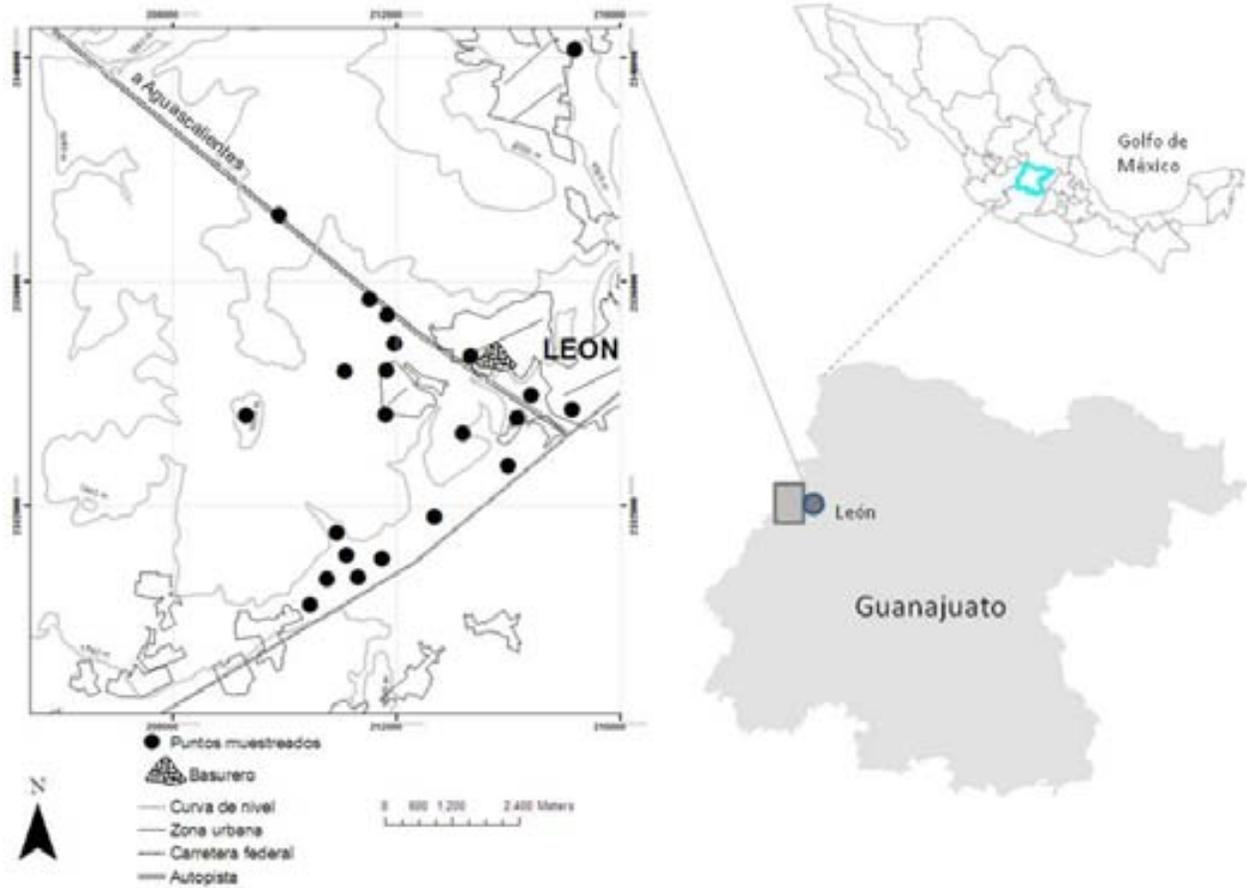


Figura 1.1: Localización del área de estudio. Se encuentra al nor-oeste del estado de Guanajuato en los límites con el estado de Jalisco. Comprende la porción occidental del acuífero Valle de León y abarca una superficie aproximada de 100 km^2 dentro de la carta F14C41, escala 1:50,000 editada por el INEGI



el uso potable; 100 para el uso ganadero y 12 para el uso industrial. El sector agrícola es el mayor consumidor debido a que la zona es parte de la considerada altamente productora de granos. La Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, reporta variaciones del nivel estático que van de 30 a 130 m para el año 1998. Los conos de abatimiento mayores se presentan al sureste de San Francisco del Rincón y al sur-sureste de la ciudad de León, mientras que las depresiones menores se localizan en las poblaciones El Sauz de Armenta y La Tuna Agria. El SAPAL opera 137 aprovechamientos divididos en 6 baterías y distribuidos en tres acuíferos administrativos. Las baterías están constituidas por 53 pozos Ciudad, 6 Oriente, 15 Poniente, 10 Sur, 20 Turbio, 26 Muralla y 7 de nuevas fuentes, que en conjunto representan menos del 10 % del total actualmente en operación dentro de estos acuíferos donde se emplazan los aprovechamientos, los cuales producen $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente. La disponibilidad media anual calculada para el Acuífero Valle de León, AVL, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 que establece las especificaciones y el método para determinarla, es igual a $-129,157,037 \text{ m}^3$, [CNA, 2002] lo cual se traduce como un déficit. La tasa de crecimiento poblacional en el municipio de León es 2.1 % anual, con una población de 1,278,100 personas que representan el 26.1 % del total del estado de Guanajuato. Como consecuencia de este crecimiento en la ciudad de León, se ha incrementado el suministro de agua destinado a la población y uso industrial, por lo que el SAPAL adquirió derechos de agua en zonas dentro y fuera del municipio, tal es el caso de pozos de las baterías Muralla y Turbio. Otra zona en donde este organismo adquirió tres pozos, Poniente 21, 22 y 23, con un gasto menor a 20 l/seg, fue al occidente de la ciudad de León, en los Altos de Jalisco, AJ. La posición topográfica de estos pozos presenta ventajas para el suministro a la ciudad, puesto que se encuentran entre 100 y 150 m arriba de la cota del Valle. En la misma área, existen alrededor de 10 pozos y norias que abastecen de agua a los ranchos y colonias asentados en este lugar. Estos pozos y norias se reportan con gastos desde 2 hasta 10 l/seg.

De manera general se puede mencionar que algunos de los agentes perturbadores de la calidad del agua de origen antropogénico son: Tanques sépticos, embalses superficiales, actividades agrícolas, vertederos, tanques de depósitos subterráneos, pozos abandonados, acci-

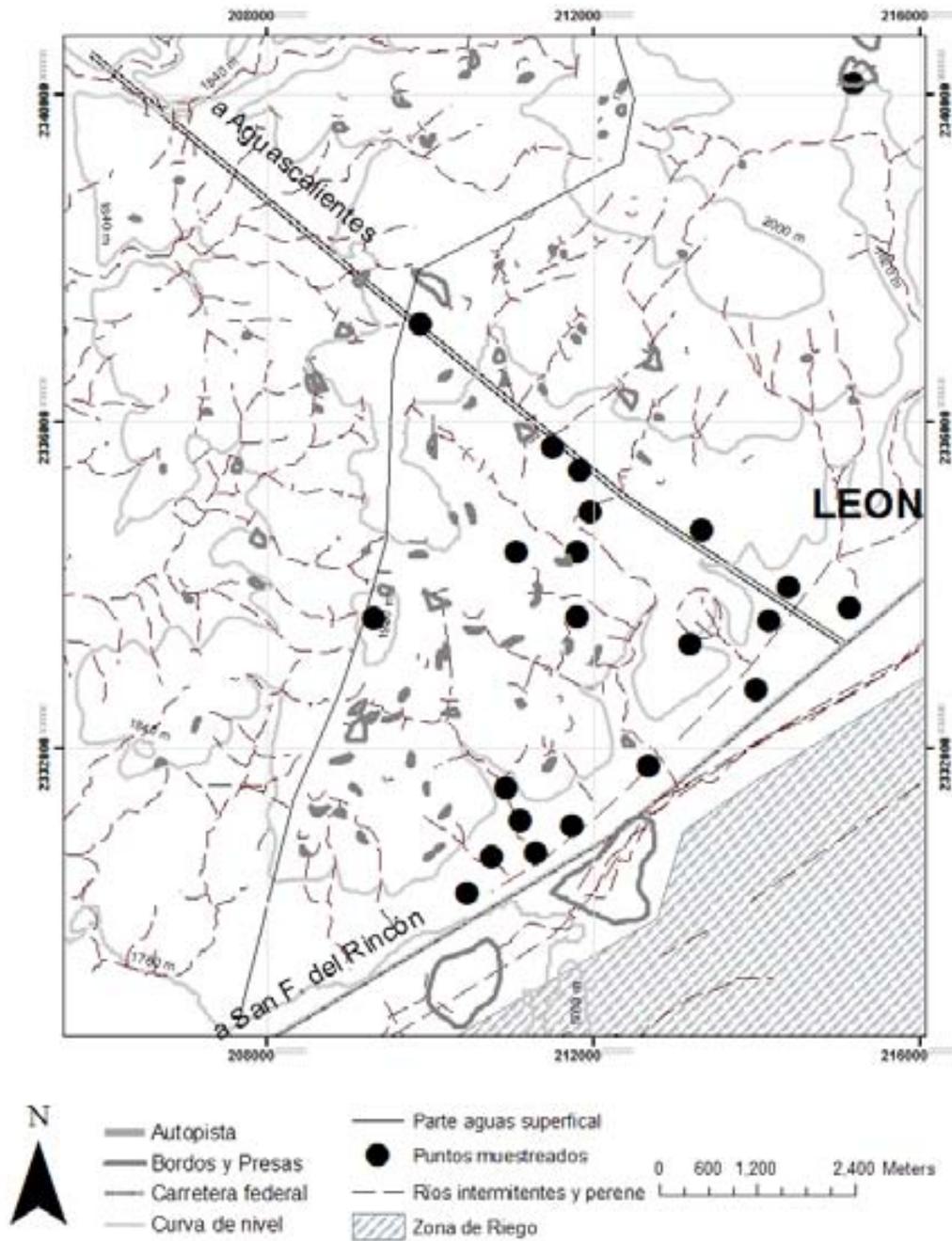


Figura 1.2: Características hidrológicas superficiales del área de estudio. Se observa un parteaguas superficial que cruza la autopista a Aguascalientes, una cantidad importante de bordos, ríos intermitentes, así como la zona de riego y las presas San Germán y Trinidad, fuente: [INEGI, 2006]



dentos de desechos prohibidos, ríos y arroyos de tipo influentes, [PPIAS, 2005]. Estudios realizados en los alrededores de la ciudad, han reportado a través de análisis químicos e isotópicos la degradación de la calidad del agua en pozos de extracción localizados en los alrededores de la ciudad. Existen algunos posibles perturbadores de la calidad del agua subterránea que pudieran estar afectando a los pozos localizados en el VL, todos ellos de origen antropogénico. Entre los más importantes están: mancha urbana conformada por nuevos fraccionamientos, un basurero municipal que actualmente se encuentra fuera de servicio, el Río Turbio, así como las presas La Trinidad y el Mastranzo, las cuales almacenan y distribuyen agua residual proveniente de la ciudad de León a los campos de cultivo, [SARH, 1991], [BGS et al., 1996], [SAPAL, 2007]. De la misma manera en la zona norte, referida a la zona en estudio, se localiza una cantidad importante de "bordos", que son llenados en época de lluvia, junio-septiembre, y son utilizados como fuente importante de aprovechamiento para diversas actividades, figura 1.2.

La recarga a un acuífero, es el proceso por el cual se aporta agua del exterior a la zona de saturación de un acuífero, ya sea directamente a la misma formación o indirectamente a través de otra formación, [UNESCO, 2006]. El aumento en la población lleva consigo una transformación en el uso de suelo, de rural a urbano, lo que implica un aumento en los desechos urbanos y una modificación del ciclo hidrológico local. Es decir, disminuye el aporte de agua meteórica al agua subterránea en la zona urbana, pero desde otra perspectiva también es cierto que el agua que se infiltra por las fisuras del pavimento, drenaje y conductos de agua, no se encuentra sometida a evapotranspiración como lo está en el campo, de tal manera que la gota que se infiltró en los estratos bajo la zona urbana, no regresa inmediatamente a la atmósfera por este efecto. Este mecanismo podría amplificar el efecto de recarga neta al acuífero. Se puede consultar un balance hidrológico en [BGS et al., 1996]. Así mismo, en estudios recientes plantean la idea de que las fallas locales en la zona norte correspondiente a la subprovincia fisiográfica Altos de Jalisco, pudieran estar jugando un papel importante en los caminos preferenciales del flujo que el agua subterránea pudiera estar describiendo, [GEOEVALUACIONES, 1994], [SAPAL, 2002].



1.3. Enfoque de la investigación

1.3.1. Hipótesis de Trabajo

Como antecedente a la hipótesis de trabajo, la figura 1.3, presenta 2 secciones que describen la situación que prevalecía en el sistema, fundamentadas en el modelo hidrodinámico propuesto por [Hernández,1991], donde se describen zonas de recarga asociadas a flujos, locales, intermedios y regionales. De forma particular, en esta figura se observa que en la zona de los Altos se presenta un flujo lateral que descarga al valle.

La relación de este modelo de funcionamiento con la zona de estudio es directa, en este se asume como zona importante de recarga a la unidad llamada Ignimbrita Cuatralba, Ticu, que aflora en casi toda la zona de estudio y se encuentra en contacto con el Terciario Granular Indiferenciado, Tgi, por fallamiento.

De lo anterior se desprende la hipótesis de trabajo siguiente:

Si a través de la falla geológica León existe flujo normal a su plano, que se origina en la subprovincia fisiográfica Altos de Jalisco, y se logran discriminar las componentes extremo que conforman el agua extraída a través de los pozos localizados en los alrededores de la falla, se podrá estimar el porcentaje presente de cada una, de tal forma que se reforzará la idea de un aporte importante de esta zona al acuífero principal.

Desde otra perspectiva, si $k_{1x} \approx k_{2x}$ (k , conductividad hidráulica), entonces no existirá una barrera que modifique la dirección del flujo significativamente, fig. 1.4. Las cargas hidráulicas sugerirán un flujo en dirección normal al plano de falla y se deberá observar la evolución química natural. Al hacer uso de un trazador, éste se reflejará en las dos porciones del sistema, dando origen a una conexión hidráulica registrada a través de los pozos testigo en ambos lados.

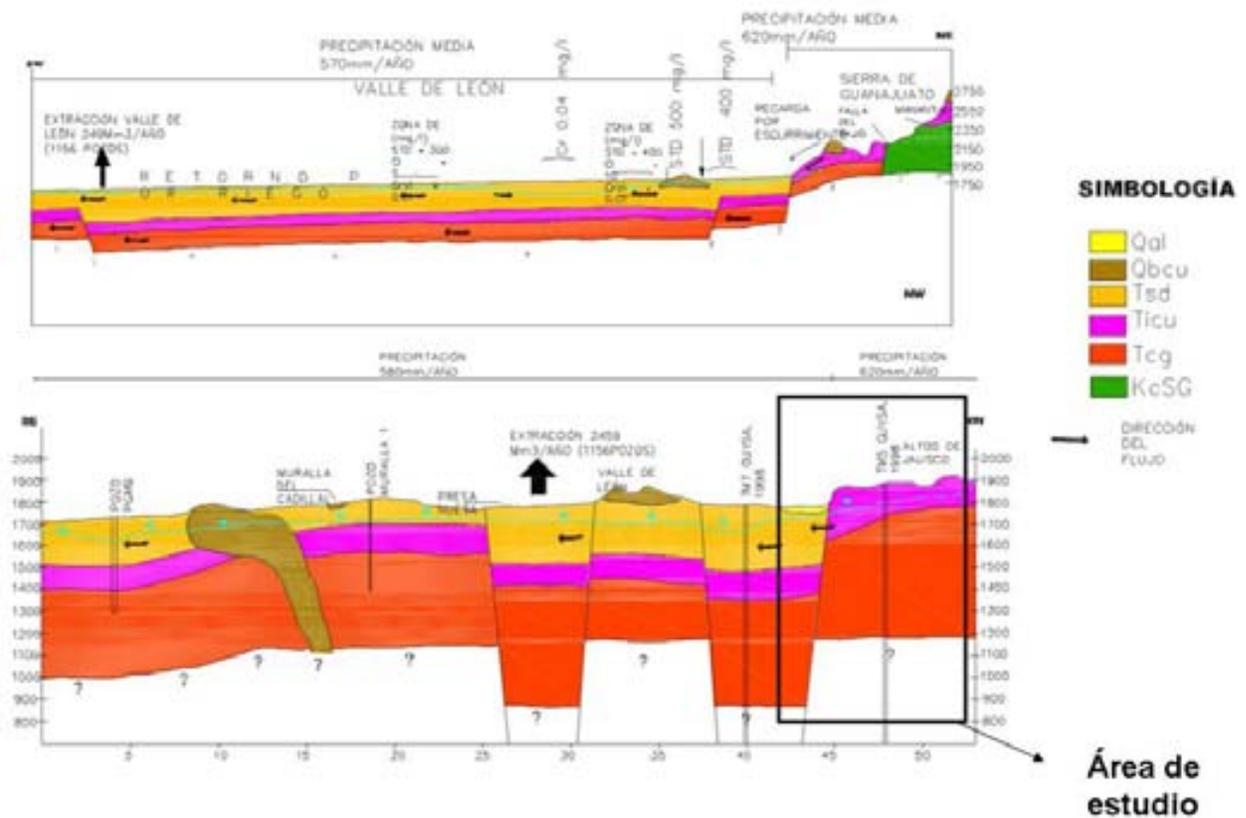


Figura 1.3: Modelo conceptual hidrodinámico para el Valle de León, fuente: [CEASG, 1998]. Presenta las unidades hidroestratigráficas donde se está llevando a cabo el flujo de agua subterránea. El sistema se ha transformado de su forma original a un sistema con conos de abatimiento amplios, zonas de recarga modificadas y retorno de riego

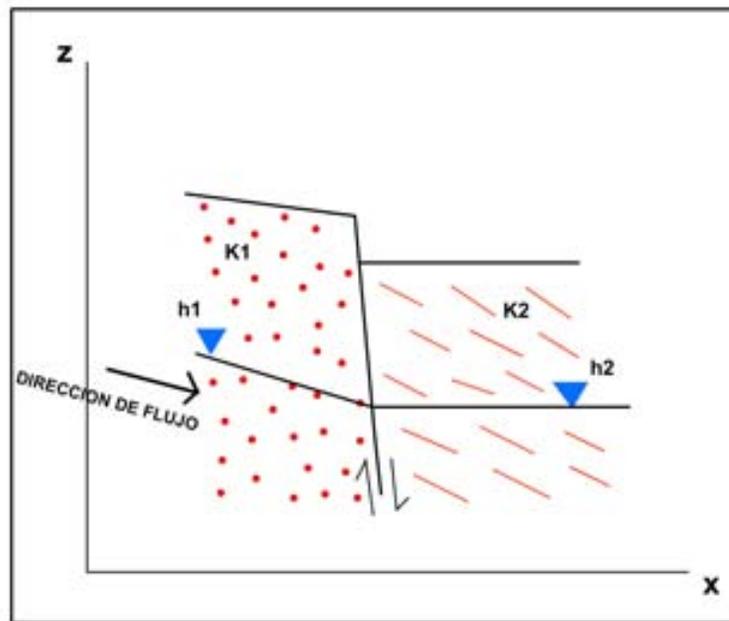


Figura 1.4: Diagrama que ejemplifica la hipótesis de trabajo planteada, k_1 y k_2 son las conductividades hidráulicas en dos diferentes medios, estos están en contacto debido al desplazamiento de unidades. Se encuentran saturados y su nivel estático describe un flujo horizontal



1.3.2. Objetivo

Analizar el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del agua subterránea a través de indicadores hidrogeológicos e hidrogeoquímicos en una porción del acuífero Valle de León, localizada al poniente de la ciudad de León, Guanajuato, que permita identificar las componentes del agua subterránea en extracción y estimar su porcentaje en cada uno de los aprovechamientos seleccionados.

1.3.3. Marco Teórico

La mezcla de agua subterránea que ha sufrido diferentes procesos se da a varias escalas. Los métodos isotópicos pueden ser utilizados para cuantificar la mezcla de agua subterránea a escala local y de cuenca, donde se mezcla agua subterránea de diferentes orígenes de recarga, de diferentes acuíferos y diferentes sistemas de flujo. La mezcla de agua subterránea también ocurre en pozos que extraen agua que integran múltiples líneas de flujo y acuíferos. Como resultado se tendrá una descarga a través de los diferentes aprovechamientos que será agua subterránea inducida y mezclada artificialmente.

Mezcla de agua subterránea binaria:

La mezcla de dos aguas subterráneas distintas puede ser cuantificada por álgebra lineal simple usando $\delta^{18}O$ o δ^2H , La figura 1.5, muestra la proporción de agua subterránea de A en una mezcla de A a B. La proporción de mezcla para una muestra dada se relacionará directamente a su posición en la línea de mezcla, de acuerdo con:

$$\delta_{muestra} = X\delta_A + (1 - X)\delta_B \quad (1.1)$$

La relación de mezcla no indica donde ocurre la mezcla, la cual se puede dar dentro del acuífero o dentro del pozo. A diferencia de la mayoría de los trazadores geoquímicos, el ^{18}O y 2H son conservativos en la mezcla y preservan su proporción. Muchos solutos no son siempre conservativos debido a reacciones geoquímicas.

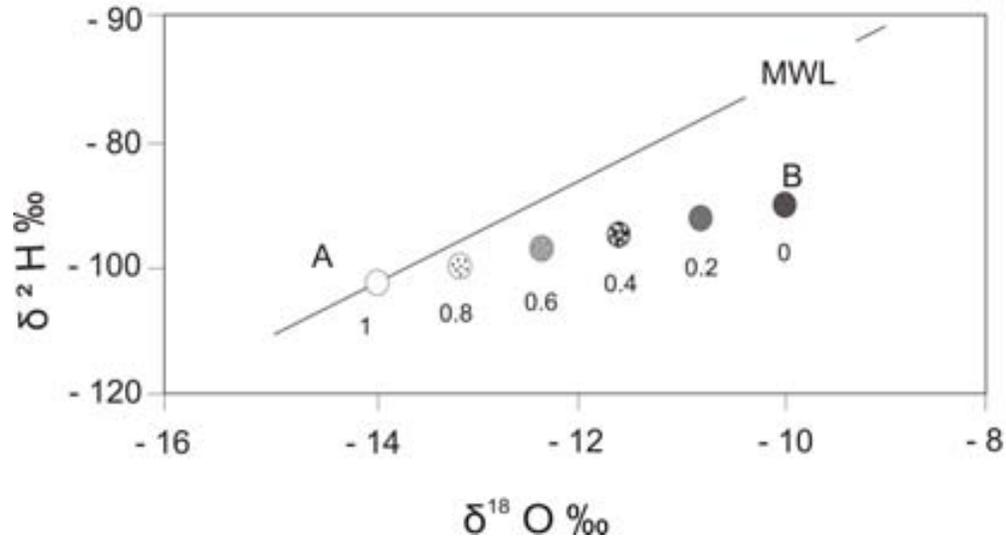


Figura 1.5: Evolución de la proporción de mezcla de dos tipos de agua subterránea desde un punto A con contenido isotópico inicial de 100% y su tendencia a un segundo punto B con 0% de A y 100% de B, [Clark, et al.1997]

Mezcla de agua subterránea ternaria:

El sistema de tres componentes fue identificado por [Douglas, M., 1997] para agua subterránea en el norte de Canadá. En este estudio, fue demostrada la mezcla entre un agua de salmuera con alta salinidad y agua moderna meteórica tomando en cuenta el decremento de la salinidad en corto tiempo en los lugares muestreados. El agua somera tiene baja salinidad y $\delta^{18}O$ igual a la media obtenida en la precipitación local, fig. 1.6. El agua de salmuera es caracterizada por contenido en Cl^- de 170 g/l y $\delta^{18}O$ alrededor de -13.5 ‰. Sin embargo, se colectaron muestras en donde la salinidad fue relativamente baja y donde el $\delta^{18}O$ disminuyó. Se identificó con esto la presencia de tres miembros extremos, con lo cual se explicó el desplazamiento de un agua subterránea diferente a la línea de mezcla generada por las componentes, moderna y salmuera.

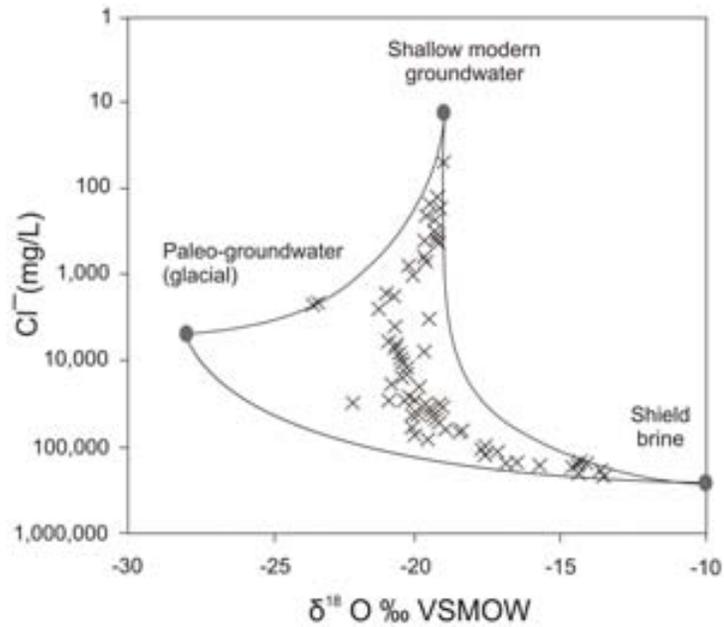


Figura 1.6: Diagrama de mezcla ternaria para agua subterránea de una salmuera Canadiense. El miembro extremo de agua de glacial fue identificado por el empobrecimiento isotópico observado en agua subterránea con profundidad intermedia, donde su composición en $^{18}\text{O} - \text{Cl}^-$ se determinó por extrapolación de ^3H libre en agua [Douglas, M., 1997].



1.3.4. Trabajos Previos

Algunos trabajos han tratado de describir al sistema acuífero como un macrosistema y otros explican efectos locales, de tal forma que hoy se conocen detalles aislados que ponen en evidencia la magnitud del problema hidrológico.

[Hernández,1991], plantea el primer modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico en condiciones iniciales. En él, postula la existencia de flujos subterráneos asociados a la cuenca superficial del alto Río Turbio, localizados aguas arriba de León, hasta Corralejo, Gto. Identifica como zonas de descarga a las planicies bajas de la cuenca. Así como flujos locales en la zona conocida como la Muralla y algunos manantiales, flujos intermedios y regionales originados en la Sierra de Guanajuato. Estos procesos se llevan a cabo principalmente en la Ignimbrita Cuatralba, Ticu, la cual aflora en mayor proporción en el área de interés de esta investigación. [SARH, 1991], identifican los procesos de transporte de cromo y definen fuentes potenciales de contaminación. [Martínez, 1992], publica una carta geológica de la Sierra de Guanajuato, la cual fundamenta los trabajos posteriores. [BGS et al., 1996], demuestran que existe recarga vertical en zonas de riego con aguas residuales, determinaron que la contaminación antropogénica esta presente. [CEASG, 1998], identifican cuatro familias hidrogeoquímicas de agua subterránea llamadas: termales, frías, mezcla y contaminadas. [CEASG, 1999], identifican en la zona de La Muralla, tres componentes que conforman la mezcla en extracción, las cuales fueron manantial Comanjilla procedente de la Sierra de Guanajuato con altas concentraciones de Li^- , B^- y Cl^- ; el segundo tipo Tutitlán proveniente de la Sierra de Pénjamo con altos valores de Cl^- y bajos en B^- y Li^- y el tercero, Muralla, bajo en Li^- y Cl^- relacionado con recarga local. [Ramos et al., 2007], publica y discute la existencia de 3 componentes de mezcla anteriores. Plantea la existencia de un flujo profundo, localizado en las rocas que subyacen al conglomerado de Guanajuato, que descarga a través de fallas y fracturas localizadas en este.

Existen trabajos hidrogeológicos locales íntimamente relacionados con el área, los cuales se resumen a continuación:



A partir de sondeos geofísicos, columnas estratigráfica y trabajo de campo, se reporta que: Los sistemas de fallas y fracturas son parte importante en la conducción del agua subterránea. El sistema de fallas alineado N-S y NE-SW forma "paredes" que entrapan al agua subterránea, dando origen a fosas capaces de retenerla y conducirla, [GEOEVALUACIONES, 1994]. Además, [SAPAL, 2002] expresa que: Las fallas normales con dirección NE-SW con saltos desde 200 a 800 m y N-S son de gran interés por formar trampas para captar agua. La idea de que las fallas pueden estar originando caminos preferenciales al flujo de agua subterránea, se expone de manera regional en el año 2004 por [CEASG, 2004], quienes proponen que en las zonas de recarga dentro del medio fracturado en los diferentes acuíferos, se infiltra entre el 6 % y el 26 % del volumen total de la cuenca hidrológica, así mismo se estima que gran parte de este volumen infiltrado no tiende a descargar en la zona del valle, sino que circula a lo largo de las zonas de fracturamiento asociadas con los lineamientos regionales, constituyendo un potencial acuífero actualmente no explorado. Argumentan que las fallas que se adentran en las zonas de recarga presentan alto potencial acuífero. Un comportamiento similar se presenta en la sierra de Guanajuato, en donde el lineamiento León, así como las fallas Comanja, Aldana y El Veinte, cambian la trayectoria del flujo que circula por la zona de afectación de la Falla del Bajío (NW-SE), en un sentido paralelo a sus trazas (de NE a SW).

