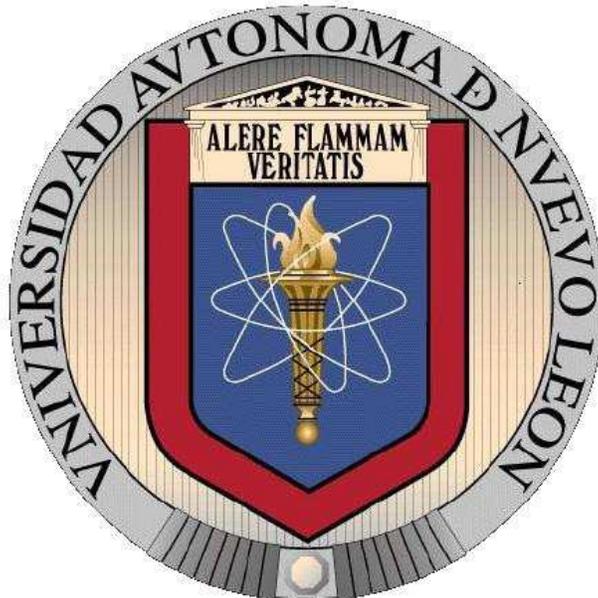


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA REGIÓN AGUA NUEVA,
ESTADO DE COAHUILA**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

PRESENTA

BRÍGIDO SANTIAGO CARRASCO

LINARES, NUEVO LEÓN

MAYO DE 2012



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



LA TESIS

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA REGIÓN AGUA NUEVA,
ESTADO DE COAHUILA**

ELABORADA POR

BRÍGIDO SANTIAGO CARRASCO

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.

Dr. Héctor De León Gómez
DIRECTOR DE TITULACIÓN

LINARES, NUEVO LEÓN

MAYO DE 2012



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



LA TESIS

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA REGIÓN AGUA NUEVA,
ESTADO DE COAHUILA**

ELABORADA POR

BRÍGIDO SANTIAGO CARRASCO

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.

COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS

Dr. Héctor De León Gómez
DIRECTOR DE TITULACIÓN

Dr. Francisco Medina Barrera
Co-DIRECTOR DE TITULACIÓN

Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández
Co-DIRECTOR DE TITULACIÓN

LINARES, NUEVO LEÓN

MAYO DE 2012

Por este conducto declaro bajo protesta, que este trabajo lo he desarrollado personalmente, con el apoyo del Comité de Titulación. Toda información utilizada de la literatura ha sido citada debidamente. El uso de la información utilizada es avalado por el documento oficial adjunto.

Ing. Brígido Santiago Carrasco

Linares, Nuevo León, Mayo de 2012

DEDICATORIA

A la Memoria de mis abuelos+ y padres+, que siempre forjaron en mí, la esperanza de ser un profesional.

A mi esposa por ser la compañera más sincera y amorosa.

A mis hijos por su apoyo y comprensión.

A mi hermano y hermanas mi agradecimiento sincero por su apoyo y confianza

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios por concederme el don de vivir y permitir realizar este proyecto con alegría y sabiduría.

Al Servicio Geológico Mexicano por el decidido apoyo institucional, para la superación profesional de su personal.

Al Dr. Rafael Alexandri Rionda por ser un entusiasta promotor del mejoramiento académico y facilitar la culminación de este trabajo.

Al Ing. Francisco Escandón Valle, por la firme convicción y decisión de apoyar este proyecto.

Al comité de becas del SGM, por guiar y promover el mejoramiento del personal de la institución y sobre todo por su paciencia.

A la Facultad de Ciencias de la Tierra, de la UANL., a todos los profesores y administrativos, que hicieron agradable mi instancia, durante mi etapa de formación.

Al Dr. Héctor de León Gómez, por motivarme a no decaer en el entusiasmo y sobreponerme a las dificultades, y por aceptar con gran determinación dirigir el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Francisco Medina Barrera, por ser un firme aliado y asesor de esta tesis.

Al Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández, por la comprensión, paciencia y optimismo, para llevar a cabo la asesoría en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Fernando Velasco Tapia, por su apoyo incondicional en los acuerdos tratados con el Servicio Geológico Mexicano para la fase de titulación y en la asesoría de la interpretación de la Caracterización Hidrogeoquímica del tipo de aguas.

Al MC. Federico Viera por sus atenciones y la ayuda en la caracterización hidrogeoquímica del tipo de aguas.

A todos los profesores que creyeron y apoyaron y contribuyeron en este proyecto de maestría: Dr. Gabriel Chávez Cabello, Dr. José Rosbel Chapa Guerrero, Cand. Dr. Tomas Cossio, Dr. Dirk Masuch Oesterreich y Dr. Ignacio Navarro de León.

Mtra. Manuelita González, que con el carácter, paciencia y visión de buena profesora de ingles, me impulsó a seguir luchando para culminar la maestría.

A mi amigo Ing. Antonio González Ramos, por sus valiosos comentarios y las facilidades que me brindó para visitar los pozos y recopilar información de las mismas.

Al M.C. Raúl Herrera Mendoza Gerente de Ingeniería Ambiental de Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA, S. A. de C. V.), por las facilidades brindadas en el desarrollo del muestreo de agua de pozos, con apoyo de su personal Técnico y el laboratorio para los análisis fisicoquímicos.

Dr. Ma. De Lourdes V. Díaz Jiménez. Profesora - Investigadora Cinvestav - Saltillo, por la asesoría y apoyo en los análisis químicos de los minerales pesados.

A Ma. Candelaria Ortega Chagoya Profesora-Investigadora Cinvestav –Saltillo por el apoyo desinteresado en la búsqueda de alternativas para apoyar el desarrollo del muestreo.

Al Ing. Salvador I. de la Garza González por su asesoría y comentarios atinados para el desarrollo de la tesis.

Al Ing. Juan Eduardo Martínez Meza por su valiosa cooperación en la elaboración de los planos y figuras de la tesis.

A mis compañeros de generación y de trabajo, por haber permitido pasar ratos tan inolvidables, compartiendo las alegrías y sinsabores, durante el desarrollo y culminación de este proyecto.

En especial a los compañeros Ings. David Barbosa Luna+ y Alberto Montañez Castro + que por azares del destino ya no están con nosotros, y más que agradecimiento, que sea una dedicatoria en