Los planteamientos en los trabajos expuestos reflejan la necesidad de conocer con mayor precisión los mecanismos de recarga que están sucediendo en los Altos de Jalisco. Es por lo anterior y tomando en consideración el conocimiento que se tiene del AVL, que en este trabajo de investigación se plantea la idea de explorar con técnicas hidrogeoquímicas una parte importante de su comportamiento, donde el flujo de agua subterránea interacciona con la falla normal León, dando origen al agua que actualmente se encuentra en extracción.

Estos y otros trabajos, ponen en evidencia los esfuerzos que diferentes autores han realizado para conocer el funcionamiento hidrodinámico actual del sistema acuífero Valle de León, SAVL. Al igual que plantean nuevas preguntas que tendrán que ser corroboradas con métodos más sofisticados. Diagnosticar y aportar conocimientos sobre las transformaciones



de un sistema tanto en calidad del agua como en funcionamiento dinámico de un acuífero o parte de este, debe repercutir en la planeación de la extracción y en la salud de los usuarios.

Desde esta perspectiva, es justificable un esfuerzo adicional de análisis para la comprensión hidrodinámica e hidrogeoquímica de la sub-área poniente del acuífero valle de León, AVL, la cual no ha sido analizada de forma particular, si no que se ha supuesto su interacción real.

1.4. Marco Geológico

El acuífero o la parte del acuífero que se analiza en este trabajo se encuentra principalmente emplazado en rocas del Sistema Terciario, rocas que sobreyacen al Conglomerado de Guanajuato, sin excluir los rasgos geológicos regionales. Debido a lo anterior, en esta sección se hace un resumen de la geología que lo compone, descrita por [Hernández,1991] y [Martínez, 1992].

1.4.1. Marco Regional

Era Mesozoica

La Sierra de Guanajuato y sus alrededores conforman un conjunto de rocas de diversa litología y edad; se agrupan en dos unidades litoestratigráficas bien diferenciadas y separadas por un intrusivo granítico terciario. La unidad litoestratigráfica inferior, correspondiente al Mesozoico, la constituyen: la Piroxenita San Juan de Otates, rocas masivas cristalinas, y el Complejo Vulcanosedimentario Sierra de Guanajuato, el es un conjunto de diversas facies sedimentarias y volcánicas marinas con dos componentes, sedimentario y volcánico. El sedimentario incluye calizas y lutitas en estratos delgados, abundantes areniscas y fragmentos líticos y el volcánico se caracteriza por lavas de composición basáltica, andesítica y dacítica, en estructuras masivas o almohadilladas, con niveles de brechas, tobas y detríticos de la misma composición. Conjunto plutónico la Luz, rocas cristalinas dioríticas, tonalíticas, graníticas y excepcionalmente gabroicas. De los rasgos estructurales que se manifiestan en esta zona, se pueden distinguir dos estilos de deformación, uno Mesozoico, determinado por esfuerzos



tectónicos compresivos y otro Cenozoico, con eventos tectónicos de distensión, causantes estos últimos de los diversos pilares y fosas tectónicas, que caracterizan a la región del bajío, [Martínez, 1992].

1.4.2. Marco Local

La zona en estudios abarca parte de la subprovincia Altos de Jalisco y Bajío Guanajuatense. El Bajío, es una planicie ubicada entre los 1,700 y 1,750 m de altitud. Geológicamente es una fosa tectónica rellena de materiales que se han venido acumulando en las épocas geológicas más recientes. En este sitio, la estratigrafía está representada por formaciones sedimentarias clásticas y vulcanoclásticas (gravas, arenas, limos y arcillas en diversas proporciones) que aparecen en estratos medianamente consolidados y burdamente estratificados, en posición subhorizontal. La parte correspondiente a los Altos de Jalisco incluye formaciones cenozoicas, representadas por rocas piroclásticas de composición riolítica, materiales sedimentarios clásticos y lavas, y diversos productos volcánicos de composición basáltica.

Era Cenozoica

Granito Comanja (Tgco):

El Granito Comanja o Granito Arperos, es un cuerpo intrusivo de dimensiones batolíticas de composición granítica que aflora en toda la sierra de Guanajuato, sin deformación importante, pero presenta una aureola de metamorfismo de contacto en sus límites con la roca encajonante. Su mineralogía la constituyen cuarzo anhedral, ortoclasa, plagioclasa, biotita y minerales accesorios como zircon, apatita y fluorita. Esta unidad se encuentra en discordancia, con todas las unidades que cortó, durante la intrusión.

Conglomerado Guanajuato (Tcg):

Es una secuencia clástica continental de carácter conglomerático del distrito minero de Guanajuato. Se trata de un conglomerado polimíctico, bien consolidado, en estratos gruesos, generalmente inclinados, de color rojo y tonalidades verdosas, constituido de clastos de diverso tamaño y origen, empacados en una matriz arenosa, cementada por óxidos de hierro y/o



carbonatos; ocasionalmente con horizontes de areniscas, limolitas y lutitas. El Conglomerado Guanajuato cubre discordantemente al conjunto basal anterior y su contacto superior está en discordancia angular con la Ignimbrita Cuatralba. Edad Eoceno medio-Eoceno tardío.

Anadesita Bernalejo (Tab):

Afloramiento andesítico localizado en el poblado de Bernalejo. Algunos afloramientos se encuentran en lugares como: La Joya, La Reserva y norte de San Francisco del Rincón. Es una roca altamente fracturada y alterada, de color gris oscuro y tonalidades violáceas, muy resistente a los procesos erosivos, con una textura que varía de microcristalina a porfirítica, donde los fenocristales principalmente son de abundante plagioclasa alterada. Excepcionalmente se presentan vesículas y fracturas, algunas de ellas, rellenas de calcita. El contacto superior está en discordancia con la Ignimbrita Cuatralba, separándolas un conglomerado. Se encuentra en contacto por falla con la unidad Terciario Granular indiferenciado. La edad sugerida es Oligoceno temprano.

Ignimbrita Cuatralba (Ticu):

Se le da este nombre a todo el material de naturaleza piroclástica que conforma a las numerosas mesetas de la SG. Esta unidad es la que presenta los mayores afloramientos, después del material aluvial. Hacia la porción noroccidental de la ciudad de León puede reconocerse la unidad ignimbrítica separada por productos volcánicos de la unidad Basalto Dos Aguas. Para efectos prácticos de descripción, la unidad se ha dividido en dos miembros informales, muy fáciles de diferenciar en el campo:

Miembro Inferior:

Es una toba masiva, de composición félsica, con un color que varía de café claro a crema, poco consolidada, compuesta principalmente de cenizas, con escasos fragmentos de líticos y pómez sin colapsar. Los flujos de piroclastos, tienden a intercalarse con depósitos de caída, los primeros materiales se encuentran dispuestos en cuerpos tabulares con espesores variables, tienden a ser de colores rosáceos y blancos amarillentos, están compuestos principalmente por fragmentos de pómez y líticos accidentales, son medianamente compactos, y se presentan en diferentes niveles estratigráficos, manifestando la fase explosiva, dentro de la sucesión de



episodios volcánicos. El miembro de tobas al igual que los flujos de piroclastos se manifiestan en niveles estratigráficos distintos, se disponen en forma masiva, son bastante porosas, medianamente compactas con una textura granular característica y un fracturamiento persistente.

Miembro superior:

Las ignimbritas son rocas que tienden a presentar una mayor expresión en el terreno de estudio. Estas rocas son de color rosa, que intemperizan en el mismo color con tonalidades amarillentas y ocasionalmente parduzcas, se disponen en forma de cuerpos tabulares que regularmente tienden a ser masivos. Las ignimbritas o tobas soldadas están constituidas principalmente por vidrio volcánico con fenocristales de cuarzo, feldespatos y ocasionalmente líticos accidentales, presentan comúnmente fiammes y un marcado fracturamiento extensivo o vertical.

Basalto dos Aguas (Tbda):

Nombre asignado a los derrames lávicos esparcidos por una estructura volcánica al noroccidente de la ciudad de León. La conforma un solo afloramiento extenso y continuo de basalto de olivino, color gris oscuro, textura microcristalina, asociado con productos piroclásticos de la misma composición, generados a partir del volcán Cerro Dos Aguas. Estos derrames se encuentran interestratificados con la Ignimbrita Cuatralba, por lo que se le asigna una edad tentativa del Oligoceno, considerándolo, además, como un vulcanismo bimodal, típico de una tectónica distensiva.

Terciario Granular Indiferenciado (Tgi):

Es todo el material sedimentario continental, excepto el aluvión, que se encuentra rellenando la depresión del bajío y que aflora en forma de lomerios. Esta unidad se constituye de conglomerados, areniscas, limolitas, lutitas y calizas.

Conglomerados:

Polimiticos de forma masiva y color rojo con clastos subredondeados de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, pobremente clasificados, grado de consolidación variable, ocasionalmente cementados con carbonato de calcio.

Areniscas:



Son de colores claros y se encuentran interestratificadas con limolitas en alternancia irregular, en estratos delgados a medianos y grado de compactación variable.

Limolitas:

Son de tonos claros, variando de crema a amarillo y se encuentran interestratificadas con las areniscas, los estratos se caracterizan por ser delgados y de compactación variable.

Lutitas:

Se presentan en tonos claros, con colores que varían de verde a amarillo; son fisiles o compactas, en estratos delgados.

Calizas:

Varían de microcristalinas a arenosas o arcillosas, con intraclastos subredondeados de composición diversa; son de color crema a café claro. Sobreyace a la Ignimbrita Cuatralba discordantemente y se encuentra en contacto por falla normal con la Andesita Bernalejo. Subyace concordantemente al Basalto el Cubilete. La edad asignada a esta unidad es Holoceno-Pleistoceno.

Periodo Cuaternario

Gabro Arperos (Qgar):

Gabro de color café oscuro, de textura holocristalina, con minerales de labradorita, piroxenos, olivino y minerales opacos. Es probable que esta unidad se relacione genéticamente con la unidad Basalto El Cubilete, considerando a esta última, el elemento extrusivo perteneciente al Gabro Arperos.

Basalto El Cubilete (Qbcu):

Se le da este nombre a los basaltos y andesitas que afloran a lo largo de la SG. Se trata de olivino y andesitas de augita y representan las últimas manifestaciones volcánicas de la región. Se considera con una edad Post-pliocénica.

Aluvión (Qal):

En esta última unidad se agrupan todos los depósitos continentales clásticos no consolidados (gravas, arenas, limos, arcillas, y suelo residual) que afloran en el pie de monte, planicie



del valle, cima de algunas mesetas lávicas y a la vera de los ríos y arroyos que bajan de las distintas elevaciones montañosas.

Para la zona en estudio se resume que:

Sobre las formaciones riolíticas, se localizan depósitos de conglomerados y arenas en diversas proporciones, semiconsolidados en estratos gruesos en posición subhorizontal. Sobreyaciendo a los terrenos sedimentarios clásticos o directamente encima de las tobas e ignimbritas, aparecen rocas de composición basáltico-andesítica en derrames de lavas de espesor considerable. El vulcanismo de este tipo es común y abundante en esta porción de los Altos de Jalisco. En esta región también está presente el vulcanismo basáltico emanado de pequeños aparatos volcánicos, como el cerro Las Dos Aguas al NW de la ciudad de León. Al poniente aparece otra pequeña estructura de este tipo, así como una pequeña caldera volcánica, materializada por la depresión de la colonia La Joya. Estas rocas forman los puntos culminantes del área de estudio. Este vulcanismo basáltico representa la última manifestación magmática de la región. Su edad no ha sido determinada por métodos isotópicos, pero como se ha dicho parece representar el vulcanismo precoz del Cinturón Volcánico Mexicano, de probable edad Mioceno Tardío, [Martínez, 1992].

Falla Normal León

En el Cenozoico se presentan tres sistemas de fallamiento normal con rumbos NW-SE, NE-SW y N-S bien identificados. Los primeros episodios de esfuerzos extensionales que se han reconocido para esta región, corresponden al Paleoceno tardío-Eoceno temprano y son consecuencia del emplazamiento granito Comanja. También se han detectado sistemas de fallas normales que afectan a los diversos depósitos de naturaleza piroclástica del Oligoceno. Existen otros sistemas de fallas de edad Post-oligoceno que se han considerado.

Como eventos distensivos, aún más recientes, es probable que algunos de los sistemas de fallas se asocien con los actuales eventos distensivos de la porción centro-norte del Cinturón Volcánico Mexicano, por donde se han estado extravasando materiales de composición basáltica y andesítica de la unidad Basalto el Cubilete. Estas fases distensivas que se han

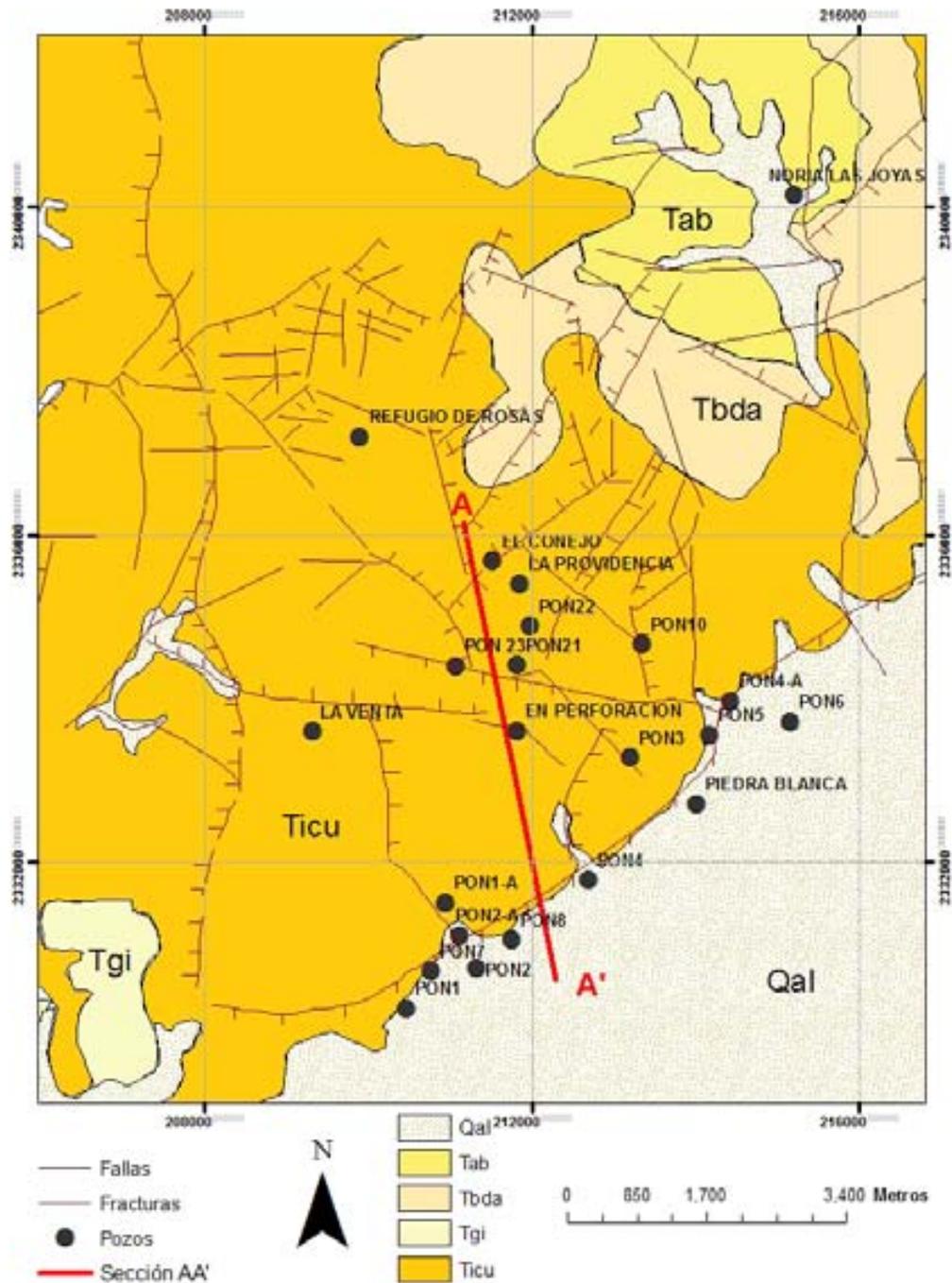


Figura 1.7: Marco geológico local. Sección A-A', en las cuales se fundamenta el sistema de flujo y el presente análisis. Las rocas riolíticas son las principales constituyentes del área, Ticu, así como el relleno terciario, Tgi, que compone el Valle y principal acuífero en extracción, tomado de [CEASG, 2004] y modificado de [GEOEVALUACIONES, 1994].



establecido no indican necesariamente que entre ellas hayan existido periodos de inactividad, o que sean las únicas, ya que en ocasiones, las direcciones de fallamiento NW-SE y NE-SW se encuentran presentes en una fase deformativa, mientras que en otras solo se reconoce alguna de las dos. Estas fallas normales presentan diferentes edades en distintos segmentos dentro de un mismo sistema de fallas e incluso se han podido observar indicios de reactivación en algunas de ellas [Nieto, 1992]. En lo relacionado a las fracturas estas se presentan bien desarrolladas, incluso bastante densas en la Sierra de Guanajuato y en los Altos de Jalisco. Particularmente, las rocas ignimbríticas, los basaltos y las andesitas, son las que presentan el mayor fracturamiento, con lo que demuestran su gran potencial de infiltración. En los Altos de Jalisco esto parece tener mayor importancia en la infiltración del agua meteórica.

La estructura lineal León, está localizada hacia el extremo noroccidental del VL, en donde se puede seguir por espacio de 64 km, atravesando los acuíferos de Río Turbio y Valle de León, se considera que corresponde con una falla de desplazamiento con componente lateral sinistral, teniendo como referencia la estructura en echelón que forma el graben de San Francisco con este lineamiento. Se encuentra orientado en una dirección N27°E, a lo largo de su traza está afectando a los materiales derivados de la actividad de la SMO al igual que a la secuencia mesozoica metamorfizada, así mismo, trunca la continuidad de la Falla El Bajío.

Capítulo 2

RESULTADOS

2.1. Metodología

Para lograr el objetivo planteado, se realizaron actividades tanto documentales como de campo. Requirió del muestreo y análisis químico de 21 aprovechamientos situados en dos unidades hidroestratigráficas diferentes; por un lado se trata de rocas vulcanosedimentarias ácidas y por el otro un relleno sedimentario de diferente granulometría, las cuales se encuentran en contacto debido al desplazamiento de roca originado por un falla normal regional en sentido N27°E.

2.1.1. Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete consistió en el análisis de información para el conocimiento de la zona, planeación y organización de las salidas al campo, censo de aprovechamientos y manejo de la información en sistemas de información actualizados, los cuales se resumen a continuación:

Revisión y análisis de literatura relacionada con el tema a tratar en libros especializados, artículos científicos, reportes técnicos, material audiovisual y artículos para fundamentar la problemática e identificar técnicas que se pudieran aplicar, que estuvieran a nuestro alcance y fueran aplicables para alcanzar el objetivo planteado. Investigación de información hidrogeo-



lógica y química, local y regional existente., esta actividad abarcó el análisis y sistematización de información geológica, estratigráfica, topográfica, climática, parámetros hidrogeológicos e ingeniería de pozos que pudieran proporcionar una idea inicial del sistema, lo cual se logró con el apoyo de diferentes organismos como el SAPAL, CEAG, SGM, IGE, SMN, INEGI y propietarios particulares que han realizado estudios en el área. Posteriormente se localizaron y seleccionaron pozos en ambos lados del trazo de la falla, que servirían como testigos para el entendimiento del funcionamiento del sistema. Así como, localización de puntos para la instalación de estaciones recolectoras de agua de lluvia. Cubierto el punto anterior, se procedió a la planeación de las salidas al campo para realizar las mediciones fisicoquímicas y muestreo para análisis químico e isotópico. Los resultados fueron procesados, originando las correlaciones que se presentaran durante los siguientes capítulos. Se procesaron e interpretaron los datos fisicoquímicos medidos en campo, iones mayores e isótopos de tal manera que integrados fortalecieran la idea de la interacción de diferentes componentes de mezcla. El procesamiento de datos requirió de la actualización y entrenamiento de software, con los cuales se pudieran elaborar mapas donde se integró la información generada. Se utilizaron paqueterías comerciales como Arc Gis 9.2, Surfer 8, Global Mapper 7, Winrock, y algunos proporcionados por el INEGI para un mejor manejo de la información. Después del análisis y manejo de la información, se plantea el modelo de mezcla resultante y se calculan las proporciones de las componentes extremo en algunos pozos utilizando la metodología convencional y software MIX.

2.1.2. Trabajo de campo

El muestreo para análisis químico, se llevo a cabo apegados a las recomendaciones que se presentan en la NOM 014-SSAI-1993, que plantea los procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. Se tomó muestra para iones mayores, isótopos estables y se midió in situ, pH, conductividad eléctrica y temperatura.

Del total de pozos en el área se seleccionaron 21 para análisis químicos e isotópicos. Se



realizó su geoposicionamiento con GPS manual. Las muestras fueron tomadas directamente de la descarga de los pozos, previo a la cloración, fueron filtradas en campo con una bomba peristáltica utilizando para cada caso filtros de $0,45\mu m$, las muestras para cationes fueron acidificadas hasta alcanzar un pH 2 con HNO_3^- ultra puro. Se conservaron en una hielera donde se procuró mantener una temperatura menor a $10\text{ }^\circ C$. A estos se les midió pH, conductividad eléctrica y temperatura, con un equipo combinado Polintest Waterproof 800, el cual fue calibrado diariamente con soluciones bufer de 4, 7 y 10 de pH y $700\ \mu S/cm$ para el sensor de conductividad eléctrica. Para la determinación de la alcalinidad se realizó titulando un volumen 20 ml de muestra con ácido sulfúrico de normalidad conocida el cual se aplicó gradualmente con un titulador digital Hach, hasta obtener un volumen de ácido el cual se relaciona directamente con los mg/l de HCO_3^- .

Se realizó una prueba de bombeo con duración aproximada de 650 min, donde paralelamente se utilizó una sonda Troll200, la cual fue insertada en una celda acrílica aisladora de agua con flujo constante y se programo para el registro temporal de los parámetros físicos, conductividad y temperatura, de tal forma que se obtuvo el registro del cambio de estos parámetros. Esta fue calibrada con una sustancia con conductividad conocida antes de su uso.

El conocimiento de la componente isotópica contemporánea de lluvia en la región es fundamental, por lo que se seleccionaron 10 puntos que cubren el área del AVL para la instalación de estaciones recolectoras de lluvia para la temporada 2005, de las cuales solo se rescataron 7. Se procuró que el exterior fuera reflector de la luz solar. Se utilizaron recipientes de 20 l, los cuales se farraron con tres materiales aislantes que consistieron de dos capas de plástico, una capa de material reflejante y lamina de aluminio. El recipiente esta provisto de un embudo y aceite mineral no reactivo Nujol, el cual disminuye el efecto de evaporación del agua de lluvia recolectada, [Cortés et al., 1989]. Se instalaron en lugares altos donde no pudieran ser alterados y sobre una superficie blanca reflejante de la luz solar. Se tomó una muestra representativa de toda la temporada de lluvias para su análisis en isótopos estables. Para el muestreo isotópico se utilizaron botellas de polietileno de alta densidad de 60 ml, se



llenaron completamente y se sellaron para evitar evaporación. Se mantuvieron en las mismas condiciones térmicas que las muestras para análisis de iones mayores.

2.1.3. Métodos de medición en el laboratorio

El análisis de las muestras para determinar los parámetros químicos y metales traza, se realizó en el Laboratorio de Química de la Unidad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Guerrero. Las muestras de cationes con excepción del sodio se realizaron por Espectrofotometría de Emisión Atómica por Inducción de Plasma Acoplado (ICP-AES), con un equipo PERKIN-ELMER OPTIMA 3200DV. La calibración se efectuó utilizando estándares multielementales de referencia internacional High Purity (CWW-TM-D; CWW-TM-H) y estándares unielementales certificados PERKIN-ELMER y BUCK. La estabilidad del equipo, método y la calibración se verificaron con estándares del mismo tipo (CWW-TM-A), con valores certificados por debajo de la Norma Oficial Mexicana para Agua Potable (NOM-127-SSA-1994). Después de cada cinco muestras se analizó el estándar de verificación para asegurar la precisión y exactitud de los análisis. El sodio fue analizado por Absorción Atómica con un equipo Perkin Elmer, Analyst-100. En la calibración se utilizan estándares de 0.5, 1.5 y 4.5 mg/l preparados a partir de un estándar certificado de 1000 mg/l. Los análisis de carbonatos y bicarbonatos se realizaron por volumetría utilizando el método de titulación con HCl 0.02 N y fenolftaleína, verde de bromocresol-rojo de metilo como indicadores colorimétricos. La calibración del método se realizó preparando estándares de 50, 100 y 150 mg/l de HCO_3^- a partir de un estándar de 1000 mg/l de HCO_3^- , preparado con $NaHCO_3$ grado reactivo BAKER y agua descarbonatada. La metodología empleada para el análisis de aniones (Cl^- , F^- , NO_3^- , SO_4^{2-}), incluyendo la calibración y la validación del método se llevo a cabo con un cromatógrafo iónico Metrohm 761. El análisis se realizó con una columna Metrohm A SUP 5-100. Se utilizó como eluente 4.8 mM de Na_2CO_3 + 1.5 mM de $NaHCO_3$, así como $4H_2SO_4$ 100 mM como regenerador de la columna de supresión y agua miliQ para la limpieza de líneas. La composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δ^2H fue determinada en el Laboratorio de Espectrometría de Isótopos Estables del Instituto de Geología de la UNAM, por medio



de un Espectrómetro de masas Finnigan Delta Plus XL.

2.2. Funcionamiento Hidrogeológico Local

En esta sección se analizan las condiciones hidrogeológicas del sistema en cuestión bajo el precepto de que un modelo conceptual es la descripción cualitativa de un sistema y su representación, [Maloszewski, 2005].

2.2.1. Modelo Conceptual

Como se ha dado a conocer en las secciones anteriores, el acuífero VL consta de dos medios diferenciables: en la porción superior se encuentra el material granular al que le subyace el paquete del medio fracturado constituido por ignimbrita que, en conjunto, forman la fosa tectónica conocida como VL, donde se alcanzan espesores de 200 a 900 m.

Tabla 2.1: Valores de conductividad hidráulica, k , para los diversos materiales geológicos que constituyen el acuífero Valle de León, tomados de [Hernández,1991], [CEASG, 1998]

Tipo de material	Conductividad hidráulica $k(m/s)$
Terciario Granular Indiferenciado, Tgi	0.23×10^{-4}
Ignimbrita Cuatralba (Toba), Ticu	0.19×10^{-4}
Ignimbrita Cuatralba (Ignimbrita), Ticu	0.10×10^{-4}
Basalto Cubilete, Tbc/Terciario Granular Indiferenciado, Tgi	1.85×10^{-6}
Conglomerado Guanajuato, Tcg	8.10×10^{-7}

A partir de 10 cortes litológicos, reportes técnicos y tesis consultadas, así como la verificación geológica realizada en el área de estudio, en la figura 2.1 se muestra una sección A - A', aproximadamente cubriendo 5 km, en la cual se muestra un modelo de funcionamiento hidrodinámico local simplificado, el cual sera utilizado como fundamento para el posterior



análisis de las muestras de agua obtenidas. Se infiere que existe un flujo de agua subterránea hacia las partes bajas correspondientes al Tgi que conforma una parte importante del acuífero VL. De acuerdo a la topografía y escurrimiento superficial que presenta el lugar, se percibe un parteaguas superficial hacia el lado poniente del área de estudio o zona norte de San Francisco del Rincón, donde se encuentra reportado que existieron manantiales, los cuales funcionaban como descarga de este sistema de flujo.

El modelo de flujo de agua subterránea queda descrito de la siguiente manera: el agua meteórica se infiltra en la roca fracturada y aluvial superficial, satura las rocas que le subyacen, localizadas a 100 y 150 m de profundidad con un espesor variable. Inmediatamente se encuentra el Conglomerado Guanajuato, Tcg reportado con una baja permeabilidad, lo cual da origen a las líneas equipotenciales que describen el flujo de agua subterránea de la parte norte, superior topográficamente, hacia las partes de menor potencial. Esta agua se incorpora al material de relleno que compone al VL el cual recibe aporte vertical de agua superficial residual y meteórica. A lo largo del trazo de la falla León ocurre un cambio de conductividad hidráulica que no es significativa, entre el Ticu y el Tgi, lo cual no provoca un efecto de barrera al flujo horizontal y permite el flujo lateral.

Haciendo un cálculo simple, si se estima el volumen de recarga debido al agua meteórica contemporánea en esta zona, considerando un área de 10 km^2 y un aporte de lluvia contemporánea de solamente un 20 %, entonces:

$$600 \text{ mm/a} \times 20 \% = 120 \text{ mm/a}$$

Considerando un área de 10 km^2

$$10 \text{ km}^2 = 100,000,000 \text{ m}^2$$

entonces se generara una lamina de

$$12,000,000 \text{ m}^3/\text{a}.$$

Parte de esta recarga se pudiera estar incorporando a la parte norte de San Francisco del Rincón como se menciona con anterioridad.

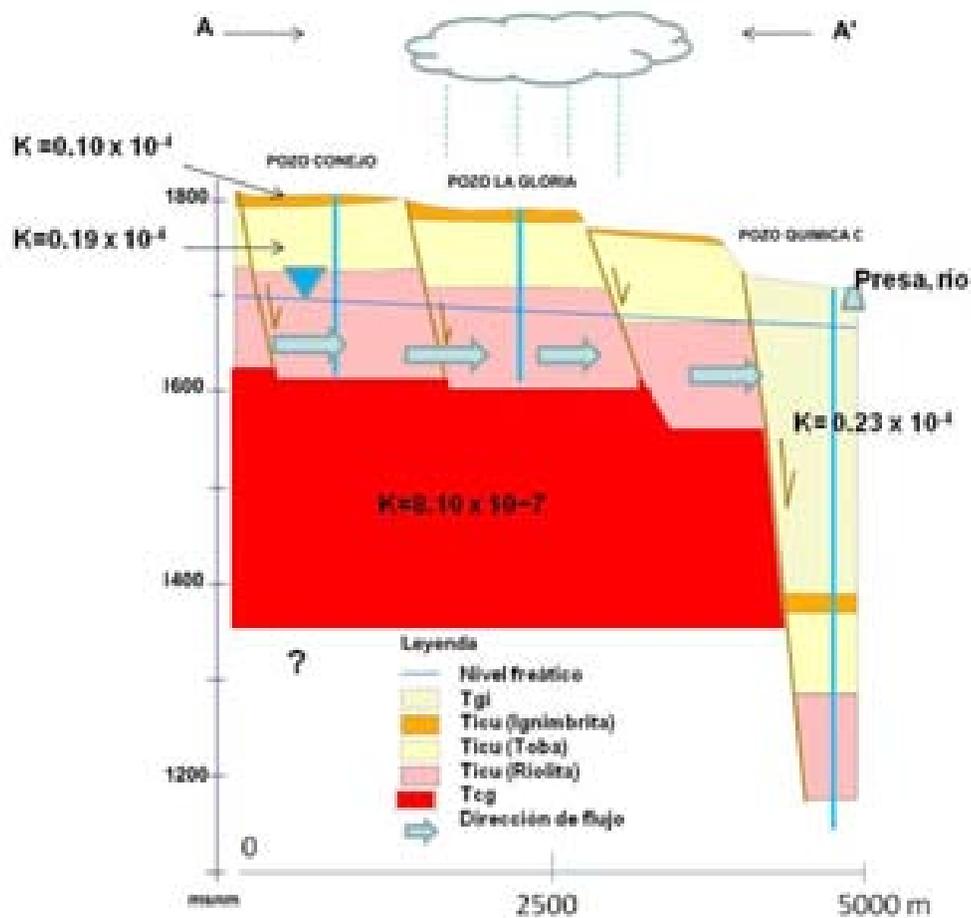


Figura 2.1: Diagrama esquemático del modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico local fundamentado en 11 cortes litológicos recopilados de la zona, proporcionados por [Escorpion, 1990] y [Reyes, 2007]. En rojo el Conglomerado de Guanajuato, Tcg, en rosa, crema y anaranjado los estratos que componen a la Ignimbrita Cuatralba, Ticu. La dirección del flujo es en sentido A-A', norte-sur, a través del Ticu, recibiendo recarga meteórica y descargando hacia el valle.



Suponiendo que la ley de Darcy pudiera aplicarse en este ambiente, lo que implica un medio homogéneo e isótropo donde se están llevando a cabo flujos laminares, calcularemos el volumen de agua lateral proveniente de los altos de Jalisco a través de la Ticu y descargando al Tgi, suponiendo un espesor saturado de $100m^2$. Un gradiente de $i = 0.01$ y una $k = 2$ m/día con un área de $10,000m^2$.

Se genera un gasto

$$Q = 200 \text{ m}^3/\text{día}$$

Por lo tanto en una franja de 10 km con 100 m de espesor saturado (distancia aproximada de León a San Francisco del Rincón) se estarían incorporando al Tgi

$$20,000 \text{ m}^3/\text{día} = 7,300,000 \text{ m}^3/a$$

Casi el 75% de la componte contemporánea calculada con anterioridad.

Si suponemos 10 pozos localizados en la parte superior extrayendo las 24 h del día un caudal de 5 l/seg, se estaría extrayendo 50 l/seg y en 24 horas

$$4,320 \text{ m}^3/\text{día} = 1,576,800 \text{ m}^3/a$$

Lo que corresponde a 21.6% menos de la recarga al Tgi desde esta zona. De acuerdo a las cifras anteriores, es posible una recarga importante proveniente de la Ticu y descargando al Tgi, la cual se pudiera estar extrayendo a través de pozos inmediatos al trazo de la falla.



Características de Pozos:

La importancia de la ingeniería de los pozos crece cuando se trabaja en un acuífero heterogéneo o estratificado. En estos sistemas es necesario un diseño especial que haga más eficiente y sanitaria la extracción en cada punto. En nuestro caso, las muestras de agua obtenidas para el laboratorio son una mezcla de los diferentes estratos que el pozo capta. De esta manera, las características de diseño de un pozo nos da la información inicial que debemos considerar para el tratamiento de sus características químicas.

Debido a lo anterior, en esta subsección se analizan algunas características ingenieriles de pozos medidas en campo y recopiladas. Se analizará la superficie potenciométrica y los niveles estáticos históricos observados en algunos pozos los cuales ayudaran a dilucidar la interacción del agua superficial y subterránea como se corrobora en la prueba de bombeo relaizada.

La tabla 2.2 presenta los datos derivados de un análisis de videos tomados por el SAPAL como parte de sus trabajos de rehabilitación y algunos datos proporcionados por dueños particulares de pozos aledaños.

Resulta evidente que se necesita mayor conocimiento de la ingeniería de los pozos, pero aún con esta limitación, la tabla 2.2, muestra que la profundidad de los pozos va de 457.6 m a 190 m. La obra de protección sanitaria es variable desde 165 m hasta 17 m. En el pozo Poniente 7 se ve una alternancia del tubo ranurado que va de los 39.5 m hasta los 83 m, probablemente asociado a lentes arcillosos. Podemos inferir también que, algunos pozos como el poniente 7, 5, 4 y quizá el pozo 1a, pudieran estar en riesgo sanitario por la corta longitud de su tubo sanitario y estar induciendo agua de retorno de riego de baja calidad. Es posible que la mayoría de los pozos se encuentren ranurados a partir de donde termina el tubo sanitario hasta su profundidad total, lo que implica que se encuentran extrayendo agua almacenada en las rocas riolíticas y en el Terciario indiferenciado, principalmente.



Tabla 2.2: Características ingenieriles de algunos pozos localizados en la zona de estudio. Los datos de la Batería Poniente fueron extraídos de videos tomados desde el año 1997 a 2001 y reportados por [SAPAL, 2002].

Pozo	Longitud	Latitud	Altitud	Tubo liso m	Ademe ranurado m	Profundidad del pozo m
Poniente 1	210463	2330216	1775	0-165	178.7-	457.6
Poniente 1a	210938	2331501	1800	0-78.5	78.5-profundidad total	337.19
Poniente 2	211315	2330710	1772			252.07
Poniente 2a	211117	2331106	1784			300
Poniente 3	213197	2333273				
Poniente 4	212682	2331778	1769	0-17	17-300	
Poniente 4a	214409	2333965	1779			315.5
Poniente 5	214157	2333547	1778	0-51.6	51.6-profundidad total	300
Poniente 6	215145	2333708	1774			
Poniente 7	210760	2330671		0-35.9	variable desde 39.5	mayor 300
Poniente 8	211751	2331046		0-83	83-profundidad total	
Poniente 10	213338	2334657	1887	0-228		325
Pozo Fraccionamiento	211074	2334389	1890			200
Pozo casa	211353	2334809	1904			200
El Conejo	211517	2335674	1921			220
Pozo apohls	210731	2335840	1900			227
La Venta	209318	2333588	1938			300
Poniente 21	211819	2334399	1893			190
Poniente 23	211074	2334389	1911			
La Providencia	211847	2335390	1914			250
Piedra Blanca	214002	2332705	1784			40
Pozo en perforación	211810	2333602	1893			360



2.2.2. Superficie Potenciométrica

Considerando que estamos trabajando en un acuífero libre, se generó una superficie potenciométrica con respecto al nivel de mar, con los datos obtenidos de niveles estáticos en algunos pozos para el año 1994 y 1997, reportados en diferentes estudios, figura 2.2. Las líneas de flujo perpendiculares a las superficies potenciométricas manifiestan un patrón con dirección hacia la parte topográficamente baja.

Por otro lado, de la figura se deduce que el flujo va de las partes altas como Refugio de Rosas a las partes bajas que pueden corresponder tanto al Valle de León como a la zona norte de San Francisco del Rincón. Lo cual dividiría la recarga neta hacia estos dos lugares. Este comportamiento es debido a que el estrato inmediato a las riolitas puede ser el conglomerado de Guanajuato, Tcg, el cual provoca que se den flujos laterales por ser una roca de baja permeabilidad. En otras palabras si el nivel en la zona norte bajara hasta la profundidad correspondiente a la frontera con el Tcg, se estaría hablando de pozos con muy bajo o nulo rendimiento, pues tiene muchas limitaciones la zona saturada de donde se extraería agua subterránea. Es evidente este efecto de abatimiento pues al pozo La venta le han sido añadidos 12 m de tubo para seguir extrayendo agua a razón de 6 l/seg aproximadamente, considerando que presenta un nivel estático cercano a los 240 m de profundidad.

2.2.3. Variación de Niveles Estáticos

En la literatura se presenta que algunos sistemas responden de manera inmediata a la precipitación. Este efecto es apreciable en muchos casos para manifestaciones hidráulicas como manantiales, principalmente los intermitentes. Esta misma idea es aplicable a la respuesta en los niveles estáticos que pudieran tener algunos pozos en donde los eventos extremos y avenidas en ríos influyen en la recarga rápida al acuífero, [Carrera, 1984]. El siguiente análisis se hizo con el conocimiento de que un pozo no presenta un nivel estático confiable si no es mantenido en reposo por un lapso de tiempo como para que alcance su estado estacionario.

En la gráfica 2.3, se muestra la relación que existe entre los mm de lluvia contemporánea,

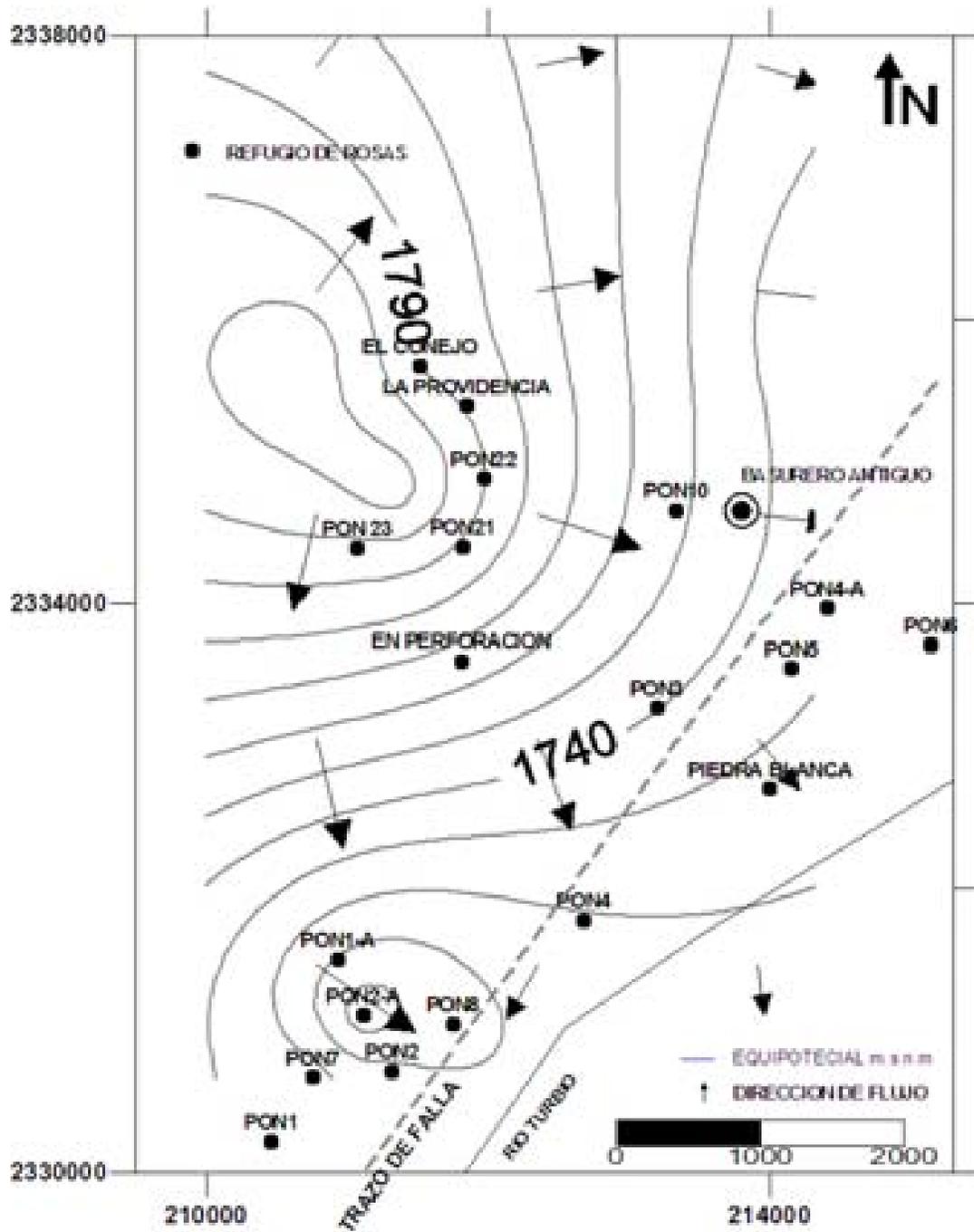


Figura 2.2: Superficie potenciométrica local, construida con datos del nivel estático para el año 1994 y 1996. Describe una dirección de flujo norte-sur. Fuente: [GEOEVALUACIONES, 1994] y [SAPAL, 2002].

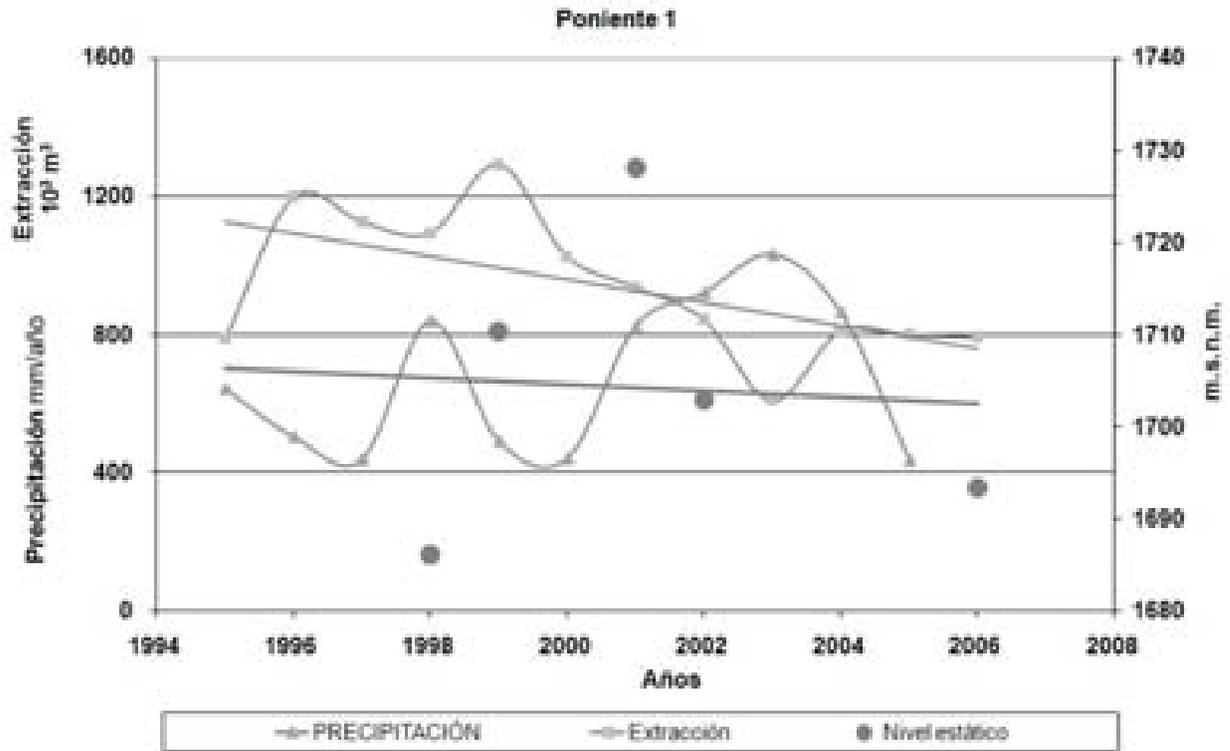


Figura 2.3: Correlación entre la lluvia media anual, extracción total anual y nivel estático para el pozo Poniente 1. Se observa una variación de nivel estático de 45m en un lapso de tiempo de 8 años con tendencia al abatimiento. La extracción bajó de 1,100,000 a 800,000 m^3/a . Fuente SMN y SAPAL.

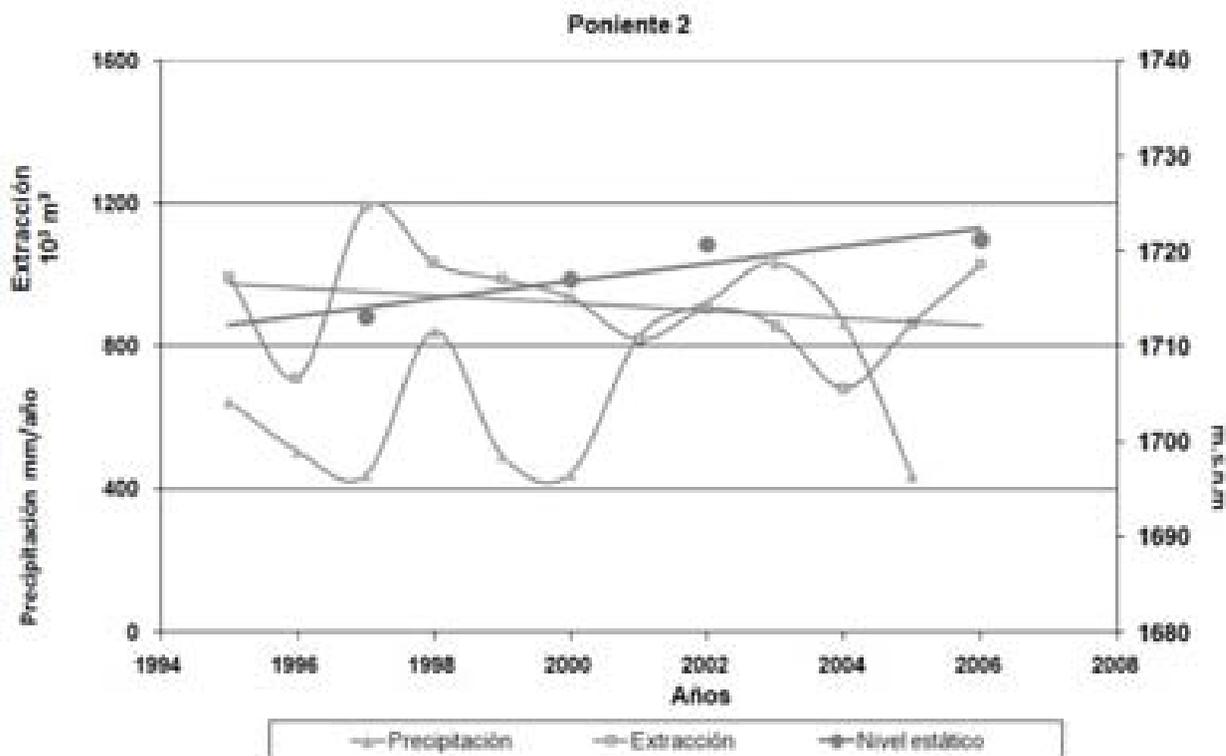


Figura 2.4: Correlación entre la lluvia media anual, extracción total anual y nivel estático para el pozo Poniente 2. Se observa una variación del nivel estático de 10m en un lapso de tiempo de 8 años con tendencia a la recuperación. La extracción es variable con tendencia a disminuir. Fuente SMN y SAPAL.

la extracción y los escasos datos de niveles para el pozo Poniente 1. Se aprecian variaciones de 40m en un lapso de 8 años. Su extracción disminuyó $400,000m^3$ en un lapso de 10 años. La precipitación para los años 2001 a 2004 se registró arriba de los 800 mm, superior a la media anual de 650mm. La tendencia del nivel estático es aproximadamente constante sin importar el decremento en la extracción. Es probable que este pozo no manifieste de forma inmediata la recarga contemporánea debido a que es el más profundo, 457.6 m con un ranurado a partir de 165 m.

La gráfica 2.4 muestra el caso del pozo Poniente 2, con menor volumen de extracción respecto al poniente 1 y con tendencia a la recuperación de nivel, probablemente debido a la disminución en el volumen de extracción y al aumento en los milímetros de lluvia en esa época. Lo cual indica un evento de recarga más rápido que en el Poniente 1, aún con el hecho

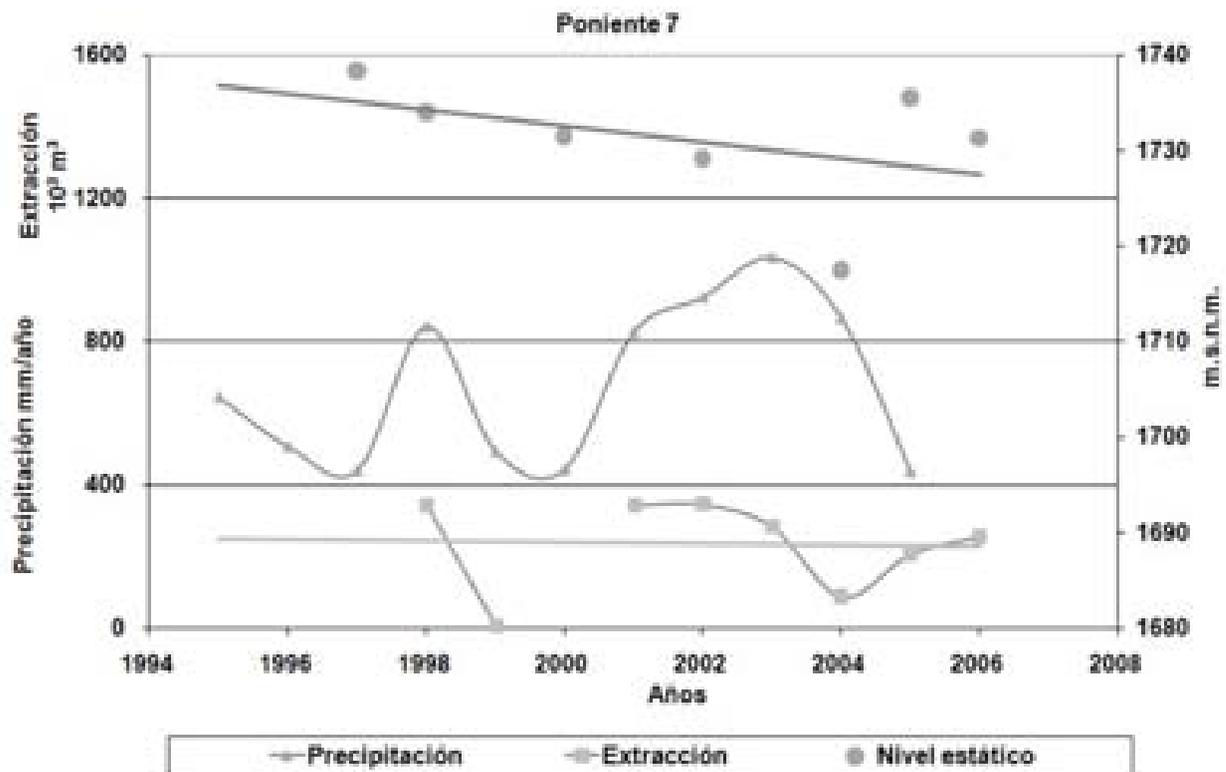


Figura 2.5: Correlación entre la lluvia media anual, extracción total anual y nivel estático para el pozo Poniente 7. La variación del nivel estático es de 10m con tendencia a permanecer constante y extracción con tendencia constante. Fuente SMN y SAPAL.

de que solo disminuye su caudal $100,000m^3$ y el Poniente 1, $300,000m^3$. Este comportamiento puede ser debido a que se encuentra relacionado con las condiciones superficiales que influyen sobre este pozo.

El pozo poniente 7 permaneció desactivado del año 1999 al 2001, seguramente por mantenimiento, resulta con tendencias suaves prácticamente paralelas en la zona donde existen datos constantes. Este comportamiento indica que no se ve afectado por la recarga local debida a los eventos de precipitación anuales.

Debido a que los datos no presentan continuidad en un rango de tiempo considerable, es difícil hacer aseveraciones, pero en el siguiente capítulo se utilizan otros parámetros para fortalecer este planteamiento.



2.3. Hidrogeoquímica

Existen parámetros fisicoquímicos que proporcionan información inicial y que junto con mediciones de otros parámetros pueden ir conformando una interpretación del comportamiento de un sistema. La tabla 2.3 resume las mediciones hechas para este trabajo y por personal de SAPAL de enero de 2006 a octubre de 2006 para pH, conductividad, temperatura y sólidos totales disueltos, asociada a cada pozo que constituye la batería Poniente y pozos cercanos. Estos valores promedio presentan un CV (coeficiente de variación de Pearson) menor al 10 %. Existen pozos donde fueron medidos mensualmente estos valores.

2.3.1. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica, CE, del agua subterránea, es la capacidad que tiene de conducir la electricidad. Es debida a las especies disueltas, por lo que se puede ver alterada de forma natural por disolución y precipitación de elementos mayores contenidos en las rocas. Los cambios en la temperatura afectan los valores de conductividad dependiendo de las sales y su concentración, [USGS, 1992]. La conductividad eléctrica es el valor inverso de la resistividad eléctrica. Las concentraciones de los iones en agua natural son por lo general tan bajas que la conductividad eléctrica se expresa en $\mu S/cm$, generalmente es referida a la temperatura de 25 °C. La conductividad del agua pura es de $4.2 \mu S/cm$, pero es imposible conservar ese tipo de agua en condiciones normales. Por otra parte el agua destilada presenta una CE en un rango de $0.5-5 \mu S/cm$.



Tabla 2.3: Parámetros físicos medidos en campo y su correspondiente desviación estandar, σ , calculada con datos medidos a partir del año 2000 hasta 2006, proporcionados por el SAPAL, así como, dato de agua de lluvia para San Luis Potosí, [Cardona, 2007]

PROCEDENCIA	pH/ σ	$^{\circ}C/\sigma$	$\mu S/cm/\sigma$	STD (mg/l)/ σ
PONIENTE 1	7.4/0.13	30.9/0.45	692/59.0	476/16.7
PONIENTE 1a	7.6/0.18	31.7/0.34	462/17.4	297/7.6
PONIENTE 2	7.3/0.24	28.0	1197	729
PONIENTE 2a	7.4/0.38	31.2/0.49	456/45.9	294/3.8
PONIENTE 3	7.2/	28.0/0.62	570/33.5	401/28.9
PONIENTE 4	8.0/0.35	34.7/2.35	752/49.3	455/17.8
PONIENTE 4a	8.0/0.25	34.6/2.75	668/43.7	417/38.2
PONIENTE 5	7.7/0.25	31.8/0.88	546/23.6	372/8.6
PONIENTE 6	7.4/0.20	28.3/0.70	574/34.4	386/6.0
PONIENTE 7	7.5/0.17	27.9/0.48	606/33.7	414/12.1
PONIENTE 8	7.7/0.24	31.9/0.94	616/25.1	402/12.9
PONIENTE 10	7.9/0.26	36.1/3.96	671/25.5	442/10.4
Piedra Blanca	6.1	21.7		
La Providencia	7.5	32.4	466	195
Poniente 22	6.9	32.4	466	
La Venta	8	34.1	699	284
Poniente 21	6.2	30.7	494	214
Poniente 23	6.3	33.8	467	192
El Conejo	7.6	30.2	425	277
Refugio de Rosas	7.4	26.7	546	380
Las Joyas	7.2	20.8	950	841
En perforación		42.0		
Agua de lluvia SLP	5.8	20.0	27.6	



Después de que el agua de lluvia, con una conductividad baja se pone en contacto con la roca ($27.6 \mu S/cm$, [Cardona, 2007] para lluvia en San Luis Potosí), ésta se enriquece en iones mayores aumentando su conductividad. Un efecto importante en consideración fue el experimento realizado en una prueba de bombeo que revela la evolución de la conductividad en función al tiempo, ver figura 2.6. En esta se aprecia un decremento de la conductividad de $200 \mu S/cm$ en un lapso de 200 minutos. Este comportamiento se relaciona con la extracción de agua somera inicialmente, con contenido de sólidos totales mayor que al final de la prueba. Se observa que al rededor de los 300 min, presenta características de agua más profunda, menos mineralizada, y al final de la prueba se detecta una probable tendencia a la recuperación que pudiera deberse a que el cono de abatimiento se amplía hasta que induce agua con un contenido mayor en STD, aumentando su conductividad.

En la tabla 2.3 se presentan los valores físicos obtenidos en los pozos de la zona en estudio. La conductividad eléctrica va de $425 \mu S/cm$ para el Pozo el Conejo localizado en la parte superior hasta $1197 \mu S/cm$ correspondiente al pozo Poniente 2. El valor para la noria Piedra Blanca resultó ser anómalo.

La figura 2.7, presenta las isolíneas de conductividad, las cuales fueron construidas utilizando el software Surfer 8. El método de extrapolación empleado fue el de kriging, el cual es un método geoestadístico de regresión lineal que provee valores estimados de aquellos sitios donde no hay información. En ella se sintetiza la información y se muestra que existe un rango de variación importante entre la conductividad que presentan los pozos. Su variación se encuentra entre $425 \mu S/cm$ y $752 \mu S/cm$; sin tomar en cuenta a las norias Piedra Blanca y Las Joyas, así como al pozo Poniente 2 los cuales son mayores a $950 \mu S/cm$. Han sido medidos valores de CE dentro del acuífero, menores a $300 \mu S/cm$ los cuales son asociados a agua contemporánea lo que fortalece el razonamiento que esta de acuerdo con la evolución de norte a sur del agua subterránea, con algunas observaciones: existe un cambio repentino mayor a $100 \mu S/cm$ desde los pozos en la parte superior a los de la parte inferior. Todos los pozos presentan una conductividad que pertenece a agua que interaccionó con la roca, disolviendo iones mayores. La conductividad actual a diferencia de la conductividad específica,

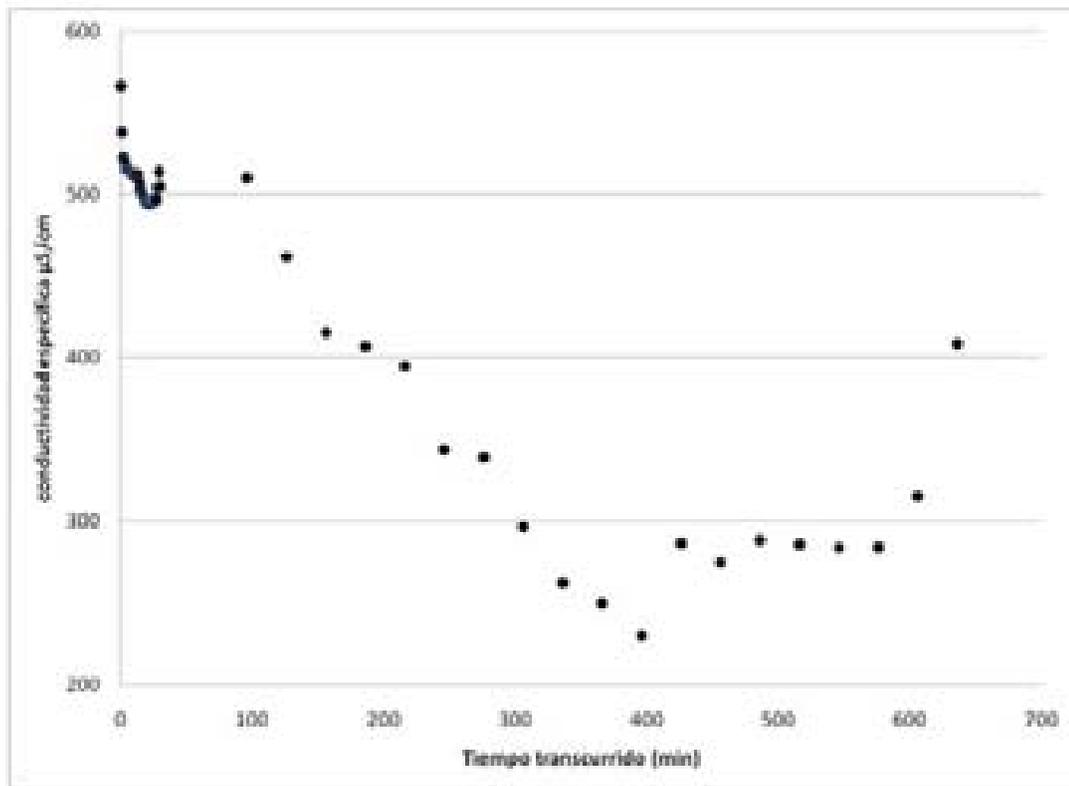


Figura 2.6: Comportamiento de la conductividad eléctrica en función al tiempo transcurrido de bombeo, para un pozo localizado en las inmediaciones del acuífero Valle de León. En colaboración con Luis Gonzalez H., IMTA,2009.

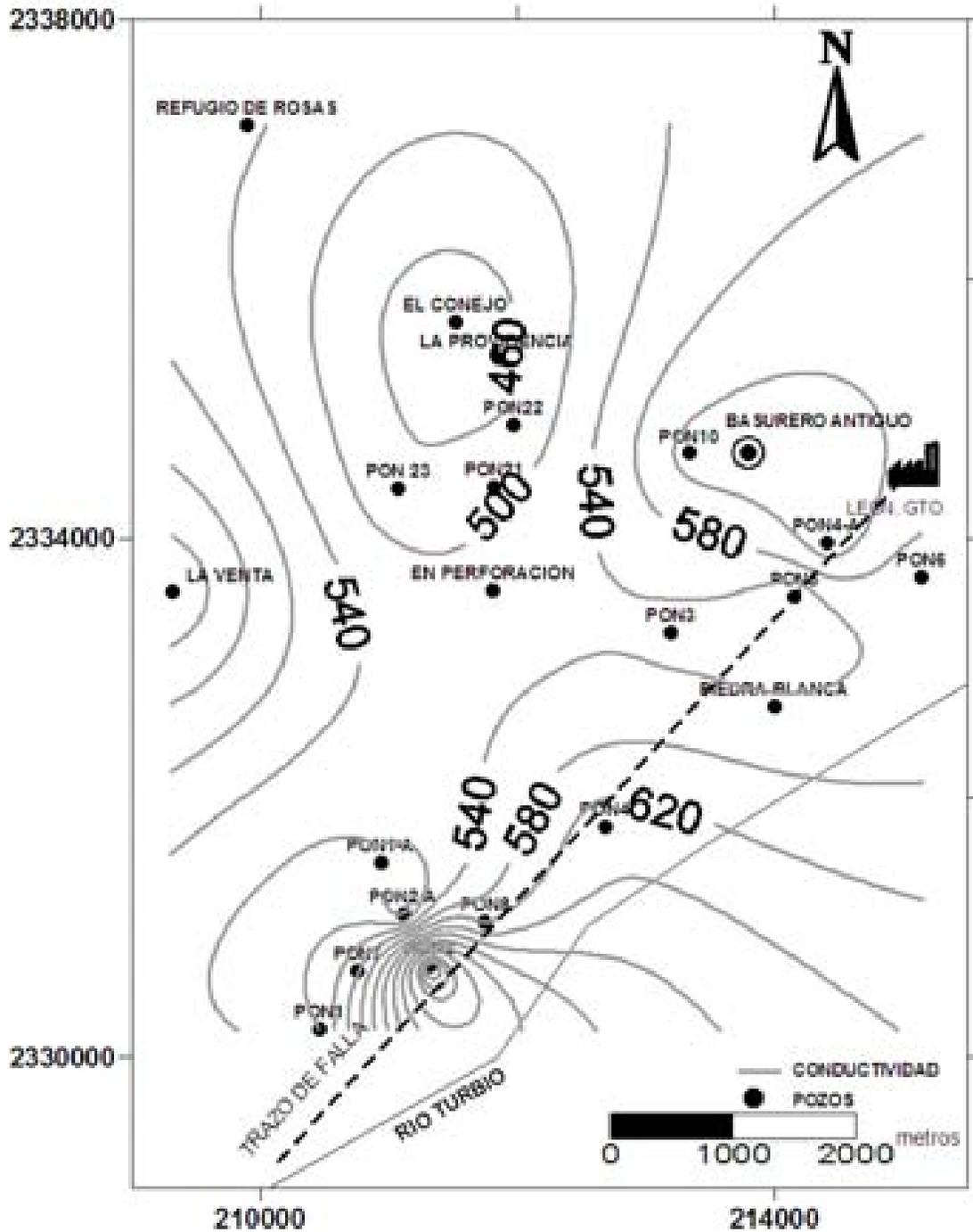


Figura 2.7: Extrapolación espacial de la conductividad eléctrica medida en los aprovechamientos, utilizando el método de Kriging. Se observa una acumulación espacial en los alrededores del pozo Poniente 2



depende de la variación en la temperatura, la cual pudieran estar aumentando los valores de la conductividad. Para nuestro caso existe un rango de variación de temperatura bajo que posiblemente no aumente sustancialmente nuestro valor registrado.

2.3.2. Temperatura

El calor puede ser transportado de un punto a otro en un medio poroso por tres procesos: conducción, convección y radiación. La ley de Fourier describe la conducción de calor desde regiones con temperatura alta a las de menor y es descrito por un sólido o líquido como:

$$H = -\kappa gradT$$

Donde H es el flujo de calor, joules, T es la temperatura, °C, κ es una constante de proporcionalidad relacionada con al conductividad térmica de la sustancia, joules $seg^{-1}m^{-1}^{\circ}C^{-1}$ y grad T es el gradiente de temperatura, °C/m, [Domenico, 1990]. El gradiente geotérmico en la corteza terrestre varía de un lugar a otro: se han medido gradientes de sólo 10°C por kilómetro, mientras que en algunas zonas se han observado variaciones de la temperatura de 200 y hasta 800°C/km. Sin embargo, la mayoría de las zonas del planeta en las que no se tienen anomalías térmicas se agrupan alrededor de 25 a 35°C/km, a este valor se le considera el gradiente geotérmico normal, [Prol, 1996].

La temperatura es un valor poco variable en el agua subterránea, se ha considerado que si el agua subterránea excede 5 °C de la media ambiental se considera termal. Para el caso de León, la temperatura media anual ambiental reportada por [CNA, 2002] es de 16.9°C. El experimento realizado en la prueba de bombeo donde se midió la conductividad, paralelamente se llevo a cabo la medición de la temperatura, figura 2.8. Se observa un decremento en los primeros minutos de 2 °C y posteriormente un aumento en las primeras 2 horas hasta alcanzar una estabilidad que se interrumpe en el mismo tiempo que la conductividad aumenta y empieza un decremento en la temperatura. Este efecto pudiera ser debido, como se menciono con anterioridad, a un aporte somero durante los primeros minutos que comienza a extraer agua mas profunda, por lo tanto mas caliente, y al final tiende a bajar la tem-



Tabla 2.4: Conductividad térmica de algunas rocas [Domenico, 1990]

Material	Conductividad térmica (cal/m seg °C)
Quarzo	2
Arenisca	0.9
Caliza	0.5
Dolomita	0.4-1
Arcilla	0.2-0.3
Agua	0.11
Aire	0.006

peratura hacia la ambiental lo cual pudiera estar presentando un fenomeno intermitente de recarga somera. Aunque los niveles hayan bajado 20 metros la temperatura esta esta de acuerdo con un gradiente normal, pues la profundidad del nivel estático se encuentra a 60m, aproximadamente.

El pozo Poniente 1 con una profundidad de 460 m tiene una temperatura de 30°C y un pozo que se encuentra actualmente en perforación, en la parte norte, reportan una temperatura de 42°C con una profundidad de 360m, lo cual implica un efecto térmico en la zona norte que modifica la temperatura del agua completamente diferente al efecto en el Valle. De acuerdo a la tabla 2.4, probablemente las rocas que componen al acuífero en la parte superior, Ticu, presenten una mayor capacidad para transmitir el calor que las sedimentarias que componen el Tgi debido a la presencia de cuarzo. La temperatura en la parte baja puede estar modificada por influencia de agua superficial, arcilla con baja conductividad térmica y diferencias importantes en la profundidad de extracción.

La profundidad total del pozo no garantiza una relación directa con las características medidas en el agua extraída debido al bombeo. Suponiendo que a mayor profundidad se pudiera estar induciendo una componente de agua subterránea más profunda, la cual se refleja en la estabilidad de este parámetro, en la figura 2.10 se muestra una relación lineal

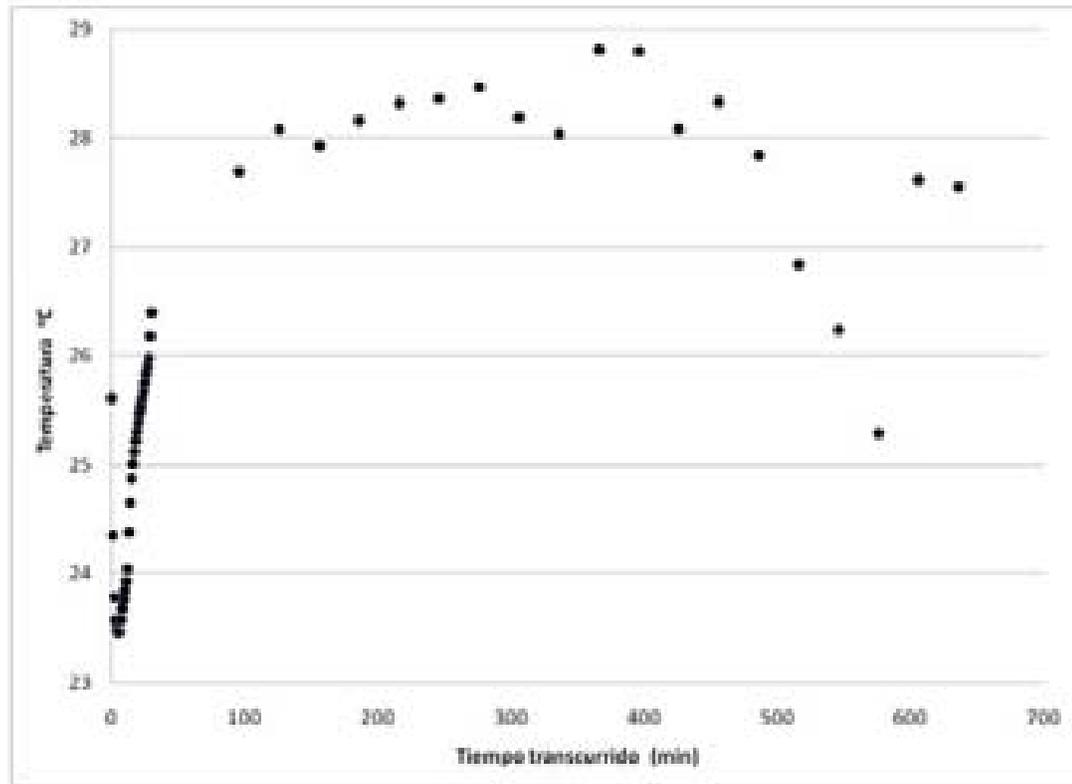


Figura 2.8: Comportamiento de la temperatura en función al tiempo transcurrido de bombeo, en un pozo en las inmediaciones del acuífero Valle de León. En colaboración con Luis Gonzalez H., IMTA, 2009.

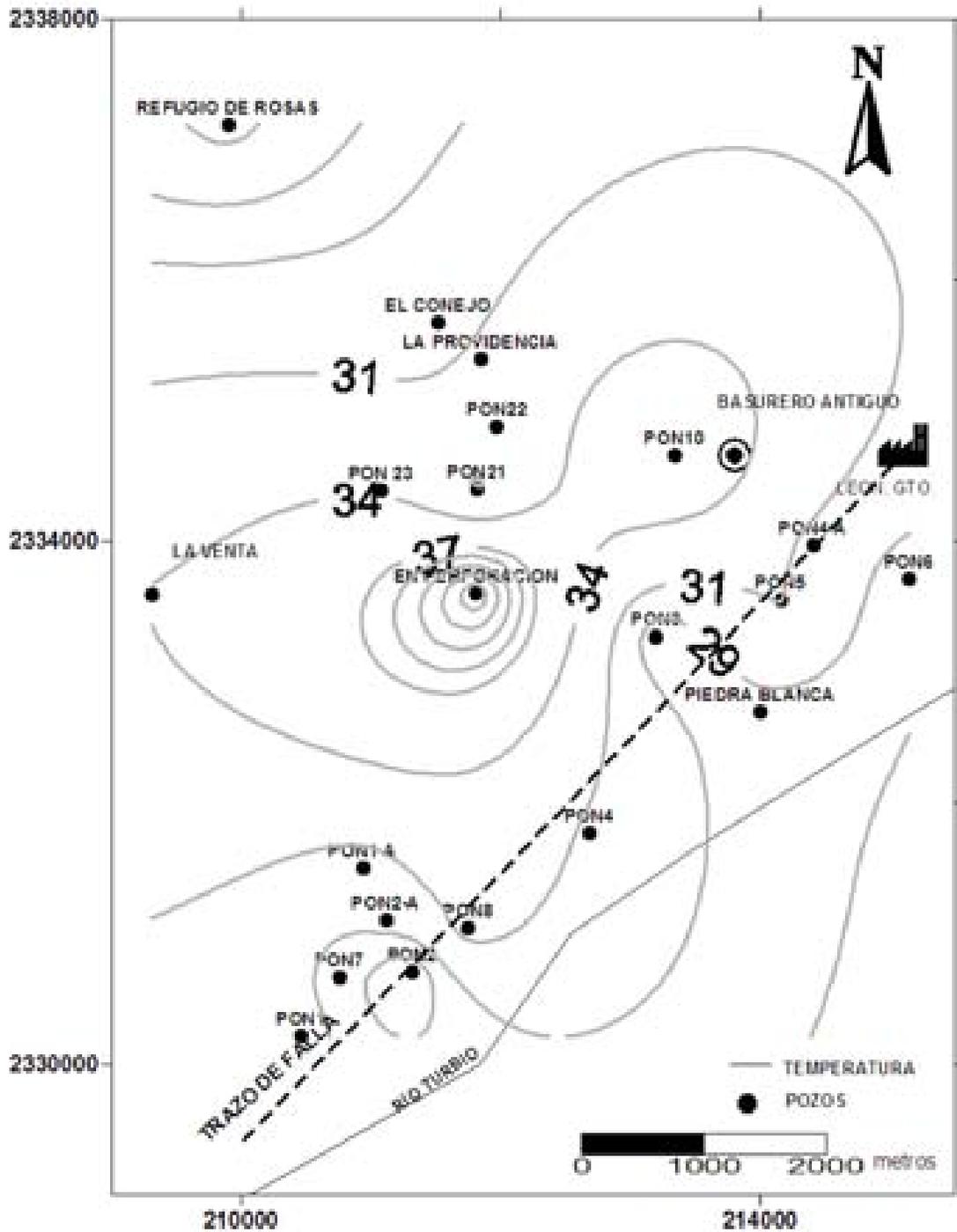


Figura 2.9: Extrapolación espacial de la temperatura medida en los aprovechamientos, utilizando el método de Kriging. Se observa una diferencia espacial de 10 °C que de acuerdo a un gradiente normal correspondería a 300 m de diferencia entre los localizados en la parte norte y sur.



entre la temperatura y la profundidad total del pozo, conformada por los aprovechamientos localizados en la zona norte, con un coeficiente de correlación de $R = 0.94$. Esto refleja que se esta extrayendo agua de un estrato sin variaciones importantes y que puede pertenecer a agua sin aparente característica de mezcla. Los pertenecientes a la batería poniente que no presentan una relación apreciable, probablemente se encuentren extrayendo agua de estratos con características térmicas diferentes o con una proporción de mezcla mayor, como se mencionó con anterioridad.

Si se extrapola la línea de tendencia en la gráfica 2.10 se observa un gradiente de $7.3\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$, prácticamente mayor al doble del valor común de $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, y una temperatura media anual de $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la parte norte. Este parámetro contiene información que induce a agrupar los pozos, de la zona norte incluido el Poniente 10 y los que se encuentran en la parte baja, deduciendo que se encuentran influenciados por condiciones hidrogeológicas diferentes. Aunque no se conocen las características de ingeniería de los pozos en el norte, se puede inferir según el análisis anterior que se trata de pozos extrayendo una componente de agua subterránea que ha interactuado poco tiempo con la roca y con características termales, dando origen a flujos verticales relativamente rápidos debidos las rocas fracturadas sobreyacientes.

Este parámetro no da un enfoque claro para proponer un patrón de funcionamiento entre la zona norte y sur, pero da pie a considerar posibles mezclas de diferentes componentes en la batería poniente.

2.3.3. Elementos Mayores

Los parámetros discutidos en las secciones anteriores, proporcionan poca claridad en el objetivo que se persigue. Por el momento sólo podemos decir que: a) Se da un flujo de agua subterránea natural de la zona alta a las partes bajas, b) Que la dinámica en los niveles de algunos pozos puede no estar directamente relacionada con la lluvia contemporánea, y c) Que existen pozos y norias que se encuentran con una influencia de agua superficial. Lo anterior obliga a que nos apoyemos de algunas herramientas hidrogeoquímicas que nos ayuden

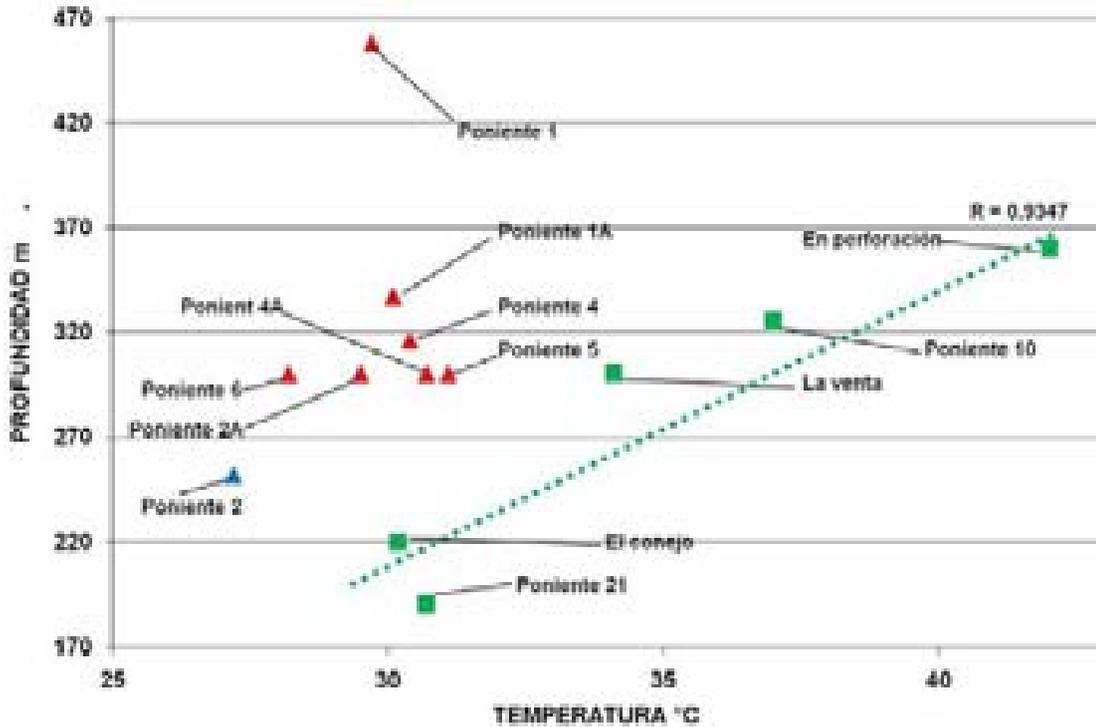


Figura 2.10: Correlación entre la profundidad total de pozo y la temperatura. Se asume una tendencia lineal en la parte superior topográfica que se debe a la presencia de la componente profunda, afectada por un gradiente geotérmico normal. Si se asume el modelo de funcionamiento planteado, el comportamiento térmico del resto se debe a la mezcla entre agua termal y agua superficial influenciada y no influenciada antropógenicamente en diferentes proporciones en cada pozo.



a diferenciar las componentes extremo del agua subterránea en extracción.

Debido a lo anteriormente expuesto, en esta sección se analiza la relación de los iones mayores contenidos en el agua subterránea extraída y las posibles componentes extremo que interaccionan en esta parte del acuífero.

Orígenes de Iones:

Para poder relacionar los iones mayores y algunos menores disueltos en el agua es necesario considerar sus posibles fuentes naturales y antropogénicas. En la tabla 2.5 se resumen algunos minerales que pudieran estar influenciando la muestra de agua subterránea.

Tabla 2.5: Fuentes naturales de iones en agua, tomado de [Singhal et al., 1999]

IONES MAYORES	Fuente
Calcio Ca^{2+}	Carbonatos, yeso
Magnesio Mg^{2+}	Olivino, piroxenos, anfíboles
Sodio Na^+	Arcilla, feldespatos, evaporitas
Potacio K^+	Feldespato, evaporitas
Bicarbonato HCO_3^-	CO_2 en el suelo y atmosférico, carbonatos
Cloruro Cl^-	Aerosol marino, oxidación de amonio o nitrógeno orgánico
Sulfato SO_4^{2-}	Yeso y anhidrita, agua de mar, aerosol marino, oxidación de pirita
Nitrato NO_3^-	Aerosol marino, oxidación de amonita o nitrógeno orgánico
Silice SiO_2	Hidrólisis de silicatos

Características de iones mayores

HCO_3^-

La alcalinidad (HCO_3^-) determina la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Se produce por iones carbonato y bicarbonato, y en menor proporción por ácidos débiles como el silícico, fosfórico, bórico y algunos orgánicos [Drever, 1997].

Ca^{2+}

El Ca^{2+} es el componente alcalino más abundante en agua natural y principal constituyente junto con el Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- y HCO_3^- , se presenta en altos contenidos y precipita posteriormente como calcita. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonatos (calcita, aragonita, dolomita, etc.) y/o sulfatos (yeso y anhidrita). Los



factores que controlan la solubilidad del calcio en la mayoría de los sistemas naturales son: equilibrio químico en donde se involucran especies carbonatadas, contenido de CO_2 , procesos de disolución-precipitación, pH e intercambio catiónico principalmente [Hem, 1985]. Los dos primeros están relacionados entre sí y limitan la concentración de Ca^{2+} a condiciones de equilibrio en función de PCO_2 , HCO_3^- y CO_3^{2-} . Los procesos de disolución generan un aumento en la concentración y los de precipitación un decremento. A valores de pH entre 6 y 9, la presencia de calcita se estabiliza por lo que el Ca^{2+} disminuye en solución. El intercambio iónico entre Ca^{2+} y otros cationes retenidos en la superficie de minerales con los que entra en contacto el agua; Na^+ principalmente, se potencia en terrenos arcillosos de baja permeabilidad [Drever, 1997].

Mg^{2+}

El Mg^{2+} es menos abundante que el Ca^{2+} y procede en su mayoría del agua marina, como producto de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas magnesianas), evaporíticas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos. La solubilidad de la magnesita ($MgCO_3$) es mayor que la de la calcita ($CaCO_3$), por lo que en condiciones normales no precipita directamente de la disolución, lo que produce cierto grado de sobresaturación respecto a los diferentes carbonatos magnésicos. Los procesos de intercambio iónico también modifican la concentración de Mg^{2+} en aguas (ej. intercambio Mg-Li), es por esto que el Mg^{2+} proporciona información acerca de la interacción agua-roca por involucrar directamente a la disolución de dolomías de la cuenca [Kharaka et al., 1992].

Na^+

El Na^+ es liberado por meteorización de silicatos (tipo albita), disolución de rocas sedimentarias de origen marino y disolución de depósitos evaporíticos en los que se presenta fundamentalmente como NaCl. Una fuente importante de Na^+ la constituye el aporte de agua marina en regiones costeras, tanto por intrusión marina, como por infiltración de agua de lluvia que se incorpora desde el mar. Las sales de sodio son altamente solubles y tienden a permanecer en solución y no precipitan (como las de Ca^{2+}), sin embargo el Na^+ puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de intercambio catiónico (especialmente con el



Ca^{2+}), lo que provoca una disminución en la dureza del agua [Hem, 1985].



El K^+ procede principalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas como silvita (KCl) o carnalita ($KClMgCl_2$) y como producto de la precipitación de sales de agua marina. Tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y procesos de adsorción en la superficie de minerales con capacidad de intercambio iónico. Algunas rocas evaporíticas incluyen sales de potasio K^+ [Hem, 1985].



El ión SO_4^{2-} proviene principalmente de la lixiviación de terrenos formados en ambiente marino, de la oxidación de sulfuros (distribuidos ampliamente en rocas ígneas y sedimentarias) y de la descomposición de sustancias orgánicas, sin embargo la disolución de sales sulfatadas (yeso y anhidrita fundamentalmente) representa el aporte cuantitativo más importante en el agua subterránea. El comportamiento del SO_4^{2-} puede desviarse significativamente del teórico (predicho en base a los principios de su disolución) por su tendencia a incorporarse a procesos biológicos y a formar complejos con Na^+ y Ca^{2+} [Kharaka et al., 1992]. Está sujeto a procesos de reducción especialmente en presencia de bacterias y materia orgánica. En agua dulce la concentración normal puede variar de 2 a 150 mg/l, [Hem, 1985].



Las evaporitas y rocas de origen marino aportan una importante cantidad de Cl^- y por la elevada solubilidad de sus sales éstos pasan rápidamente a la fase acuosa alcanzando altas concentraciones. El Cl^- forma sales de alta solubilidad, no se oxida ni se reduce, no es adsorbido significativamente, ni forma parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal. La halita (NaCl) es el mineral halógeno más común y generalmente precipita de salmueras de agua marina evaporada. Otros minerales evaporíticos que contienen halógenos son la silvita (KCl) y la carnalita ($KMgCl_3 \cdot H_2O$) [Worden, 1996].



Resultados de elementos mayores

Conjuntamente con el SAPAL, se llevó a cabo un muestreo a finales del mes de septiembre de 2006, donde se obtuvieron las muestras de aprovechamientos distribuidos en la zona de estudio, para su análisis de iones mayores y metales, las cuales fueron analizadas por la Universidad Autónoma de Guerrero, UAG. Los resultados de iones mayores se muestran en la tabla 2.6. Las fechas de muestreo corresponden también a la temporada de secas 2006 a excepción del dato para el pozo Poniente 2a, la cual fue tomada en la temporada de secas 2005.

Para que los análisis sean aceptables el porcentaje máximo de error permitido debe ser de 10 % [Drever, 1997], teóricamente esta relación debe ser cero para que sea un análisis preciso, pero tomando en cuenta que en cualquier medición existen errores tanto del instrumento como del analista y del personal que realiza el muestreo este número nunca es cero. En la tabla 2.6, se presenta el error obtenido para los análisis de las muestras de agua. El balance de electroneutralidad se encuentra por debajo del 10 % a excepción de la muestra Las Joyas y La Venta. Solo 10 muestras presentan un balance menor al 5 %, 2 mayor al 10 % y el 8 entre 5 y 10 %. Lo que proporciona confianza para la interpretación de estos resultados.

En una zona de recarga donde los flujos son relativamente rápidos se espera que las concentraciones de iones mayores sean bajas comparadas con su zona de descarga. Es posible que para nuestro caso sea aplicable este razonamiento. Para la zona sur donde se está aprovechando el relleno terciario compuesto por diferentes estratos granulares y compactación diferente, se puede esperar un aumento en la concentración de algún ion.



Tabla 2.6: Resultados de iones mayores y balance de electroneutralidad para la zona en estudio.

PROCEDENCIA	HCO_3^-	SO_4^{-2}	Cl^-	NO_3^-	Na^+	K^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	BALANCE %
1 PONIENTE	190.0	30.3	67.7	6.2	59.5	12.5	69.8	7.0	9.5
1-A PONIENTE	158.5	32.1	10.7	4.9	77.9	5.3	6.5	0.6	3.3
2 PONIENTE	184.0	51.0	157.7	11.5	57.8	12.9	112.1	12.5	4.2
2-A PONIENTE	170.0	28.0	13.1	7.1	70.7	6.8	22.6	1.2	7.4
3 PONIENTE	209.0	29.8	30.3	4.9	65.4	12.2	43.5	4.1	6.4
4 PONIENTE	209.0	59.7	38.3	4.0	112.2	6.5	22.8	2.2	4.5
4-A PONIENTE	223.5	58.9	16.7	3.5	117.5	6.8	10.0	0.6	3.7
5 PONIENTE	200.5	37.4	8.7	3.1	82.5	6.7	20.3	1.1	5.4
6 PONIENTE	249.5	16.6	12.5	4.9	44.3	11.8	59.1	7.8	8.9
7 PONIENTE	192.0	25.1	47.2	3.5	66.0	12.0	50.0	4.0	8.5
8 PONIENTE	202.5	44.9	14.2	4.4	103.0	6.5	11.0	0.6	5.2
10 PONIENTE	229.0	60.8	16.2	0.9	102.6	7.3	13.8	3.4	1.1
Piedra Blanca	715.0	222.0	1194	7.6	440.0	81.4	458.0	89.9	-1.3
La Providencia	293.0	31.3	5.8	4.0	57.0	6.0	49.7	5.5	1.0
Poniente 22	220.0	35.7	12.5	4.9	56.8	6.5	15.5	2.0	14.4
La Venta	196.0	64.0	14.4	4.9	108.2	6.9	10.8	0.8	-4.3
Poniente 21	177.0	27.0	9.9	5.3	69.3	5.3	20.5	2.0	-6.2
Poniente 23	156.0	27.0	8.1	5.8	64.0	5.1	13.5	1.9	-4.2
El conejo	159.0	26.0	8.9	4.3	68.3	5.6	13.2	1.6	-5.9
Refugio de Rosas	245.0	18.0	16.3	5.9	57.7	7.3	55.3	5.8	-9.0
Las Joyas	450.0	74.0	15.8	65.5	106.8	13.5	150.1	27.3	17.1
Agua de lluvia S.L.P. [Cardona, 2007]	8.7	7.0	0.6		1.10	0.93	3.6	0.8	



Un análisis visual de la figura 2.11 permite observar que La noria las Joyas, ubicada al nor-este sobre en material aluvial tiene una característica bicarbonatada-cálcica. Presenta la concentración en nitratos superior a la establecida por la [NOM-127-SSA1, 1994] y una mineralización que solo es superada por la noria Piedra Blanca la cual no aparece en este mapa por exceso de dimensiones. Al menos 7 pozos más presentan una característica donde el anión dominante es calcio y no el sodio. Este aumento en los minerales es debido a un aporte externo, no natural, que se hace presente en algunos pozos como el Refugio de Rosas y La Providencia, los cuales debieron haber sido muestreados sin dar tiempo a que se evacuara totalmente la columna superior de agua almacenada. Es por lo anterior que en estos pozos se puede ver reflejada la componente de agua meteórica evaporada y no evaporada. El bajo contenido iónico refleja la interacción del agua con la roca y un aporte real superficial a los pozos en la parte superior. Por otro lado, es evidente un aumento en el contenido de Cl^- en el pozo Poniente 2, 7 y 1, lo cual es indicador de fuentes antropogénicas puesto que las rocas que contienen a esta agua no presentan características cloruradas que pudieran estar aportando a estos pozos. De la misma manera no es posible hablar de un flujo regional que pudiera aportar esta cantidad de Cl^- . Algunos de los pozos pertenecientes a la batería poniente localizados en la parte baja, presentan las mismas características que los localizados en la parte superior a excepción del Poniente 6 y 3 los cuales modifican ligeramente la cantidad de iones.

Un análisis visual de la figura 2.11 permite observar que La noria las Joyas, ubicada al nor-este en material aluvial tiene una característica bicarbonatada-cálcica. Presenta la concentración en nitratos superior a la establecida por la [NOM-127-SSA1, 1994] y una mineralización que solo es superada por la noria Piedra Blanca la cual no aparece en este mapa por exceso de dimensiones. Al menos 7 pozos más presentan una característica donde el anión dominante es calcio y no el sodio. Este aumento en los minerales es debido a un aporte externo, no natural, que se hace presente en algunos pozos como el Refugio de Rosas y La Providencia, los cuales debieron haber sido muestreados sin dar tiempo a que se evacuara totalmente la columna superior de agua almacenada. Es por lo anterior que en estos pozos se puede ver reflejada la componente de agua meteórica evaporada y no evaporada. El bajo

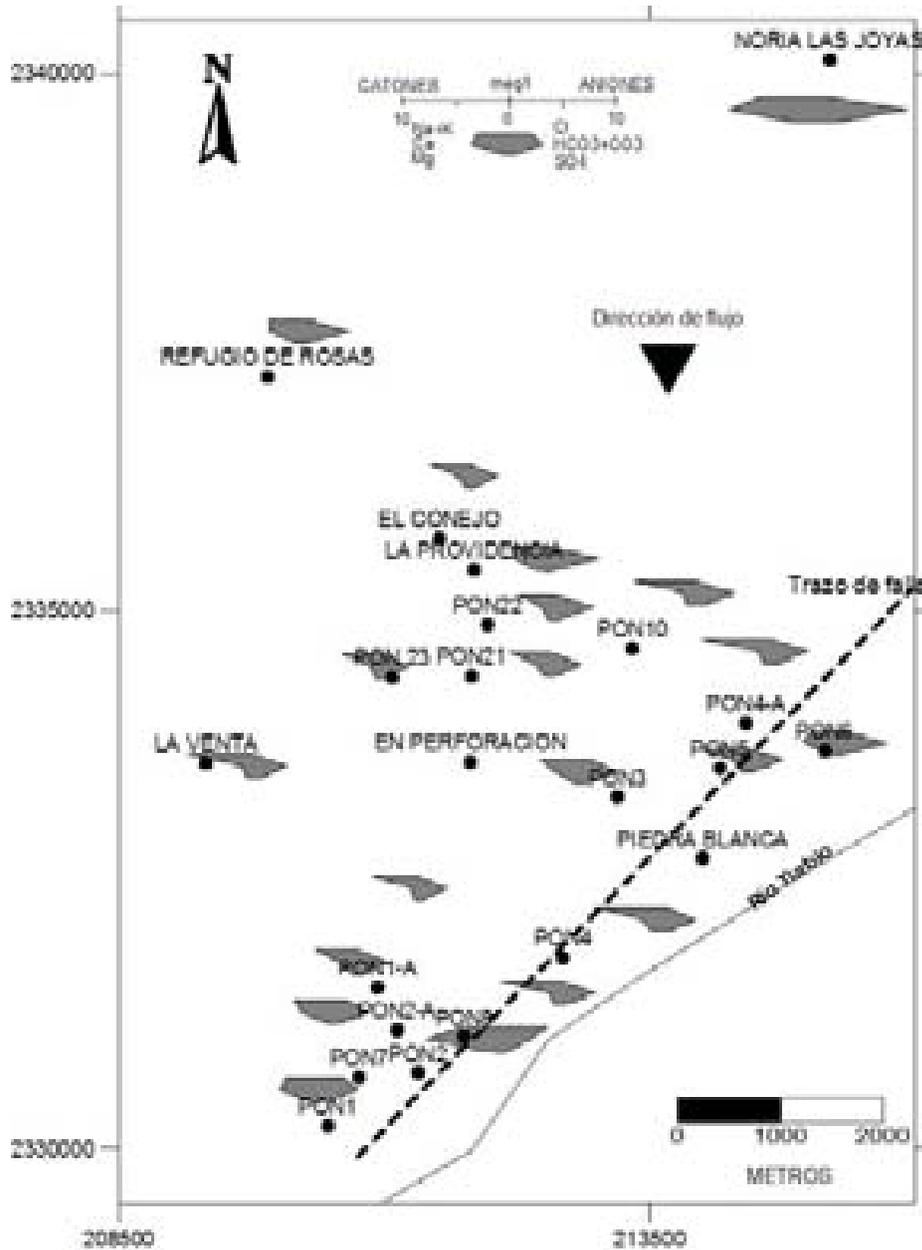


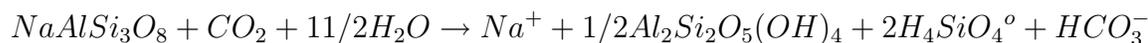
Figura 2.11: Diagramas de Stiff generados con las concentraciones, meq/l, de iones mayores de cada pozo muestreado, a excepción de la noria Piedra Blanca. Se observa que la mayoría se agrupan como Bicarbonatadas-sódicas-potásicas y las demás como Bicarbonatadas cálcicas-sódicas. Construidos con el apoyo de software desarrollado en el GHI, UNAM, visitar pagina <http://hidrologia.igeofcu.unam.mx/>.



contenido iónico refleja la interacción del agua con la roca y un aporte real superficial a los pozos en la parte superior. Por otro lado, es evidente un aumento en el contenido de Cl^- en el pozo Poniente 2, 7 y 1, lo cual es indicador de fuentes antropogénicas puesto que las rocas que contienen a esta agua no presentan características cloruradas que pudieran estar aportando a estos pozos. De la misma manera no es posible hablar de un flujo regional que pudiera aportar esta cantidad de Cl^- . Algunos pozos pertenecientes a la batería poniente localizados en la parte baja, presentan las mismas características que los localizados en la parte superior a excepción del Poniente 6 y 3, los cuales modifican ligeramente la cantidad de iones.

Los que presentan características sódicas se encuentran presentes tanto en la zona norte como en la sur. La figura 2.12, presenta otra forma de analizar las características químicas de los pozos, desde el punto de vista de iones mayores, (en teoría mayores a 10 mg/l).

Tres muestras localizadas en la parte norte, Las Joyas, Refugio de Rosas y La Providencia presentan características Bicarbonatas cálcicas, y 5 localizados en la parte sur, Poniente 2, 6, 3, 7 y 1, presentan características mixtas. Los 5 pozos anteriores, presentan un contenido de STD similar, menor a 500 mg/l. El pozo Poniente 2 y Piedra Blanca con características cloruradas, se encuentran en la parte baja y más cercanos a la presa San Germán y Río Turbio. Las características químicas del resto hacen suponer un grupo con interacción agua-roca que origina el contenido de sodio presente en feldespatos sódicos y potácicos en las rocas ignimbríticas, como lo ejemplifican las siguientes reacciones para un acuífero libre.



Es posible que en las rocas sedimentarias que componen el relleno, pudiera estar presente una cantidad importante de calcio, el cual pudiera aportar el contenido que se encuentra presente en esos pozos. Otra posibilidad es, que al agua subterránea se esta incorporando un contenido de sales proveniente de agua superficial. En la parte correspondiente al Valle podemos asociar el contenido en sodio y calcio a todo este material que rellenó la fosa donde

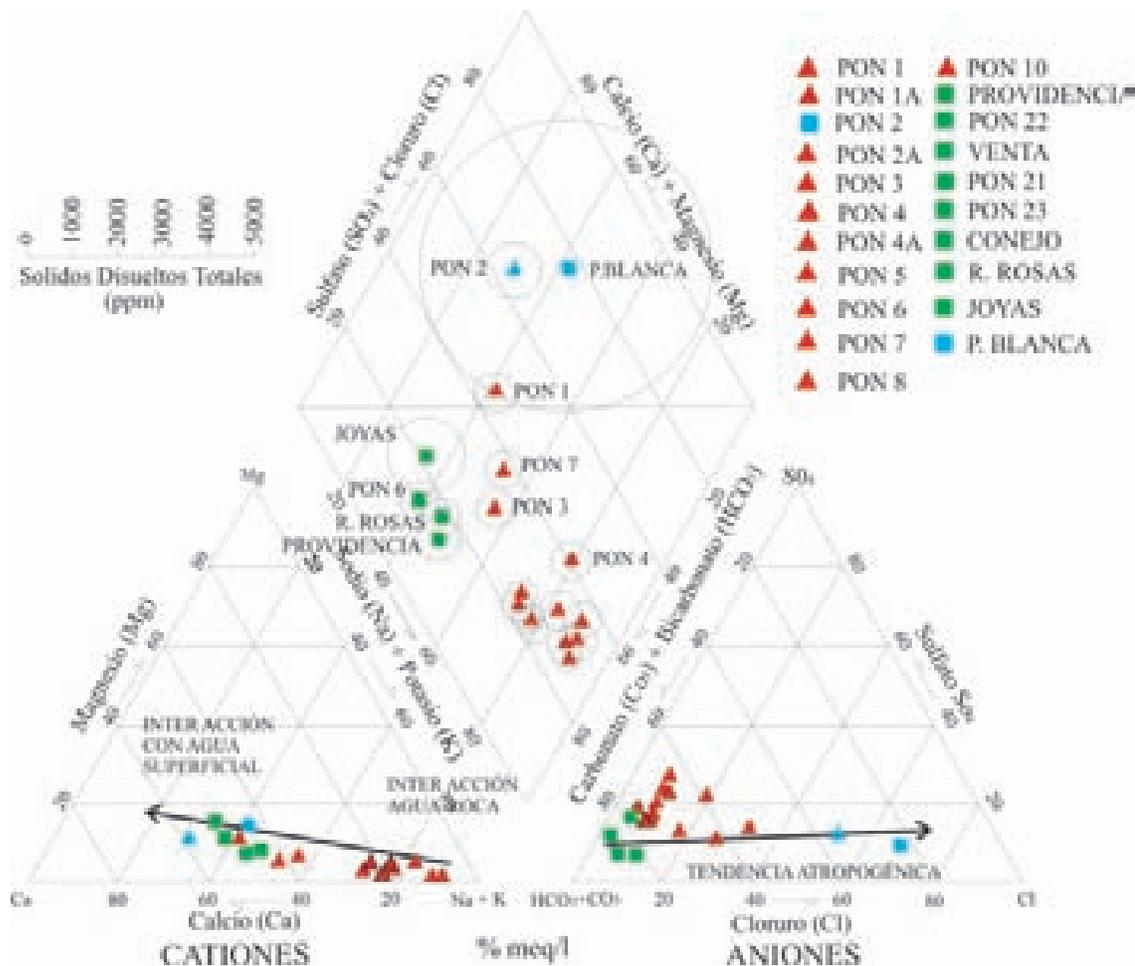


Figura 2.12: Diagrama de Piper. Se ve claramente el grupo de pozos con características iónicas donde dominan las Bicarbonatadas-sódicas, cálcicas y 2 muestras con una clara tendencia a cloruradas.

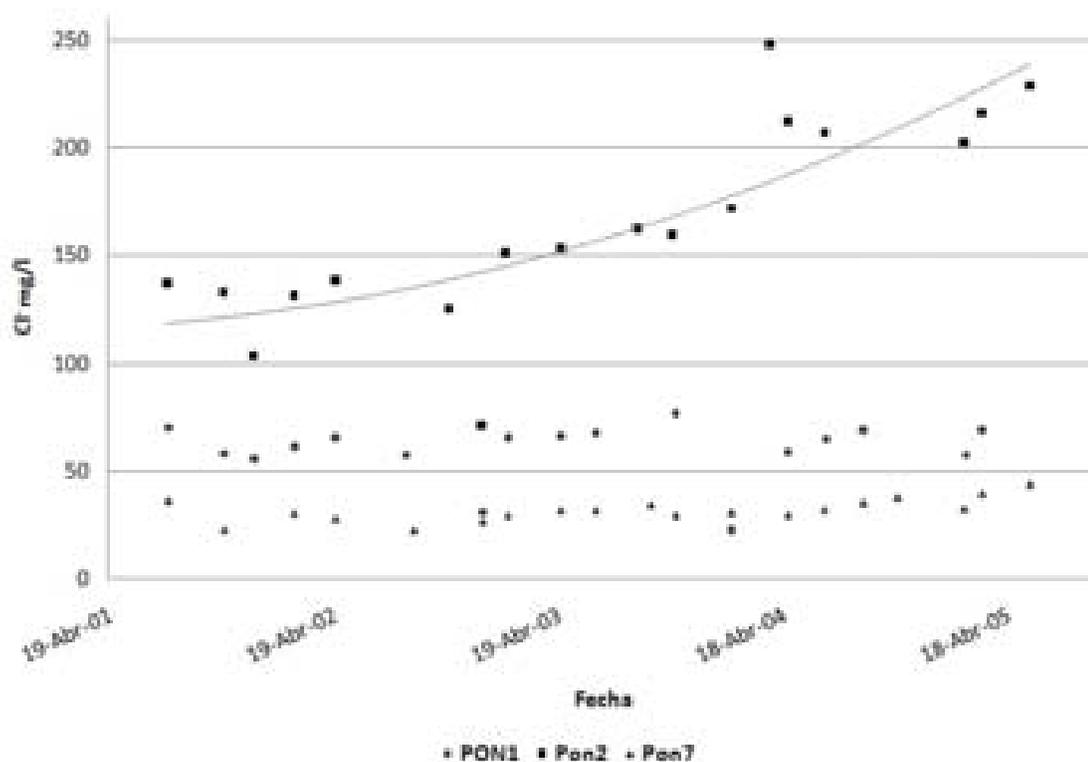


Figura 2.13: Tendencia temporal del Cl^- en tres pozos de la Batería Poniente, tomado de [SAPAL, 2007]. El pozo Poniente 2 evoluciona a razón de 20 mg/l año en cloruro proveniente de una fuente externa.

se reportan arcillas, gravas, arenas y material lacustre carbonatado. No se reportan yesos que pudieran estar afectando, ni se registra una cantidad importante de sulfatos en las muestras a excepción del pozo poniente dos y noria Piedra Blanca.

Lo anterior se puede corroborar con la gráfica 2.13, en la cual se muestra una relación temporal para Cl^- para tres pozos. La tendencia del Poniente 2 es positiva, aumenta a una tasa de 20 mg/l año. Los otros dos pozos Poniente 1 y 7, permanecen con una tendencia prácticamente constante. No se descarta que el pozo Poniente 1 es estable en el contenido de cloruro pero superior a 50 mg/l. La tendencia del cloruro en el pozo Poniente 2 y la gráfica 2.14 corrobora la idea de influencia antropogénica principalmente evidenciada por los Cl^- en los pozos Poniente 2, 1 y 7. Existen factores probablemente externos que hacen que exista un aumento en los Cl^- medidos en el pozo poniente 1, el cual tiene un tubo ciego profundo,

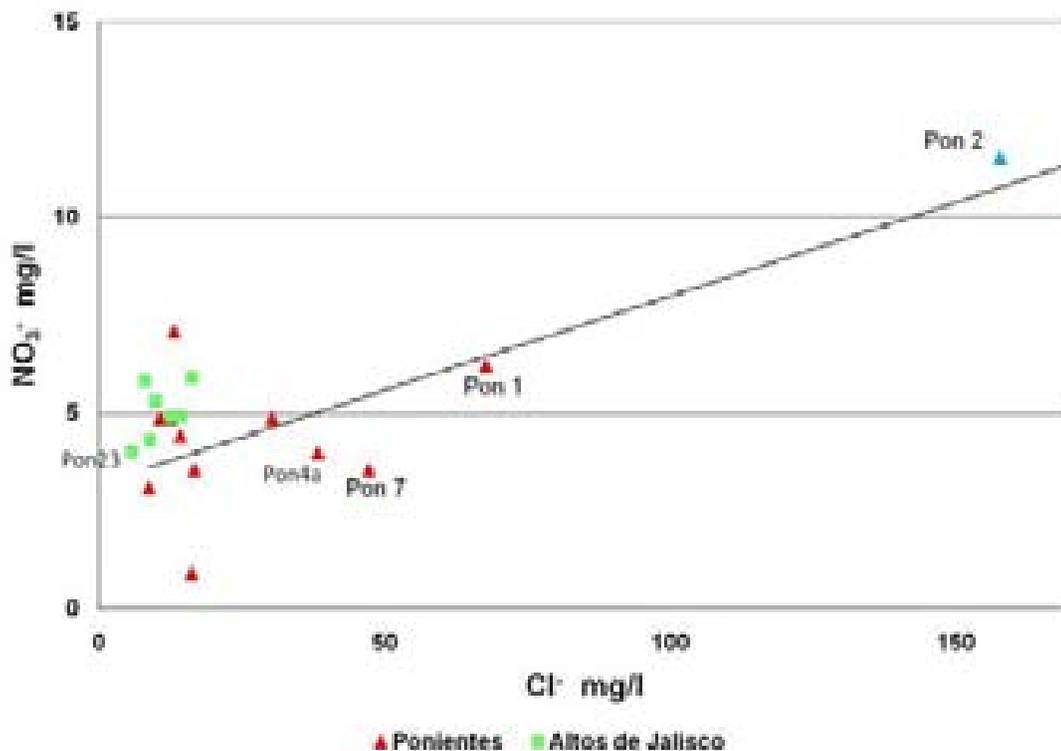


Figura 2.14: Gráfica que muestra la correlación entre el Cl^- y NO_3^- , principales indicadores de contaminación antropogénica en la zona.

165 m, sin embargo presenta una componente de cloruros importante 67.7 mg/l, al igual que el pozo poniente 2, quizá debido a un aporte externo proveniente de agua de riego.

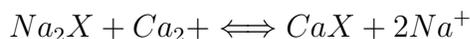
A partir de la tabla 2.6 se puede ver que la noria Las Joyas rebasa la [NOM-127-SSA1, 1994] para nitratos. En la gráfica 2.14 donde se muestra a los Cl^- en el eje horizontal y al NO_3^- en el vertical, principales indicadores de contaminación antropogénica. Muestra que existen pozos como Poniente 2, 1 y 7 que presentan valores de la concentración de Cl^- que van desde 2 hasta 8 veces mayor en las muestras, no así NO_3^- . Esta tendencia pone en evidencia el aporte de sales cloruradas provenientes de la zona urbana.

Tomando en cuenta el planteamiento de [Ophori et al. 1989], quienes demostraron que los sistemas de flujo local se pueden asociar a agua con bajos índices de STD y altos porcentajes



de Ca^{++} , Mg^{++} y HCO_3^- ; los sistemas de flujo intermedio con cantidades medianas de STD y altos porcentajes de Na^+ , SO_4^- y Cl^- ; y los sistemas de flujo regional con altos índices de STD y altos porcentajes de Na^+ y Cl^- , asociando este criterio al sistema, obtenemos que la mayoría de las muestras pudieran pertenecer a un flujo local. Por otro lado, no es posible asociar un flujo regional con las muestras Poniente 2 y Piedra Blanca por que es evidente existe una componente antropogénica importante.

Retomando la discusión relacionada con la evolución en el diagrama de Piper, resulta importante observar que si suponemos un flujo norte-sur, exceptuando a los 3 pozos cálcicos, la suma de sodio-potasio disminuye del 80 % al 45 % e inversamente para el calcio-magnesio. Por lo que, si algunas líneas de flujo se pueden conceptualizar cruzando los pozos localizados en el mismo sentido, el agua se encuentra en equilibrio químico y además si existe una baja proporción de componente vertical que círculo a través del suelo, es posible que entre el grupo 1 y 2 se este llevando a cabo un intercambio catiónico de endurecimiento en las dos direcciones, horizontal y vertical, es decir, se absorbe sodio Na^+ y se libera calcio Ca^+ , desde los pozos en la parte norte hacia los localizados en la parte baja. Los recorridos son cortos y no existe aumento significativo en Sólidos Totales Disueltos, lo cual pudiera apoyar la idea de acuerdo a la reacción:



La tabla 2.7 muestra la capacidad de intercambio de las especies arcillosas más comunes, justifica la existencia de un intercambio catiónico, Ca/Na, en la parte baja del acuífero, emplazado en un relleno indiferenciado con contenidos arcillosos en diferentes proporciones y distribuidos de forma irregular, [IV Curso Hispanoamericano, 2007]. Es probable que en algunos sectores este aumento se encuentre fuertemente influenciado por el aporte superficial. Como se puede apreciar en el Diagrama de Stiff, este aumento se da en pozos cercanos al pozo Poniente 2 y a la presa el Mastranzo, así como en los pozos Poniente 6 y 3 los cuales tienen características de mezcla en el diagrama de Piper, figura 2.12.

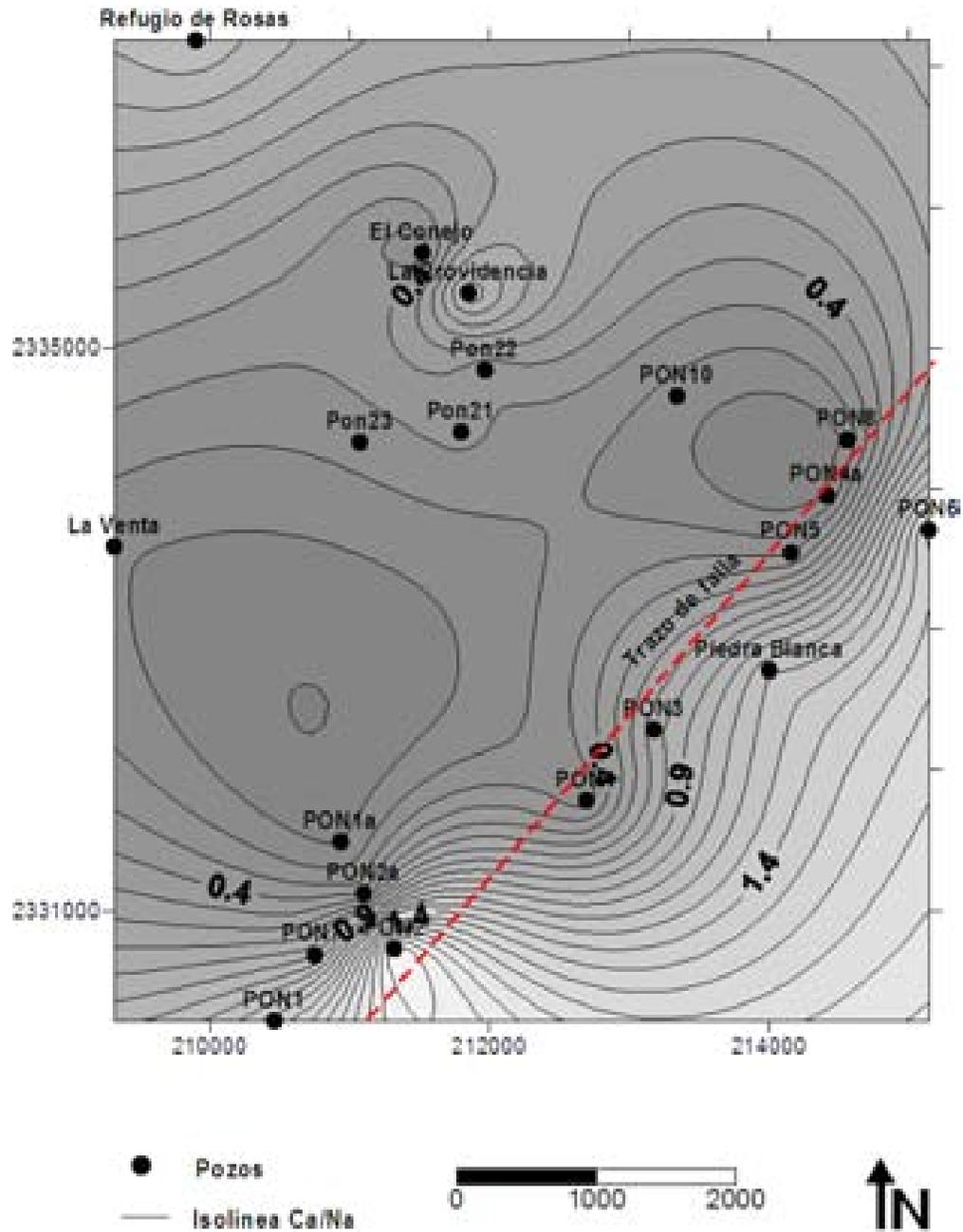


Figura 2.15: Extrapolación espacial con el método de kriging del cociente Ca/Na, relacionado con el intercambio catiónico que pudiera presentarse en el Tgi, tomando en cuenta que también puede deberse al aporte vertical proveniente de agua superficial, lo que cambia su firma química.



Tabla 2.7: Capacidad de intercambio iónico para las principales especies arcillosas

Especie	Capacidad de intercambio (meq/100g)
Vermiculita	100-150
Montmorillonita	80-150
Bentonita	100
Illita	10 - 40
Caolinita	315

2.4. Mezcla a Partir de Elementos Conservativos

El modelo de mezcla sea ha venido dilucidándose conforme hemos venido analizando cada parámetro a lo largo de este trabajo. Este modelo comienza con el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico y se empalma con los parámetros encontrados en el agua subterránea. Esto no quiere decir que se este modelando el comportamiento progresivo sobre una línea de flujo probable, puesto que se esta tratando con dos elementos conservativos, lo cual es el centro de atención de este trabajo.

2.4.1. Isótopos Estables

Características de los isótopos estables ^{18}O y 2H

Los isótopos son átomos de un mismo elemento con igual número de electrones y protones, pero diferente número de neutrones, esto significa que tienen diferente masa atómica. Para elementos de número atómico menor la diferencia de masa entre sus isótopos es lo suficientemente grande para que algunos procesos químicos, físicos o biológicos fraccionen o cambien sus proporciones relativas. Como consecuencia del fraccionamiento, el agua y sus solutos presentan una composición isotópica intrínseca que indican las fuentes y procesos que la han transformado. En el equilibrio isotópico, la velocidad de reacción en ambos sentidos de algún isótopo en particular es la misma, esto no significa que la composición isotópica de dos



componentes en equilibrio sean idénticas, sino que las relaciones existentes entre dos isótopos diferentes en cada componente no cambian a cierta temperatura. Durante las reacciones de equilibrio, el isótopo más pesado se acumula preferentemente en la especie o con el estado de oxidación más alto. Las abundancias del Oxígeno-18 y Deuterio son expresadas como relaciones de abundancias relativas, y son expresadas en unidades deltas (δ), comparadas con el SMOW (Standar Mean Ocean Water), la cual es un agua de referencia que tiene una composición isotópica hipotética cercana a la del agua oceánica promedio. Por convención, el valor del Viena SMOW es cero por mil.

Los principales cambios de fase en sistemas hidrológicos se asocian con agua que ha sido condensada, evaporada o derretida durante el equilibrio, el fraccionamiento isotópico entre dos fases coexistentes está en función de la temperatura. Cuando ocurre un cambio de fase, los valores de los reactivos y productos cambian directamente en forma proporcional, ej. cuando el agua se evapora, los valores de $\delta^{18}O$ y δ^2H del agua residual disminuyen. Los cambios pueden ser descritos usando la ecuación de Rayleigh, la cual aplica a un sistema abierto en el cual ha sido removido continuamente material bajo condiciones constantes [Kendall et al.,2004].

El ^{18}O es un trazador ideal en estudios de procesos hidrológicos como transporte y mezcla de agua, ya que provee una firma conservativa e intrínseca en las moléculas que la contienen. En conjunto con el δ^2H proveen información acerca de la altitud, latitud, recarga de agua y efectos históricos con base en procesos físicos como evaporación, condensación, evapotranspiración y mezcla. La mayoría de los minerales contienen O, OH^+ y/o H_2O en su estructura al igual que la materia orgánica, por lo que el intercambio de O e H entre estos materiales durante la interacción con agua, puede influir en la composición isotópica. Durante la interacción agua-carbonatos ocurre un intercambio de O, por lo que el carbonato tiende a captar las moléculas más pesadas (^{18}O) mientras que el agua conserva a las más ligeras (^{16}O), dependiendo principalmente de la temperatura y de las características del agua y la roca. [Hanor, 1987].



2.4.2. Composición Isotópica de Agua Meteórica

Si se utilizan los isótopos ^{18}O y 2H para trazar la recarga de agua subterránea, entonces es necesario que su concentración en la precipitación provea una característica de entrada que varia en tiempo y regionalmente. Los procesos en las nubes que originan la lluvia son controlados por cambios en la temperatura, un parámetro con variabilidad espacial y temporal. La temperatura es la que controla el fraccionamiento de isótopos en la precipitación, y proporciona la variable de la función de entrada para utilizar el agua misma como trazador. Es esencial la caracterización de la distribución de isótopos estables en agua meteórica para determinar esta función de entrada. Esto incluye trayectorias de masas de vapor sobre los continentes, topografía, movimiento a diferentes latitudes y efectos estacionales. Cada uno tiene un efecto característico sobre la composición isotópica de la precipitación [Clark, et al.1997].

Tabla 2.8: Resultados isotópicos obtenidos en las estaciones recolectoras de lluvia para la temporada 2005. El promedio de esta pareja isotópica es (-9.4, -65).

Estación	$\delta^{18}O$	δ^2H
Gasolinera Lagunillas	-10.3	-70
Turbio 15	-8.8	-60
Muralla 24	-8.7	-57
Adalberto Dumbo López	-9.1	-60
SAPAL Hidalgo	-8.7	-61
Ciudad 34	-9.4	-65
Poniente 1	-9.8	-70
Cubilete, 2004	-10.6	-74

Por lo anterior el GHI, ha colocado estaciones recolectoras de agua de lluvia durante varios años en León y sus alrededores. Para este estudio, fueron colocadas 10 estaciones en el área correspondiente al acuífero VL, de las cuales se rescataron únicamente 7. Cada estación colecta agua de la temporada de lluvias del 2005, con la finalidad de tomar una muestra



ponderada que fuera representativa de la zona. Los valores obtenidos proporcionan un valor promedio de (-9.4, -65) los cuales se reportan en la tabla 2.8. Para el muestreo isotópico en pozos y estaciones recolectoras, se utilizaron botellas de polietileno de alta densidad de 60ml, se llenaron completamente y sellaron para evitar evaporación, principal modificador de la composición isotópica por fraccionamiento. La composición isotópica de ^{18}O y 2H fue determinada en el Laboratorio de Espectrometría de Isótopos Estables del Instituto de Geología de la UNAM, por medio de un Espectrómetro de masas Finnigan Delta Plus XL.



Una gran variedad de procesos hidrogeológicos alteran las proporciones relativas de los isótopos de oxígeno e hidrógeno en el ciclo hidrológico, la manera de comparar estas alteraciones consiste en graficarlas con respecto a una línea base Mundial o Local generada con datos de precipitación.

Tabla 2.9: Resultados isotópicos de muestras obtenidas en pozos localizados en ambos lados al trazo de la falla León y resultados de manantiales muestreados en la temporada de secas 2008

Aprovechamiento	$\delta^{18}O$	δ^2H
Poniente 23	-10.2	-70
Poniente 22	-10.7	-75
La providencia	-9.5	-63
Poniente 21	-10.6	-74
La Venta	-9.8	-70
Refugio de Rosas	-8.0	-62
El Conejo	-9.0	-65
Piedra Blanca	-7.7	-60
Poniente 8	-10.3	-77
Poniente 4A	-10.6	-78
Poniente 1	-10.5	-78
Poniente 2	-9.8	-73
Poniente 7	-10.1	-76
Poniente 6	-10.3	-76
Manantial Ojo de Agua	-10.6	-79
Manantial Manzanillas	-10.9	-78
Manantial Tutitlán	-10.9	-80

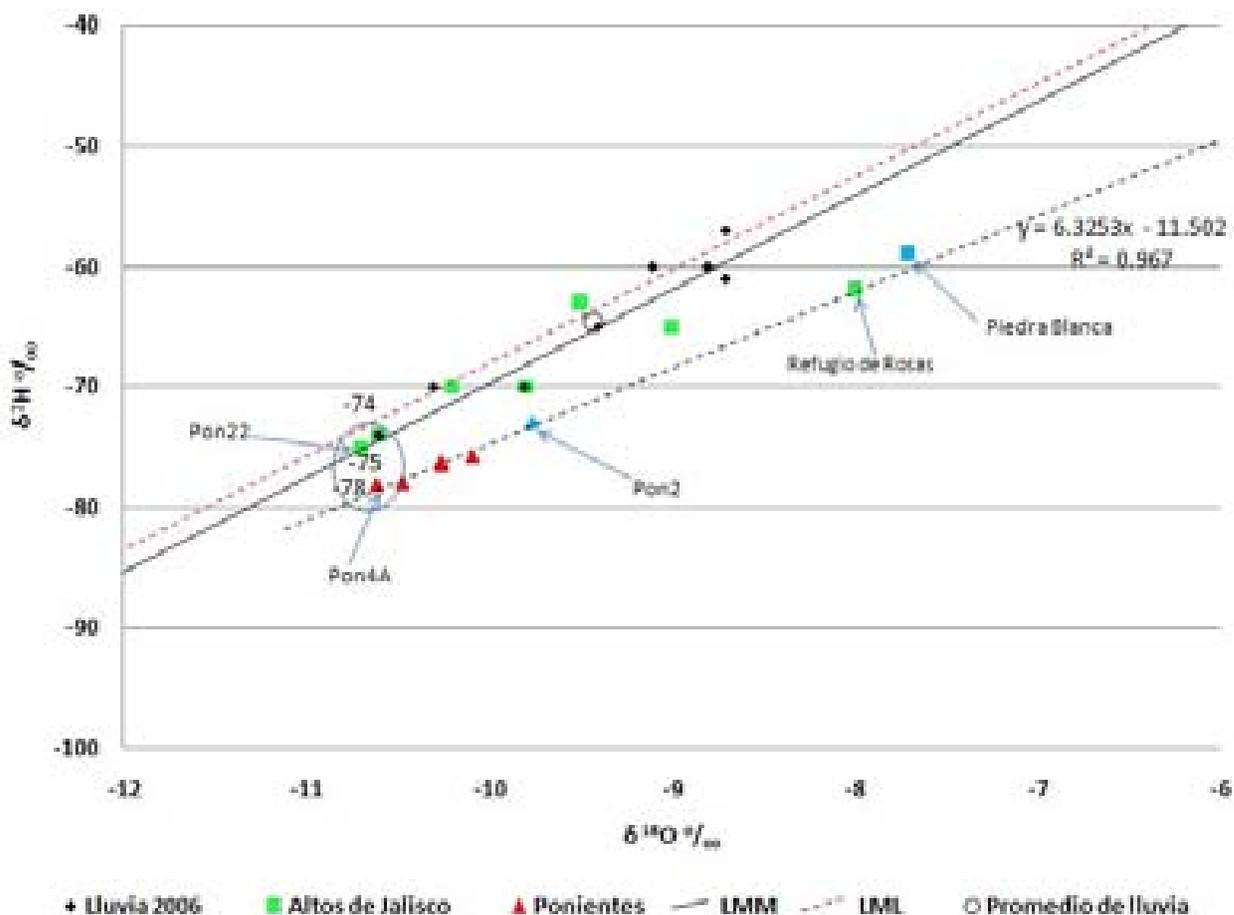


Figura 2.16: Correlación $\delta^{18}O$ y δ^2H descrita por las muestras tomadas en ambos lados del trazo de la falla León, [Craig, 1961], [Cortés et al., 1997]. La pendiente que forma la línea de evaporación corresponde a lo que [Gonfiantini, 1986], encuentra para humedades relativas, h , entre 75 y 95 %

En la figura 2.16 se puede ver: En rombos, los resultados de las muestras de agua de lluvia alineados a la línea meteórica local [Cortés et al., 2001] y mundial [Craig, 1961]. En cuadros, se encuentran los tomados en la parte topográficamente superior, los cuales se encuentran en la misma región de la línea meteórica conformando un grupo de agua contemporánea. En triángulos, se puede observar otro grupo de agua, el cual corresponde a algunos pozos de la batería poniente. Los pozos en triángulos rojos sobre la línea de evaporación corresponden a los que presentan características mixtas en el diagrama de Piper, así como el pozo Poniente 2.

A partir de la gráfica 2.16 se desprende que si se considera un 0.2 y 2 ‰ de grado de



confiabilidad del laboratorio para $\delta^{18}O$ y δ^2H , los valores para los pozos Poniente 4a, 22 y 21 se traslapan, por lo que se asume que presentan una misma firma isotópica con características de agua contemporánea. Es verdad que el promedio de lluvia para esta temporada fué (-9.4, -65) pero como se discutió con anterioridad es necesaria una mayor cantidad de datos para poder confirmar nuestro valor de entrada a través de la lluvia contemporánea. La zona de mayor altitud es la Sierra de Guanajuato, 2500 msnm, y Altos de Jalisco, 2100 msnm, aproximadamente. Considerar agua recargada a estas altitudes sin tener bien caracterizada la función de entrada o efecto de altitud, podría generar incongruencia para la interpretación. Si aún así se considerara la posibilidad de que ocurra una recarga importante desde estas alturas, implicaría recargas rápidas desde las partes altas como las reflejadas isotópicamente en pozos como el Oriente 1, localizado al pie de la Sierra de Guanajuato [SAPAL, 2007], y pozos ubicados en el sistema vecino Silao-Romita [Mahlknecht et al., 2004]. [Horst et al., 2007], caracterizaron agua menor a 300 años de tiempo de residencia sin encontrar agua más antigua en el acuífero vecino Silao-Romita, lo que para la cuenca de la independencia localizada en el otro flanco de la Sierra de Guanajuato [Mahlknecht et al., 2006] encuentra agua mayor a 10,000 años de tiempo de residencia.

Por otra parte, [Carrillo et al., 1996] muestra la mezcla entre agua somera, 14°C y agua profunda, termal 42°C max. La gráfica 2.17 pretende mostrar la misma relación solo que como ya se analizó en secciones pasadas el agua con mayor temperatura se encuentra en la parte norte, 30 °C mínima y 42 °C máxima. La tendencia indica que las muestras se están mezclando con agua termal y agua superficial, lo cual provoca un descenso de temperatura y da origen a su firma isotópica, química y física. En esta misma gráfica también se pueden diferenciar dos líneas de evaporación, correspondientes a la parte superior y a la inferior topográficas. La primera línea muestra que es probable se este mezclando agua meteórica y agua superficial, evidenciada por los pozos alineados a las líneas meteóricas y finalizando en el pozo Refugio de Rosas. La segunda línea de evaporación se da por interacción entre agua superficial de mala calidad y agua de origen meteórico, evidenciadas por La noria Piedra Blanca y por los pozos Poniente 4a y Poniente 8.

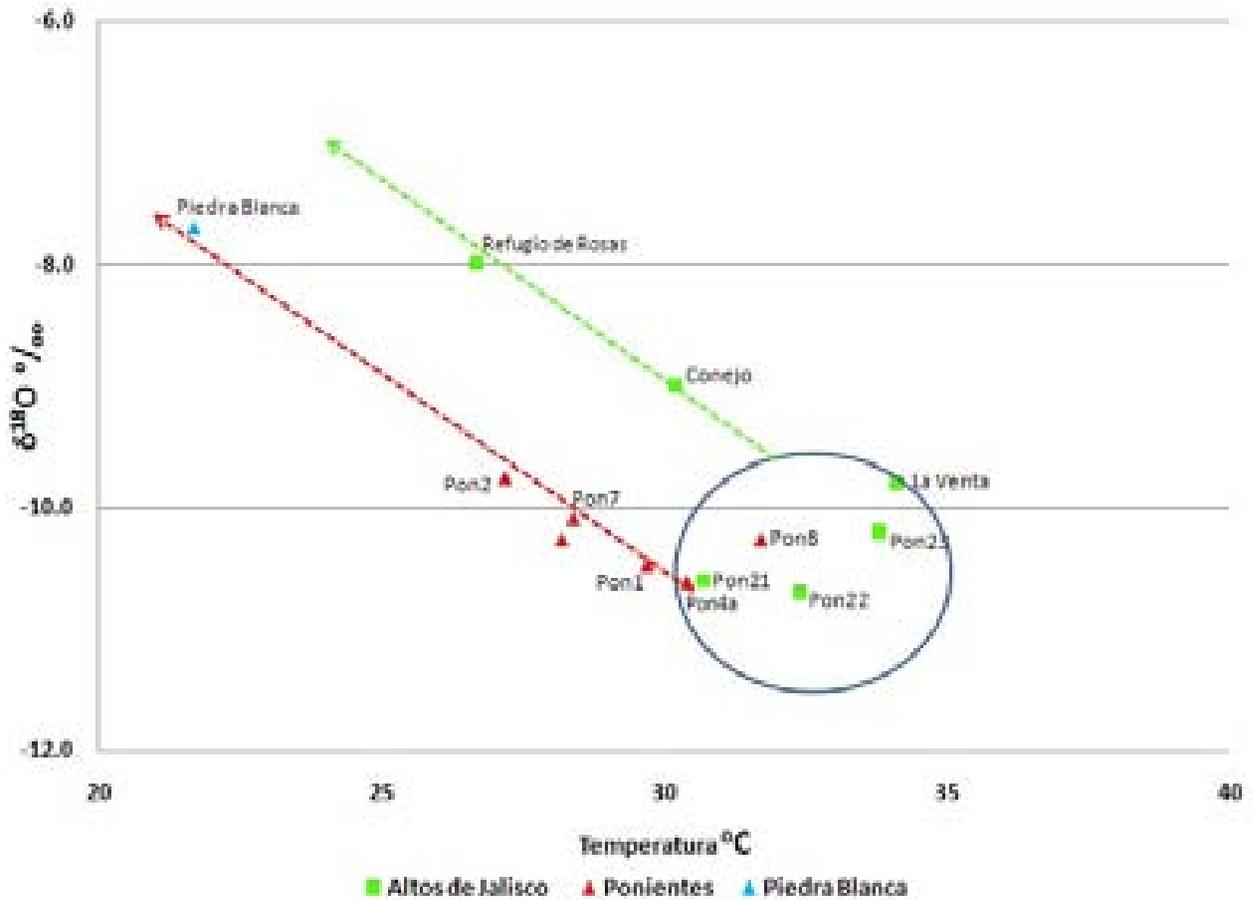


Figura 2.17: Correlación entre temperatura, T, y $\delta^{18}O$. Dentro del círculo se presenta la componente profunda común de la zonas, norte y sur, la cual presenta una firma isotópica similar al agua meteórica contemporánea que da origen a las líneas de mezcla diferentes para los dos lugares y con tendencia a agua superficial presente en cada lugar



La intersección de la línea de evaporación con la meteórica local y mundial indican que el agua profunda obtenida a través de los pozos Poniente 21, 22, 23, 4a y 8 posee características de agua contemporánea la cual se pone en evidencia con los valores $\delta^{18}O$ y δ^2H encontrados por el GHI, 2008, para el manantial Ojo de Agua el cual se considera representativo de la zona de estudio (-10.6, -79) con temperatura de 23.7 °C y Cl^- de 7.8 mg/l.

Como se menciono anteriormente, la complejidad del sistema requiere de la aplicación y comparación de varias técnicas para un mejor entendimiento de los fenómenos que lo rigen. En esta sección se propone un modelo de mezcla utilizando elementos conservativos considerando tres componentes extremo. Se aplica la metodología de cálculo desarrollada en el software MIX, con el cual, se obtendrá una estimación del porcentaje de cada componente presente en algunos de los pozos bajo un escenario y se compara con un cálculo donde se consideran dos fuentes evaporadas con la misma composición isotópica, lo que se reduce a un cálculo de dos componentes extremo.

Metodologías de Cálculo

Cuando dos corrientes de agua con descargas (Q_1 , Q_2) y valores de ^{18}O ($^{18}O_1$, $^{18}O_2$) conocidos, se fusionan y mezclan, el valor de $\delta^{18}O$ del flujo combinado (Q_c) es:

$$Q_c = Q_1 + Q_2 \quad (2.1)$$

$$\delta^{18}O_c Q_c = \delta^{18}O_1 Q_1 + \delta^{18}O_2 Q_2 \quad (2.2)$$

Cualquier proporción de dos aguas con valores conocidos de $\delta^{18}O$ y δ^2H caerá a lo largo de una línea entre las dos composiciones de los miembros finales en un diagrama de $\delta^{18}O$ vs δ^2H , [Kendall et al.,2004].

Regularmente los miembros extremos no son plenamente identificados y la concentración en algunos iones varía en tiempo y espacio. El modelo MIX, presenta un método de máxima probabilidad para estimar relaciones de mezcla, considerando que existe incertidumbre en las componentes extremo de mezcla. Maximiza la probabilidad de medición de concentración con respecto a la relación de mezcla y concentración de miembros extremos. Consiste en un algoritmo para resolver este problema. Los resultados permiten concluir que el método supera los



enfoques tradicionales. El método, proporciona estimaciones mejoradas de la concentración de miembros, de ésta manera amplifica el cálculo de mezcla. El método requiere definir la fiabilidad de las mediciones, pero el resultado es bastante robusto con respecto a la desviación estándar asumida. Una característica del método es que, permite mejorar la calidad del cálculo incrementando el número de muestras y/o especies analizadas. El algoritmo consiste de 4 pasos, 1) Inicialización, consiste en la definición de proporciones de mezcla inicial por el método de mínimos cuadrados convencional, asumiendo que la concentración de miembros extremos es conocida. 2) Dar la proporción de mezcla, maximiza la función de probabilidad para estimar los valores esperados de mezcla y concentración de miembros extremos. 3) Dar el valor esperado de mezcla y concentración de miembros finales, maximiza la probabilidad para obtener la proporción de mezcla. Finalmente se repiten los pasos 2 y 3 hasta converger, [Carrera et al., 2004].

Para el caso del Cl^- y $\delta^{18}O$, la gráfica 2.18 muestra la relación que existe entre el log Cl^- y $\delta^{18}O$. En esta se identifican dos líneas de evaporación. La primera pertenece a pozos localizados en la parte norte donde se consideran dos componentes extremo, agua meteórica contemporánea evaporada y no evaporada. En la segunda línea de evaporación se identifica la misma componente meteórica no evaporada subterránea presente en la parte superior, a través del pozo Poniente 4a, evolucionando hacia las características de la noria Piedra Blanca.

Se aprecia una variación con respecto al promedio en la lluvia de 2 ‰ para $\delta^{18}O$ y 13 ‰ para δ^2H . El agua de lluvia y la almacenada en el acuífero, isotópicamente pueden ser las mismas solo que en cloruro presentan una diferencia de 10 mg/l, lo cual las hace completamente diferentes. Debido a éste rango de variación y considerando que el agua meteórica da origen a la subterránea, se proponen 2 escenarios de cálculo de porcentajes de mezcla de estas componentes considerando como primer componente al agua meteórica contemporánea, agua subterránea profunda perteneciente al flujo lateral y la tercera la evaporada. La evaporada se divide en dos componentes como se menciono con anterioridad. Esto proporcionará una visión más detallada del cambio en porcentajes, generada por la variación del valor de la componente meteórica. En los siguientes apartados se detallan los diferentes escenarios.

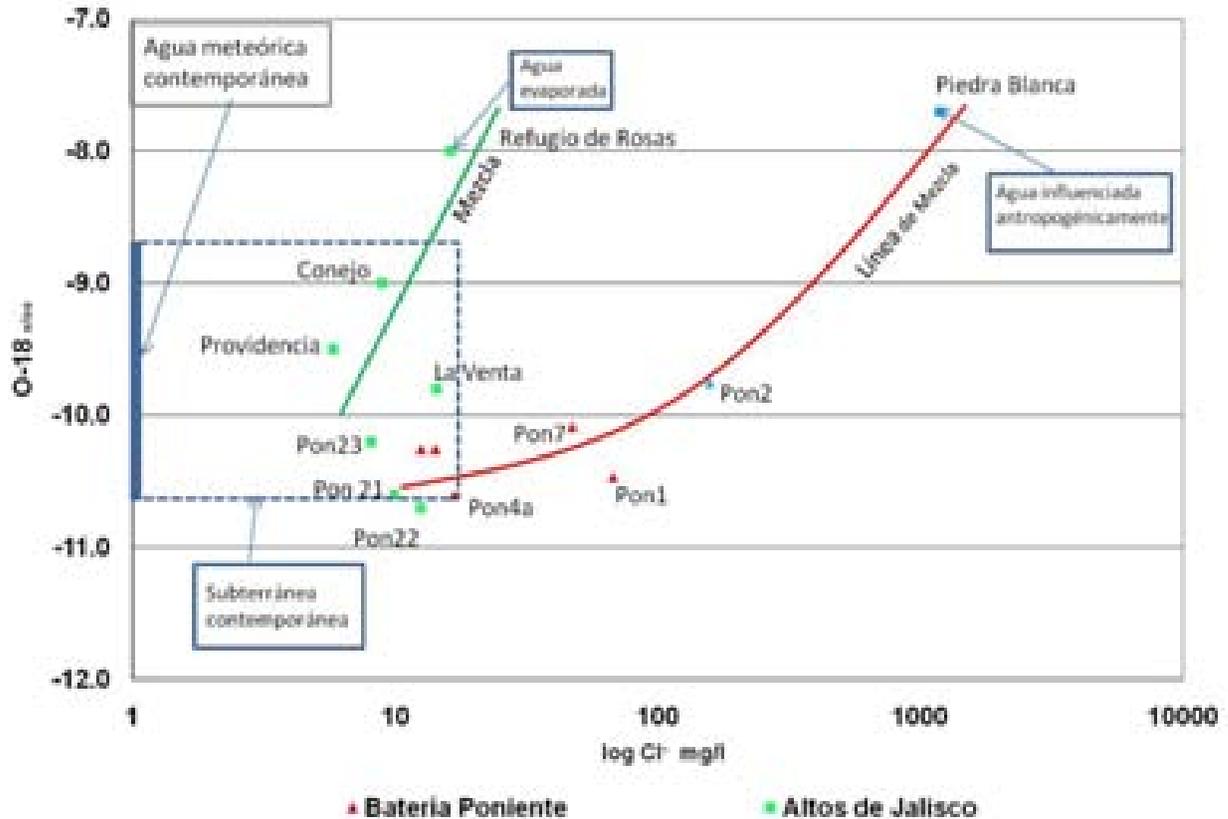


Figura 2.18: Propuesta de modelo de mezcla de tres componentes extremo para la zona en estudio, agua meteorica subterranea contemporanea muy parecida al agua meteorica contemporanea y agua influenciada antropogenicamente

2.4.3. Escenarios de Cálculo de Mezcla

Para lograr proponer las componentes extremo de mezcla, fue fundamental conceptualizar el modelo hidrogeológico y fortalecerlo con las observaciones fisicoquímicas reportadas en capítulos anteriores. Éste modelo al ser alimentado con los parámetros conservativos generados por esta investigación y de acuerdo con lo expuesto por [Carrera et al., 2004] se obtuvo lo siguiente.



Primer escenario:

El primer escenario se realiza por separado para las dos zonas, norte y sur, tal como lo describen las líneas de evaporación en la gráfica 2.16 y apoyada por la gráfica 2.17, en las cuales se observan 2 líneas de evaporación que parten de agua parecida a la contemporánea profunda hasta agua evaporada y corresponde al cálculo de los porcentajes como lo plantea [Kendall et al.,2004]. Este cálculo, se reduce a conocer la proporción de mezcla de dos componentes, y una tercera común para los dos sistemas, correspondiente a la que describen los pozos dentro del círculo de la gráfica 2.17, es por esto que se asume como valor extremo inicial al pozo Poniente 4a, que tiende hacia agua evaporada tipo Piedra Blanca y para el segundo cálculo se considera a partir de agua tipo Poniente 23, que se mezcla con agua tipo Refugio de Rosas. La noria Piedra Blanca se considera como una componente de máxima evaporación para la zona topográficamente baja y Refugio de Rosas de la misma manera para la parte alta.

Tabla 2.10: Proporciones de mezcla obtenidas bajo el primer escenario

Pozos	Tipo Poniente 4a	Tipo Piedra Blanca
Poniente 1	96.2	3.8
Poniente 2	72.2	27.8
Poniente 6	89.3	10.7
Poniente 7	82.5	17.5
Pozos	Tipo Poniente 23	Tipo Refugio de Rosas
La venta	81.8	18.2
Conejo	45.5	54.5
La Providencia	68.2	31.8

La tabla 2.10 presenta los resultados del cálculo de proporciones de mezcla. En esta no aparecen algunos pozos que se encuentran dentro del círculo en la gráfica 2.17 debido a que prácticamente se encuentran extrayendo agua de la misma componente tipo poniente 23 y 4a, por lo que se asume una presencia del 100%. Los resultados para la mezcla tipo Poniente 4a y Piedra Blanca ponen en evidencia un aporte importante de agua parecida a la meteórica contemporánea profunda mayor al 70% en los cuatro pozos donde se calculó



y proporciona valores menores a 28% para agua tipo Piedra Blanca, lo cual indica que del total de agua extraída en estos pozos una proporción del 3.8 al 27.8% corresponde a agua de mala calidad, lo cual se corrobora con los resultados de iones mayores mostrados en el diagrama de Piper donde se aprecia que estos pozos son los que presentan una mineralización contrastante, asumida como influencia antropogénica. Para los pozos en la parte superior se puede ver que la componente evaporada se presenta en proporciones que van de 18.2 a 54.5%, lo cual es indicativo de un aporte superficial que modifica sus características iónicas pero que no los contamina, simplemente se evapora, aumenta el contenido de sus sales y se infiltra, modificando el contenido iónico de esta agua que se extrae a través de ellos. La componente común identificada como Poniente 4a y 23, aparece con proporciones que van desde 45.5 hasta 96.2%, lo que puede interpretarse como la componente lateral que aporta más agua tanto a la parte alta como a la baja.

Segundo escenario:

Si se calcularan las proporciones de solo dos componentes no se deja abierta la posibilidad de que agua de lluvia pudiera estarse percolando y aprovechando en los pozos, es por esto que el segundo escenario consiste del cálculo de las proporciones de mezcla considerando tres componentes extremo y utilizando la metodología propuesta por [Carrera et al., 2004] lo cual generará un triángulo en el diagrama $\delta^{18}O$, δ^2H , que contiene a todos los pozos. Para el cálculo se declararon 12 pozos, con tres especies conservativas ($\delta^{18}O$, δ^2H y Cl^-) y tres fuentes con valores: (-9.4, -65, 0.5) correspondiente al promedio de agua meteórica medida en la temporada 2005, (-10.2, -70, 8.1) tipo Poniente 23 por encontrarse dentro del círculo de la figura 2.17 la cual corresponde a agua relativamente profunda con características de agua contemporánea y (-7.70, -60, 1194) Tipo Piedra Blanca. Las varianzas σ^2 , declaradas para los pozos fueron de (0.4, 0.4 y 4), estos valores son necesarios por el hecho de que no es posible conocer los valores extremos de forma estricta y corresponden al cuadrado del grado de confiabilidad analítica para el caso de los isótopos y para el Cl^- se tomó como varianza al cuadrado de la desviación estandar generada por diferentes mediciones realizadas en agua de lluvia por diferentes autores.

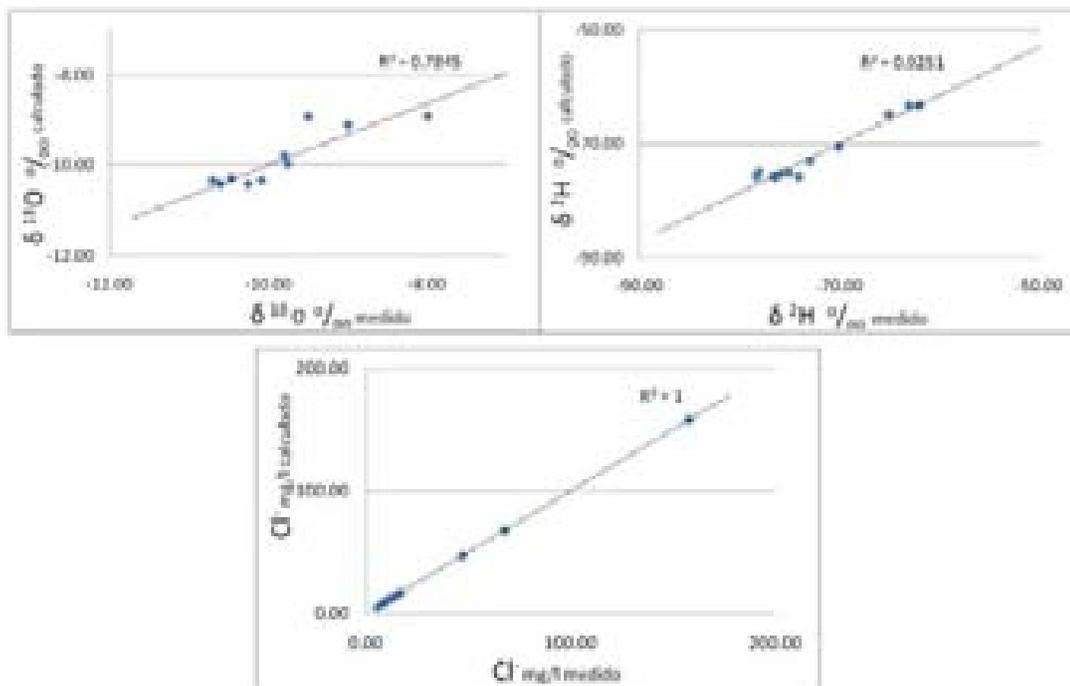


Figura 2.19: Segundo escenario: Correlación de los valores obtenidos contra los calculados tomando como miembros extremos, lluvia contemporánea, pozo Poniente 23 y noria Piedra Blanca.

La figura 2.19 muestra los valores obtenidos contra los calculados con el software MIX, donde la convergencia de la función objetivo tuvo un valor de 10.6. En esta se puede observar una correlación lineal con coeficientes de correlación R, mayores al 78 %. Esto indica una buena aproximación a los valores calculados y da cierto grado de confiabilidad para su interpretación.

La figura 2.20 presenta la proporción de las tres componentes en cada pozo. La componente Piedra Blanca aparece en todos los pozos desde 12.7% para el pozo Poniente 2 hasta 0.2% para el pozo Poniente 21, lo que indica una afectación de agua superficial en los pozos. La componente profunda se encuentra presente desde 99.8% en el pozo Poniente 21 hasta 0% en Refugio de Rosas donde la componente más importante es la de agua contemporánea

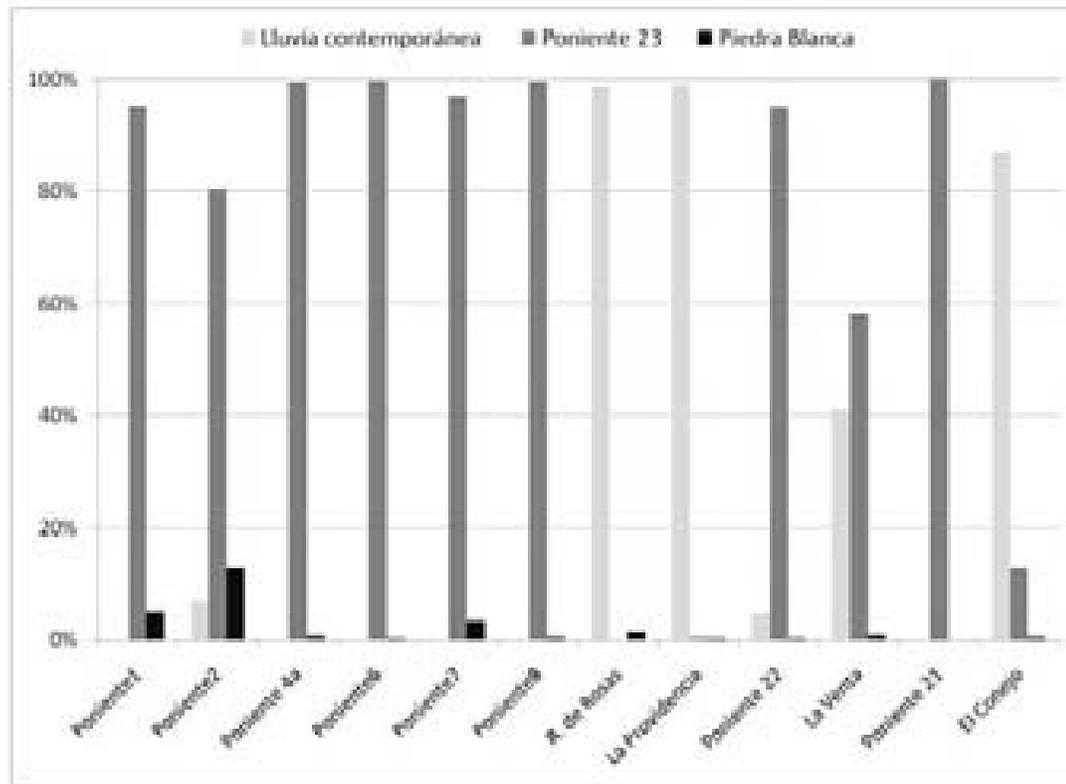


Figura 2.20: Segundo escenario, miembros extremos, lluvia promedio contemporánea, pozo Poniente 23 y noria Piedra Blanca

meteórica con 98.7%. Se observa que la componente más importante es la correspondiente a la lluvia contemporánea y la representada por el pozo Poniente 23 en todos los pozos. Es posible, como se ha mencionado y de acuerdo a los experimentos realizados en pozos durante la prueba de bombeo, que los pozos Poniente 21 y 22 presentan una mayor proporción de la componente profunda debido a que son pozos que trabajan continuamente casi 24 x 24 horas, lo cual permite asegurar la representatividad de agua más profunda, lo que no se cumple para todos los pozos localizados en la parte superior topográfica.

Capítulo 3

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

3.1. Discusión

De acuerdo a la hipótesis y objetivo planteados:

La discusión de este trabajo de investigación se concentra en la identificación de componentes extremo de agua subterránea y cálculo de sus porcentajes de mezcla que se descargan a través de los pozos seleccionados en la zona poniente del acuífero Valle de León, utilizando la metodología hidrogeológica e hidrogeoquímica convencional y la aplicación del modelo de cálculo MIX, mismas que no han sido aplicadas en esta zona.

El principio fundamental que se aplica es que, el agua extraída es una mezcla artificial de varias componentes debido al bombeo y que es posible inferir su presencia a través del análisis del: modelo conceptual de funcionamiento, análisis de parámetros físicos, químicos y principalmente de los componentes conservativos del agua subterránea.

De acuerdo a las columnas estratigráficas analizadas y estudios hidrológicos realizados en la zona, ésta forma parte de la subprovincia fisiográfica, Altos de Jalisco, esta siendo recargada por agua meteórica que se infiltra en los basaltos e ignimbritas fraturadas aflorantes, saturando a las tobas y a la parte superior fracturada del Conglomerado de Guanajuato, Tcg. El agua subterránea escurre a las partes de menor potencial obedeciendo al cambio topográ-



fico, escurrimiento superficial y debido a la frontera o cambio de permeabilidad generada por el Ticu y Tcg, $0,19 \times 10^{-4}$ y $8,1 \times 10^{-7}$ m/s, dando origen al flujo lateral que descarga tanto al Valle de León como a la parte norte de San Francisco del Rincón. Esto se corroboró con la configuración del nivel estático con respecto al nivel de mar, el cual indica que el agua subterránea se mueve de norte a sur.

La variación del nivel estático en el pozo Poniente 2 y su relación con los milímetros de lluvia anuales, pone en evidencia una recarga directamente relacionada con las condiciones climatológicas del área, ó al menos con la misma tendencia. Esto es debido a que en las presas cercanas aumenta su potencial se refleja inmediatamente en el nivel estático del pozo. Este efecto es de menor grado o imperceptible en los pozos Poniente 1 y 7, los cuales pudieran dar mayor información e identificar un efecto retardado, de años. Este análisis implica una componente superficial importante en el pozo Poniente 2, principalmente en época de lluvias y la identificación de una componente importante para el modelo de mezcla.

De acuerdo al experimento de medición de parámetros físicos durante una prueba de bombeo, se encontró que inicialmente se bombea agua somera y al cabo de cierto tiempo se incorpora agua con otras características que se relacionan con agua más profunda. La relación inversa de los valores de la conductividad eléctrica y temperatura, para el pozo seleccionado, implica recarga de dos tipos de agua, somera y profunda, donde la somera presenta mayor cantidad de STD.

Los parámetros físicos medidos en campo durante 10 meses por el SAPAL para la batería Poniente, presentan un coeficiente de variación menor al 10 %, lo cual indica que están siendo recargados con el mismo mecanismo hidrogeológico, a excepción del pozo Poniente 2 que evoluciona en el tiempo.

La conductividad eléctrica, debida principalmente al contenido de sólidos totales disueltos, permitió observar que en la mayoría de pozos no existe un aumento fuera de lo común, excepto para el Piedra Blanca y Las Joyas. Presenta un ligero incremento en los pozos donde se identifica un aumento en algún ion como cloruro y calcio. El análisis de calidad realizado por el SAPAL, los pozos Refugio de Rosas, Conejo y Las Joyas, resultaron no



potables, principalmente debido a su contenido en coliformes totales, 920, 540 y 920 nmp/100 ml, lo que no sucedió para los pozos Poniente 21, 22 y 23 que fueron muestreados cuando ya habían bombeado decenas de horas. Esta agua, que suponemos con una componente profunda mayor, presentó características iónicas bicarbonatadas-sódicas, conductividades de $500 \mu S/cm$ y temperatura entre 30 y 34 °C, así como bajo contenido en cloruro, menor a 15 mg/l, e isotópicamente corresponde a agua contemporánea meteórica. De esta manera, se pone en evidencia un aporte superficial hacia los pozos que probablemente fueron muestreados en los primeros minutos de iniciado el bombeo.

La dispersión encontrada de valores de temperatura del agua, desde 20.8 a 36.1 °C, son debidos al bombeo que mezcla agua de diferentes profundidades, como se demostró con la prueba de bombeo, al diseño del pozo y a la posición de la bomba, así como a la capacidad de las rocas para transportar el calor y del agua de absorberlo, lo que pudiera generar gradientes geotérmicos ligeramente diferentes. Al ser medida la temperatura del agua extraída de los pozos, se observa la sumatoria de estos efectos, y referida a la media ambiental algunos resultan termales. La dispersión de los valores del sistema en análisis evidencia la mezcla de agua fría y caliente que ocurre en los pozos.

Desde el punto de vista de facies o familias hidrogeoquímicas, los pozos que no presentan algún tipo de alteración extraen agua de tipo Bicarbonatada-sódica-potásica, menor a 400 mg/l de STD, lo cual indica interacción con minerales sodicos y potasicos. La roca ignimbrítica, Ticu, aporta la mayor cantidad de sodio, debido a que son rocas de composición félsica (silicio, oxígeno, aluminio, sodio, potasio y calcio). El olivino presente en los basaltos localizados al nor-este, Tbda, no se refleja en la composición del agua subterránea al menos en Mg^+ lo que indica que la recarga es local o que se este presentando una infiltración y circulación subterránea rápida que no disuelve a la roca. Los pozos que presentan alguna alteración en iones, se asocian con agua tipo Bicarbonatada-cálcica, lo cual se asume como agua mezclada con una componente alterada en estos iones.

Para reforzar la idea antes mencionada, se caracterizó isotópicamente al agua meteórica contemporánea con la metodología de recolección estacional, prácticamente cubriendo todo



el acuífero. Con esta metodología se observó una variación de -8 a -12 ‰ en $\delta^{18}O$ y -57 a -74 ‰ en δ^2H . Esta variación es natural y es debida a la combinación de los efectos estacional, cantidad, continental, de latitud y altitud que generan la firma isotópica de la zona, quizá alguno con menor o mayor grado que otro, lo que no ha permitido declarar un valor como característica general de la lluvia contemporánea, aún en investigación. Por el momento se sabe que existe una fuerte variación isotópica en la lluvia contemporánea que forma parte de una línea meteórica mundial y local. Parte de esta agua meteórica, se evapora antes de infiltrarse ya sea por almacenamiento superficial o rehuso.

Considerando que el agua meteórica se infiltra principalmente en el medio fracturado aflorante se puede asegurar que la recarga es relativamente rápida, debido a que los parámetros medidos en los pozos situados en este medio presentan características de agua contemporánea. Una prueba de esto son sus valores isotópicos que son comparables con los medidos en las estaciones de lluvia para la temporada 2005 y que se encuentran alineados a la línea meteórica mundial y local. Existe una dispersión en los valores isotópicos $\delta^{18}O$ medidos en agua subterránea que va de -9 a -10.7 , esto es debido a los diferentes efectos isotópicos que aún no han sido estudiados con detalle y que se encuentran relacionados con las condiciones climáticas tan variables que se generan cerca de los trópicos, y que marcan isotópicamente al agua meteórica, originando los diferentes efectos anteriormente mencionados.

Tomando como trazador la contaminación presente, principalmente a lo largo del Río Turbio y las presas La Trinidad y San Germán, se puede asegurar que existe una migración en la parte baja, pues algunos pozos están captando agua menor a 100 años de infiltrada, que corresponde al inicio del desarrollo industrial de la ciudad de León y que va evolucionando en concentración en algunos pozos. Un ejemplo de este comportamiento se tiene con el pozos Poniente 2 el cual evoluciona a razón de 20 mg/l año. Es probable una inducción de diferentes componentes, de los pozos en el transcurso del bombeo, puesto que su cono de abatimiento va aumentando hasta llegar a una estabilidad y se hace tan grande que influencia el agua superficial contenida en los primeras decenas de metros y aporta esta agua a los pozos, que mezclada con el agua de buena calidad poco más profunda dan como resultado la mezcla



encontrada. Esta componente profunda se considera la proveniente de los Altos de Jalisco y que se incorpora lateralmente al Valle.

Hasta este punto se consideran cuatro componentes de mezcla, agua meteórica contemporánea infiltrándose a través de la roca, agua parecida a la meteórica contemporánea almacenada en las rocas que conforman el acuífero, agua superficial evaporada en la parte norte y agua evaporada de origen residual en la parte baja del sistema. El cálculo de mezcla fue realizado utilizando dos métodos de cálculo diferentes, aunque con el mismo fundamento teórico, que es el de considerar únicamente los componentes conservativos para el cálculo.

Los pozos sobre la línea de evaporación corresponden a los que presentan características mixtas en el diagrama de Piper, así como el pozo Poniente 2. Los valores para los pozos Poniente 4a, 22 y 21 se traslapan, por lo que se asume que presentan una misma firma isotópica con características de agua contemporánea. Se diferencian dos líneas de evaporación, correspondientes a la parte superior y a la inferior topográficas. La primera línea muestra que es probable se este mezclando agua meteórica y agua superficial, evidenciada por los pozos alineados a las líneas meteóricas y finalizando en el pozo Refugio de Rosas. La segunda línea de evaporación se da por interacción entre agua superficial de mala calidad y agua de origen meteórico, evidenciadas por La noria Piedra Blanca y por los pozos Poniente 4a y Poniente 8. La intersección de la línea de evaporación con la meteórica local y mundial indican que el agua profunda obtenida a través de los pozos Poniente 21, 22, 23, 4a y 8 posee características de agua contemporánea la cual se pone en evidencia con los valores $\delta^{18}O$ y δ^2H encontrados por el GHI, 2008, para el manantial Ojo de Agua el cual se considera representativo de la zona de estudio (-10.6, -79) con temperatura de 23.7 o C y Cl - de 7.8 mg/l.

En el primer escenario de cálculo de mezclas, utilizando el método convencional donde se trabaja con los valores isotópicos $\delta^{18}O$ y δ^2H , se obtienen proporciones de mezcla que duplican los resultados obtenidos con el método de cálculo MIX. Esto es debido principalmente a que para el primer escenario se consideran 2 líneas de evaporación con un mismo origen pertenecientes a dos subsistemas que interaccionan con agua superficial con diferentes características químicas. El segundo escenario corresponde a un cálculo de tres componentes, las



cuales pertenecen a agua meteórica promedio, agua tipo Poniente 23 y Piedra Blanca. Como resultado del cálculo con la metodología MIX, y considerando una aportación del 12.7% de agua superficial, si tomamos un caudal constante promedio de 20 l/seg tendremos la proporción de agua de mala calidad $2.54 \text{ l/seg} = 219,456 \text{ l/día} = 80,101,440 \text{ l/año}$ infiltrados.

3.1.1. Conclusiones

Se debe tener precaución en la identificación de las componentes extremo que interaccionan en un sistema determinado, debido a que es posible suponer que participan un número mayor de componentes en la mezcla. Otra consideración es que regularmente no se conocen sus características físicas de los pozos. El análisis para la identificación de las componentes extremo debe contener la mayor cantidad de conocimiento hidrogeológico y químico. Es recomendable evaluar el comportamiento fisicoquímico en función al tiempo de bombeo de los pozos seleccionados, debido a que la mezcla puede cambiar por ser directamente dependiente de las condiciones superficiales o inducir componentes profundas con características químicas e isotópicas totalmente diferentes. El experimento llevado a cabo durante la prueba de bombeo resulta una aseveración fuerte debido a que regularmente se muestrea durante los primeros minutos de iniciado el bombeo y se caracteriza la componente somera, principalmente.

El agua subterránea, en el sistema analizado, recibe dos componentes evaporadas que evolucionaron localmente a partir de agua meteórica y subterránea extraída en sus alrededores. El cambio en la composición isotópica y química del agua de mala calidad es debida a la evaporación superficial, reuso en la ciudad, agricultura e industria. Esta componente al ser mezclada con la meteórica y la almacenada en el acuífero en diferentes medios hidroestratigráficos, da como resultado las proporciones de mezcla inducidas a través del pozo, el cual se relaciona directamente con el tiempo que haya permanecido descargando y el sistema de flujo en la zona.

Se puede aseverar que no existe importación de agua de otro sistema que haga suponer la presencia de otras componentes con características isotópicas diferentes. Por lo que, es factible suponer una componente de agua inicial que da origen o que evoluciona a agua evaporada.



Esta característica inicial se asocia a agua contemporánea de origen meteórico presente en la mayoría de los pozos, como lo confirman los antecedentes.

Si se adopta el modelo de funcionamiento hidrogeológico local, entonces se puede corroborar un efecto de recarga proveniente de los Altos de Jalisco. La componente lateral se identifica con la misma firma isotópica para la parte inferior identificada en los pozos Poniente 4a y 1 y en la parte superior identificada por los pozos Poniente 22 y 21. Esta componente se incorpora al Tgi y se extrae con una proporción mayor al 14 % en la mayoría de los pozos.

Esta metodología resulta práctica para una estimación de las proporciones de mezcla de las diferentes componentes que pudieran estar interviniendo en algún otro sistema. Resulta una metodología alternativa que puede ayudar a estimar un balance hidrológico, pues proporciona valores confiables de proporciones de componentes extremo.

Es necesario el monitoreo isotópico de la lluvia durante los siguientes años, con el fin de caracterizar mejor la función de entrada. Hacer experimentos a largo plazo con los cuales se pueda evaluar el impacto real del agua meteórica sobre la recarga total del acuífero y posteriormente aplicar herramientas de frontera que confirmen el comportamiento hidrodinámico del sistema.

Bibliografía

BGS, CNA, SAPAL y UACH., 1996, Effects of wastewater reuse on urban groundwater resources of Leon, Mexico: British Geological Survey, 101 p.

Bredehoeft J.D. 1997. Fault permeability near Yucca Mountain, Nevada, Water Resources Research, v. 33, p. 2459-2463.

Cardona, A., 2007., Hidrogeoquímica de sistemas de flujo, regional intermedio y local resultado del marco geológico en la mesa central: reacciones, procesos y contaminación [Tesis doctoral]: UNAM, 200 p.

Carrera, J., 1984., Estimation of aquifer parameters under transient and steady-state conditions Ph. D. Dissertation. Departamento de Hidrología y RecursosHidráulicos. Universidad de Arizona. Tucson, Arizona, 258 p.

Carrera, J., Vázquez-Suñé, E., Castillo, O. and Sánchez-Vila, X., 2004, A methodology to compute mixing ratios with uncertain end-members: Water Resources Researcrh, v. 40.

Carrillo Rivera J.J., Clark, I.D. and Fritz, P., 1992, Investigating recharge of shallow and paleo-groundwaters in the Villa de Reyes basin, SLP, México with environmental isotopes: Applied Hydrogeology, v. 4, p. 35-48.

Carrillo Rivera J.J., Cardona A., and Moss D., 1996, Importante of the vertical component of groundwater flow: a hydrogeochemical approach in the valley of San Luis Potosí, Mexico: Journal of Hidrology, v. 185, p. 23-44.

CEASG., 1998, Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de León: Geofísica Exploraciones S.A. de C.V. GUySA: Reporte técnico. Contrato No. CEAS-APA-GTO-97-023. Vol. 1 y 2.



CEASG., 1998, Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Silao-Romita, Guanajuato: Estudio realizado a contraparte por Lesser y asociados S.A. de C.V. 90 p.

CEASG. 1998. Estudio hidrogeológico y modelación matemática del acuífero valle de León. Vol. 1 y 2.

CEASG., 1999, Estudio isotópico para la caracterización del agua subterránea en la zona de la Muralla, Guanajuato, 74 p.

CEAG, 2004, Evaluación del potencial acuífero de reserva y recarga en zonas de falla mediante la interpretación de imágenes de satélite, correlación de cortes litológicos y sondeos transitorios electromagnéticos en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico en el estado de Guanajuato. 119 p.

Chilton P.J., Stuart M.E., Escolero O., Marks R.J., González A., and Milne C.J., 1998, Groundwater recharge and pollutant transport beneath wastewater irrigation: the case of Leon, Mexico: Geological Society, London Special Publications, v. 130, p. 153-168.

CNA, Subdirección general técnica. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero valle de León, estado de Guanajuato. Gerencia de aguas subterráneas, subgerencia de evaluación y modelación hidrogeológica. México D.F., p. 14.

Clark, I. and Fritz, P., 1997, Environmental isotopes in hydrogeology: Lewis publishers, New York, 328 p.

Cortés A. and Farvolden R.N., 1989, Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de las Cruces, México: Journal of Hydrology, v. 107, p. 147-153.

Cortés A., Durazo J., and Farvolden R.N., 1997, Studies of isotopic hidrology of the basin of Mexico and vicinity; Annotated bibliography and interpretation: Journal of Hidrology, v. 198, p. 346-376.

Cortés A, y Durazo J., 2001, Tendencia del Oxígeno-18 en la precipitación del centro de México: Ingeniería Hidráulica en México, v. 16, p. 93-102.

Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric water: Science, v. 133, p. 1702-1703.

Custodio E., 1996, Hidrogeología subterránea: Tomo 1 y 2, 1230 p.



DERNA., 1988, Estudio Geohidrológico en las inmediaciones de la ciudad de León, Guanajuato: Memoria técnica. 50 p.

Domenico P. and Schwartz F.W., 1990, Physical and chemical hydrogeology: John Wiley and sons, Inc., USA, 824 p.

Douglas, M., 1997, Mixing and temporal variations of groundwater inflow at the Con Mine, Yellowknife, Canada; An analogue for a radioactive waste repository [M.Sc. thesis]: Department of Geology, University of Ottawa, Canada, p. 101.

Drever, J., 1997, The geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments: Prentice Hall, p. 235-351.

El Bakri, A. Tantawi, A., Blavoux, B. and Dray, M., 1992, Source of water recharge identified by isotopes in El Minya Governate (Nile Valley, Middle Egypt). In: Isotope Techniques in Water Resources Development 1991, IAEA Symposium 319, March 1991, Vienna, p. 643-645

Perforaciones y construcciones Escorpion S.A. de C.V., 1994, Estudio Geológico-Geofísico con fines Geohidrológicos de la porción occidente de León, estado de Guanajuato, Reporte técnico, 80 p.

Eung Seok Lee and Noel C. Krothe, 2001, A four -component mixing model for water in a karst terrain in south-central Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers: Chemical Geology, v. 179, p. 129-143.

Fetter, C. W., 1988, Applied Hydrogeology: Merrill, Columbus, OH, 592 p.

Freeze R. A., and Cherry J. A., 1979, Groundwater: Pentice-Hall, 589 p.

Ghosh, S. K. 1993. Structural geology, fundamentals and modern developments: Pergamon press, 598 p.

GEOEVALUACIONES S.A. DE C.V., 1994, Estudio geológico-geofísico con fines geohidrológicos de la porción occidente de la ciudad de León, Estado de Guanajuato. Reporte técnico. 80 p.

Gonfiantini, R., 1986. Environmental isotopes in lake studies. In: P. Fritz and J.-Ch Fontes (Eds) Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, vol. 2, The Terrestrial Environ-



ment., B. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands: 113:168

Haneberg W., 1995, Steady state groundwater flow across idealized faults: *Water Resources Research*, v. 31, p. 1815-1820.

Hanor, J. S., 1987, Origin and migration of subsurface sedimentary brines, *Short Course 21*, (SEMP) Society for Sedimentary Geology, Tulsa, OK, p. 36-74.

Hanor, J. S., Kharaka, K., and Land, L. S., 1988, Geochemistry of waters in deep sedimentary basins: *Geology* v.16, p. 560-561.

Hem, J. D., 1985, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water: U. S. Geological Survey water-supply paper, v. 2254, p. 59-128.

Hernández N., 1991, Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero del Valle de León, Guanajuato [Tesis de licenciatura]: Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F. 129 p.

Horst A., Jurgen Mahlknecht, and Broder J.M., 2007, Estimating groundwater mixing and origin in an overexploited aquifer in Guanajuato, Mexico, using stable isotopes (strontium-87, carbon-13, deuterium and oxygen-18): *Isotopes in Environmental and Health Studies*, v. 43, p. 323-338

Horst A., Mahlknecht, Merkel, B.J., Aravena, R., and Ramos-Arroyo Y.R., 2007, Evaluation of the recharge processes and impacts of irrigation on groundwater using CFCs and radiogenic isotopes in the Silao-Romita basin, Mexico: *Hydrogeology Journal*, v. 16, p. 1601-1614.

Huntoon P. W., and Lundy, D. A., 1979, Fracture-controlled groundwater circulation and well siting in the vicinity of Laramie, Wyoming: *Groundwater* v. 17, p. .

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI, 2006, Información Geográfica contenida en la carta F14C41 escala 1:50000.

Iriarte S., 2003, Impact of urban recharge on long-term management of Santiago north aquifer, Santiago-Chile [Tesis]: Waterloo Ontario, 186 p.

Jenkins D., and Snoeyink V., 2003, *Química del agua*: LIMUSA, México, 508 p.

Kendall, C., and Doctor, D. H., 2004, Stable isotope applications in hydrologic studies. in Drever, J. I., Holland, H. D., and Turekian, K. K., eds., *Treatise on geochemistry*, vol 6.



5, Surface and groundwater weathering and soils, Elsevier, p. 319-364.

Kharaka, Y. K., and Thordsen, J. J., 1992, Stable isotope geochemistry and origin of water in sedimentary basins, in Clauer, N., and Chaudhuri, S., eds., Isotope signatures and sedimentary records, Berlin, Springer, p. 411-466.

Maloszewski P. and Zuber, A., 1996. 1996, Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data. In: Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrology, IAEA Vienna: 9-58

Mahlknecht J., Garfias-Solis J., Aravena R., and Tesch R., 2006, Geochemical and isotopic investigations on groundwater residence time and flow in the Independence Basin, Mexico: Journal of Hydrology, v. 324, p. 283-300.

Mahlknecht J., Schneider J.F., Merkel, B.J., Navarro de León I., and Bernasconi S.M., 2004, Groundwater recharge in a sedimentary basin in semi-arid Mexico: Hydrogeology Journal, v. 12, p. 511-530.

Martínez-Reyes, J., 1992, Mapa Geológico de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México, serie 1:100,000, 1 mapa con texto.

Panel on Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone, U.S. National Committee for Rock Mechanics, Board on Earth Sciences and Resources, National Research Council 392 p.

Nieto-Samaniego, A.F., 1992, Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la parte sudoriental de la Sierra de Guanajuato: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v:9, p. 146-155.

NOM-127-SSA1, 1994, Establece los límites máximos permisibles etc SEMARNAT, Diario oficial de la federación.

Ophori, D.U., and Tóth J., 1989, Characterization of ground-water flow by field mapping and numerical simulation, Ross Creek Basing, Alberta, Canada: Ground Water, v. 27, p. 193-201.

Prol, R.M., 1996, El calor de la Tierra: Fondo de cultura Económica, 99 p.

Proyecto de protección integral de aguas subterráneas, PPIAS, 2005, CARSUCRE. 120p.



Ramos, J.A., Durazo J., Moran T., Juárez F., Cortes A., and Johannesson K., 2007, Evidencias Hidrogeoquímicas de mezcla de flujos regionales en el acuífero de la Muralla, Guanajuato: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 24, p. 293-305.

Ramos-Leal, J.A., Durazo J., Gonzáles-Moran T., Ramírez-Guzmán., Johannesson K.H., and Cortés A., 2005 Decay in chloride content of ground water due to excessive production of a well field near León, Mexico, 2005: *Geofísica Internacional*, v. 44, p. 385-390.

Reyes R., 2007, Análisis de un sistema de remediación acuífera mediante bombeo y tratamiento en Buena Vista, Guanajuato [Tesis Doctoral]: Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM. 192 p.

Rozanki, K., and Araguas L., 1995, Spatial and temporal variability of stable isotope composition of precipitation over the south american continent: *Bulletin institute frances studies andines*, v. 24, p. 379-390.

Sanz E., 2006, Hidráulica subterránea aplicada: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos,

SAPAL, 2002, Estudio geohidrológico en la zona de Jacinto López para suministro de agua a la ciudad de León, Guanajuato: 110p.

Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León Guanajuato, SAPAL, 2007, Modelación hidrogeoquímica, comportamiento isotópico y modelación matemática de las fuentes de abastecimiento a la ciudad de León, Guanajuato: UNAM, Instituto de Geofísica, contrato realizado para el SAPAL, 162 p.

SARH, 1991, Estudio hidrogeoquímico y modelación matemática del acuífero del Río Turbio para definir las acciones encaminadas a proteger de contaminantes las fuentes de abastecimiento de la ciudad de León, Gto.: Departamento de recursos naturales, UNAM, contrato SARH CC-88-306, 104 p.

Singhal, B.B.S, Gupa, R.P., 1999, *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*: Kluwer Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 400 p.

Stamos C. L., et. al., 2003, Geologic setting, geohydrology and Groundwater Quality near the Helendale fault in the Mojave River Basin, San Bernardino Country, California: USGS



Water-Resource Investigations, Report 03-4069.

Stierman D. J., 1984, Geophysical and geological evidence for fracturing, water circulation and chemical alteration in granitic rocks adjacent to major strike-slip faults: *Journal of Geophysical Research*, v. 89, p. 5849-5857.

Tóht, J., 1995, Hydraulic continuity in large sedimentary basins,: *Hydrogeology Journal* v. 3, p. 4:16.

Tóht, J., 1999, Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations: *Hydrogeology Journal*, v. 7, p. 1-14.

Toth, D.J., and Katz. B., 2005, Mixing of shallow and deep groundwater as indicated by the chemistry and age of karstic springs: *Hydrogeology Journal*, v. 14, p. 827847.

UNESCO, 2006, *Glosario Hidrológico Internacional*.

UNESCO-IAEA, 2002, *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico, principios y aplicaciones*: Instituto Geológico y Minero de España, 596 p.

United States Geological Survey, USGS, 1992, *Water-Supply, paper 2254, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. U.S.: Government printing office Washington, D.C. 20402. 263p.

Worden, R. H., 1996, Controls of halogen concentrations in sedimentary formation waters: *Mineralogical Magazine*, v. 60, p. 259-274.

IV Curso hispanoamericano de hidrología, 2007, Salto, Uruguay.



DATUM

Los mapas se generaron bajo la proyección cartográfica UTM con el Datum geodésico WGS 84, para la zona 14 norte correspondiente a una parte de la República Mexicana

APENDICE A

UNIDADES DE MEDICIÓN

- La concentración de los elementos disueltos se reportan en mg/l
- El contenido isotópico en $\delta's$
- La conductividad eléctrica en $\mu S/cm$
- La temperatura en °C

ABREVIACIONES

Arc Gis 9	Software comercial
CV	Coefficiente de Variación de Pearson
k	Conductividad hidráulica
δ^2H	Delta de Deuterio
δ^{18O}	Delta de Oxígeno-18
EN	Eje Neovolcánico
°C	Grados centígrados
Global Mapper	Software
log	Logaritmo base diez
ln	Logaritmo natural
$\mu S/cm$	Microsiemens por centímetro
Ma	Millones de años



m.s.n.m	Metros sobre el nivel de mar
mg/l	Miligramos por litro
ne	Nivel estático
nd	Nivel dinámico
N	Norte
OL	Orogenia Laramide
p	Presión
SEV	Sondeo Eléctrico Vertical
SIG	Sistema de Información Geográfica
SMO	Sierra Madre Occidental
STD	Sólidos Totales Disueltos
o/oo	Tantos por mil
T	Temperatura
UTM	Universal Translator Meridian
VL	Valle de León
VRT	Valle de Río Turbio
VSR	Valle Silao Romita
Winrock	Software comercial

ORGANIZACIONES (siglas)

CEASG	Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
IGE	Instituto de Geología
IGF	Instituto de Geofísica
IGFUNAM	Instituto de Geofísica de la UNAM
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática



LEMIE	Laboratorio de Espectrometría de Masas de Isótopos Estables
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
SAPAL	Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León
SGM	Servicio Geológico Mexicano
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
UAG	Universidad Autónoma de Guerrero
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México



APENDICE B

DISCONTINUIDADES

Desde un punto de vista hidrogeológico, las discontinuidades y fracturas son de las estructuras geológicas más importantes. La mayoría de las rocas tienen fracturas y otras discontinuidades que facilitan el almacenamiento y movimiento de fluidos a través de estos. Muchas líneas de flujo se encuentran definidas a lo largo de diaclasas, fracturas, zonas de cizalla, fallas y otras discontinuidades. Discontinuidad es un término colectivo que incluye a: Plano de estratificación, usualmente esta es la superficie que crea discontinuidad en rocas sedimentarias tales como arenisca, limos, lutitas etc. Excepto en algunas areniscas masivas o calizas. Foliación, es una propiedad de las rocas, este termino es restringido a los planos secundarios ocurridos en rocas metamórficas. Fracturas también llamadas diaclasas, son planos a lo largo de los cuales el estrés causó perdidas de cohesión en las rocas. Convencionalmente una fractura o diaclasa es definida como un plano donde hay un movimiento apenas visible paralela a la superficie de la fractura; si no, es clasificada como una falla. Las fracturas pueden tener diferentes orígenes, como son: a) fuerzas tectónicas relacionadas con deformación de las rocas, b) fuerzas residuales debidas a eventos que pasaron mucho antes del fracturamiento, c) contracción debida a enfriamiento de magma o desecación de sedimentos, d) movimientos superficiales como son movimientos de tierra o de glaciares, y f) meteorización. Fallas y zonas de cizalla constituyen un tipo muy importante de discontinuidades en rocas. Las fallas son planos de ruptura a lo largo de los cuales la pared opuesta se ha movido respecto a la otra, paralelamente a la superficie de ruptura. La orientación del plano de falla es definido en términos de rumbo del estrato e inclinación. Varían en dimensión desde unos pocos milímetros de largo con desplazamiento menor hasta varios cientos de kilómetros. El ángulo que forma el plano de falla con el plano paralelo vertical al rumbo de la falla es llamado hade. En muchos casos el desplazamiento es distribuido a través de una zona, llamada zona de falla, que puede ser unos pocos centímetros hasta cientos de metros de ancho. Las fallas pueden exivir movimientos traslacionales o rotacionales. Slip es el desplazamiento medido en la superficie



de falla; strike-slip y dip-slip son el desplazamiento a lo largo de la dirección de rumbo y la dirección de inclinación respectivamente en el plano de falla. Throw es el desplazamiento vertical causado por la falla y el bloque que se ha movido arriba y abajo es llamado bloques upthrow and downthrow, respectivamente, [?].



APENDICE D

FLUJO PREFERENCIAL

El termino "flujo preferencial" es frecuentemente usado para describir flujo de agua no uniforme caracterizado por velocidades a escala local. La consecuencia de flujo preferencial es que una porción del agua infiltrada puede concentrarse a mover a lo largo de caminos en cantidades que son significativamente rápidas que el resto de agua infiltrada. Con la ocurrencia del flujo preferencial, los contaminantes llevados por el agua infiltrada pueden llegar a profundidades importantes en tiempos cortos. Sin embargo, el flujo preferencial es reconocido generalmente por tres factores a) la presencia de macroporos (incluyendo fracturas), b) el desarrollo de flujo inestablemente y c) flujo tipo embudo debido a la presencia de capas inclinadas que dirigen de forma descendente el movimiento del agua [?].

Las fallas pueden afectar el régimen de agua subterránea de diversas formas , algunas de las más importantes son las siguientes: 1.- Una unidad acuífera puede ser desplazada, truncada u omitida. 2.- Una falla puede producir impervious rock de nuevo en el acuífero, que puede afectar el flujo de agua subterránea y distribución. 3.- El corte de un acuífero por una falla puede provocar un seepage y formación de una línea de manantiales a lo largo de la falla. 4.- Una falla puede conllevar a un escarpe: la erosión intensa de las rocas aflorantes y depositación de extenso pie de monte en el bloque situado en la parte baja; puede servir como un buen acuífero. 5.- Un acuífero puede aparecer repetidamente en un pozo perforado debido a thrust faulting; esto puede también estar reexpuesto en la superficie para recarga. 6.- Un dique vertical, venas etc., que generalmente actúan como barreras al flujo de agua subterránea, pueden ser cortadas por fallas y estas pueden producir canales locales frente a las barreras. 7.- Una falla puede dar lugar a agua subterránea cascade. 8.- Las fallas crean zonas lineales de alta porosidad secundaria; esas zonas pueden actuar como canales preferidos de flujo de agua subterránea, dando origen a la recarga/descarga. 9.- Una falla puede llevar a interconexiones de flujo subterráneo entre cuencas. 10.- Una zona de falla, cuando es silicificada, puede actuar como una barrera al aflujo de agua subterránea.



GLOSARIO

- Acuífero.- Formación permeable capaz de almacenar y transmitir cantidades aprovechables de agua
- Acuífero Artesiano.- Acuífero cuya superficie piezométrica se encuentra por encima de la superficie del suelo. (A veces se utiliza, con poca exactitud, como sinónimo de acuífero confinado)
- Acuífero confinado.- Acuífero limitado superior e inferiormente por formaciones impermeables o casi impermeables
- Acuífero libre.- Acuífero que contiene agua con una superficie piezométrica libre y presenta una zona no saturada
- Acuífero semiconfinado.- Acuífero cubierto y/o sustentado por una capa relativamente delgada de material semipermeable, a través de la cual tiene lugar el flujo hacia o desde el acuífero
- Acuífugo.- Formación sin intersticios interconectados y, por tanto, incapaz de absorber o transmitir agua
- Acuitardo.- Formación geológica de naturaleza algo impermeable y semiconfinada, que transmite agua en proporción muy pequeña en comparación con un acuífero
- Acuicludo.- Lecho saturado, formación o grupo de formaciones muy poco conductoras que ceden cantidades inapreciables de agua, a drenes, pozos, manantiales y zonas de rezume
- Agua.- Fase líquida de un compuesto químico formado aproximadamente por dos partes de hidrógeno y 16 partes de oxígeno, en peso. En la naturaleza contiene pequeñas cantidades de agua pesada, gases y sólidos (principalmente sales), en disolución



- Agua juvenil o agua primitiva.- Agua proveniente del interior de la tierra, que no ha existido antes en forma de agua atmosférica o superficial
- Agua subterránea.- Agua del subsuelo que ocupa la zona saturada
- Agua fósil.- Agua infiltrada en un acuífero durante una antigua época geológica bajo condiciones climáticas y morfológicas diferentes de las actuales y almacenada desde entonces
- Agua magmática.- Agua impulsada hasta la superficie terrestre desde gran profundidad, por el movimiento ascendente de rocas ígneas intrusivas
- Altura piezométrica o carga estática.- 1) Altura a la que subirá el agua en un piezómetro conectado a un punto del acuífero 2) Suma del potencial de elevación y del potencial de presión en un punto dentro de un líquido expresado en forma de altura
- Área de influencia o zona de influencia.- Superficie que rodea un pozo de bombeo o de recarga en el que el nivel freático (en acuíferos libres) o la superficie piezométrica (en acuíferos confinados) se eleva o disminuye en grado significativo por bombeo o recarga
- Área de recarga o área de alimentación.- Área que alimenta un acuífero, bien por filtración directa o por escorrentía y la infiltración subsiguiente
- Buzamiento.- Inclinación de una capa del terreno
- Capa confinante o estrato confinante.- Formación que se extiende por encima o por debajo de un acuífero mucho más permeable
- Caudal.- Cantidad de agua de una corriente que atraviesa un punto dado en un periodo concreto
- Clasto.- Fragmento de un mineral, de una roca o de un fósil, que está incluido en una roca, formando parte constitutiva de ella



- **Clima seco.-** Clima en el cual la precipitación anual es menor que la pérdida potencial de agua por evaporación
- **Colmatación.-** Deposición de partículas finas tales como arcillas o limo en la superficie y en los poros de un medio poroso permeable, por ejemplo el suelo, y que tiene como efecto una reducción de la permeabilidad
- **Conductividad hidráulica.-** Propiedad combinada de un medio poroso y saturado y del fluido que lo atraviesa, que determina la relación, llamada ley de Darcy, entre el caudal específico y el gradiente hidráulico que lo origina
- **Cuenca.-** Área de drenaje de un curso de agua, río o lago
- **Cuenca hidrogeológica.-** Unidad fisiográfica que contiene un gran acuífero o varios conectados o interrelacionados, cuyas aguas fluyen a un desagüe común, y que está delimitada por una divisoria de aguas subterráneas
- **Deuterio:** Isótopo estable del hidrógeno con masa atómica 2, cuyo núcleo contiene un neutrón y un protón
- **Electrón de valencia.-** Los electrones que intervienen en el proceso de enlace; los electrones que ocupan el nivel de energía principal más elevado de un átomo
- **Equilibrio químico.-** Estado al que tiende una reacción química reversible, en el que las concentraciones de reacciones y productos permanecen invariables al igualarse las velocidades de reacción
- **Escorrentía.-** Agua que fluye sobre la tierra en vez de infiltrarse en el suelo.
- **Espectrómetro de masas:** Es un instrumento diseñado para separar moléculas de acuerdo a su relación carga-masa en base a su movimiento a través de campos eléctricos y/o magnéticos.
- **Evapotranspiración.-** Efecto combinado de la evaporación y la transpiración



- Facies.- Porción de objetos que posee un conjunto distintivo de características que la distingue de otras partes de la misma unidad
- Falla.- Una falla es una fractura que separa dos bloques de roca, los cuales pueden deslizarse uno respecto al otro en forma paralela a la fractura. A cada deslizamiento repentino de estos bloques se produce un temblor.
- Fallas de rumbo o transcurrentes. Las fallas de rumbo son fallas verticales (o casi verticales) donde los bloques se mueven horizontalmente. Este movimiento horizontal puede ser de tipo lateral derecho o de tipo lateral izquierdo, dependiendo de si un observador parado en uno de los bloques ve que el bloque de enfrente se mueve hacia la derecha o hacia la izquierda.
- Fallas normales e inversas.- Son fracturas inclinadas con bloques que se deslizan en forma vertical principalmente. En este caso los bloques reciben el nombre de Techo y Piso, siendo el techo el bloque que yace sobre la fractura inclinada. Si el techo de la falla se mueve hacia abajo la falla es de tipo normal. En caso contrario se trata de una falla inversa. Cuando el movimiento de los bloques es una combinación de movimiento horizontal y vertical se trata de una falla oblicua
- Flujo de aguas subterráneas.- Movimiento del agua en un acuífero
- Fraccionamiento Isotópico: Es la diferencia en la distribución de los isótopos del mismo elemento en dos fases diferentes, que coexisten. (Ejemplo; agua-vapor de agua) en mutuo intercambio isotópico. El fraccionamiento isotópico tiene características físicas y químicas ligeramente diferentes, principalmente las físicas, debido a las pequeñas diferencias en masa. Por lo tanto, el fraccionamiento isotópico es, en general, más grande para los elementos ligeros porque la diferencia relativa de masa es mayor
- Fuente de falla.- Fuente alimentada por aguas subterráneas profundadas que manan a través de una falla
- Fuente de fractura.- Fuente que mana de una fractura en la roca



- Fuente termal.- Fuente cuya agua brota a una temperatura superior a la temperatura media anual del lugar en el que está localizada
- Gradiente geotérmico.- Aumento de temperatura de la tierra por unidad de profundidad (aproximadamente 3.3°C por 100m)
- Gradiente hidráulico.- En un conducto cerrado, la pendiente del perfil piezométrico
- Hidrogeología.- Rama de la hidrología que trata de las aguas subterráneas, teniendo en cuenta las condiciones geológicas
- Hidrogeoquímica.- Ciencia que estudia la composición química de las aguas naturales, sus cambios y las causas de los mismos
- Infiltración.- Flujo de agua que penetra en un medio poroso a través de la superficie del suelo
- Intercambio Isotópico: El intercambio isotópico de un elemento dado entre compuestos químicos o fases. Este proceso permite diferentes composiciones isotópicas de compuestos o fases que co-existen. Resulta conveniente hablar del intercambio entre agua y rocas (especialmente calizas). En este proceso químico la composición isotópica del oxígeno del agua y de la caliza puede ser afectada (el contenido de hidrógeno de las rocas es generalmente pequeño). Este proceso es muy leve a las temperaturas que normalmente ocurren en los acuíferos y puede ser de importancia únicamente para aguas termales, donde la temperatura elevada aumenta significativamente la razón de intercambio.
- Ionización.- Conversión de un átomo o una molécula en un ión por pérdida o ganancia de uno o más electrones. Se produce por disociación de las moléculas, bien por disolución o por acción de un campo eléctrico, en el caso de los gases
- Isótopo.- Cada uno de los distintos nucleidos que tienen el mismo número atómico y, por lo tanto, pertenecen al mismo elemento químico, pero que difieren entre sí por



el número másico. Los isótopos de un elemento poseen igual número de protones y electrones, difiriendo en el número de neutrones

- **Isótopos Ambientales:** Aquellos isótopos de origen natural o artificial, que ocurren en el ambiente sobre una escala regional o global. Las variaciones isotópicas en aguas naturales pueden ser usadas en estudios hidrológicos para determinar algunos aspectos importantes de las aguas superficiales y subterráneas, tales como origen, edad, tiempos de residencia, direcciones de flujo, familias de agua, etc.
- **Isótopos radiactivos.-** Los isótopos radiactivos tienen núcleos inestables. Cambian a isótopos de otros elementos con el tiempo (decaimiento radiactivo). La razón de decaimiento se expresa generalmente por medio de la vida-media. La concentración de isótopos radiactivos en un sistema cerrado decrece exponencialmente con el tiempo a que menos que exista producción al mismo tiempo por algunos otros procesos radiactivos
- **Isótopos estables.-** Los isótopos estables tienen un núcleo con configuración estable. Su concentración en un sistema cerrado no cambia con el tiempo a menos que sean productos por algún elemento radiactivo presente en el sistema
- **Límite hidrogeológico.-** Discontinuidad lateral en la estructura geológica, que marca la transición del terreno permeable de un acuífero, a otro terreno de propiedades hidrogeológicas sensiblemente diferentes
- **Línea de agua meteórica:** Es el mejor ajuste de los puntos que representan la composición isotópica (O-18, D) de las muestras de precipitación provenientes de diferentes partes del mundo, estaciones colocadas en diferentes puntos del globo terrestre, catalogadas como: Isleñas, Continentales y Costeras; controladas por el Organismo Internacional de Energía Atómica
- **Línea equipotencial.-** Línea (o superficie) a lo largo de la cual el potencial es constante
- **Línea de flujo o trayectoria.-** Curva descrita por una partícula de agua en movimiento



- Manto.- Capa de la tierra de 2,885 km de grosor situada debajo de la corteza terrestre
- Masa atómica.- Magnitud física que expresa el cociente entre la masa de un átomo de un isótopo determinado y la doceava parte de un átomo de ^{12}C . No tiene unidad ni dimensiones, se expresa simplemente como un número real positivo
- Masa molecular.- Suma de las masas atómicas de todos los átomos contenidos en una molécula.
- Manantial.- Flujo de agua subterránea que emerge de forma natural en la superficie del terreno
- Monoclinal.- Estructura o plagamiento en el que todos los estratos tienen un mismo buzamiento y dirección
- Nivel freático.- El nivel superior de la zona saturada de las aguas subterráneas
- Oxidación.- La pérdida de uno o más electrones de un átomo o ión. Denominado así por que los elementos se combinan normalmente con el oxígeno
- Permeabilidad.- La medida de la capacidad de un medio para transmitir agua. Sinónimo, conductividad hidráulica
- pH.- El logaritmo común negativo de la concentración de los iones hidrógeno en una solución
- Plegamiento.- Efecto producido en la corteza terrestre por el movimiento conjunto de rocas sometidas a una presión lateral
- Porosidad.- La porción de una roca que no es ocupada por materia mineral sólida, puede ser ocupada por el agua subterránea. Se expresa por la relación entre el volumen de los huecos y el volumen total del medio
- Precipitación.- La formación de una fase condensada (sólida o líquida) durante una reacción



- Reacciones REDOX.- Reacción de oxidación reducción o reacción con transferencia de electrones. La oxidación se refiere a cualquier reacción en la que una sustancia o especie pierde electrones. La reducción es una ganancia de electrones.
- Riolitas.- Roca magmática efusiva, rica en vidrio y con escasos cristales de cuarzo, feldespato, anfíbol y biotita, con textura fluidal. Su origen se encuentra en un magma granítico de temperatura inferior a los 1000°C
- Roca.- Mezcla consolidada de minerales
- Sinclinal.- Plegamiento de las capas del terreno en forma de v en el cual los estratos más antiguos envuelven a los más modernos
- Sistema.- Una porción del universo bajo observación o consideración
- Sobreexplotación.- Extracción continua del agua de un acuífero o embalse, a una velocidad superior a la de alimentación
- Suelo.- Combinación de materia orgánica y mineral, agua y aire
- Temperatura.- La temperatura de una sustancia mide la energía cinética promedio de sus partículas
- Trazador ambiental del agua: Cualquier sustancia que aparece en las aguas naturales derivada del ambiente, cuya distribución de concentración en el espacio y/o tiempo puede ser usado para diferenciar o "etiquetar" masas específicas de agua, o para identificar su origen. Los trazadores ambientales comúnmente, pasan a formar parte del ciclo hidrológico a través de los procesos atmosféricos, pero también lo hacen por disolución o intercambio con rocas o material orgánico que se encuentran en los estratos geológicos en los cuales se mueve el agua, o por decaimiento radiactivo de rocas a profundidad. Los isótopos que ocurren naturalmente tienen ciertas propiedades iónicas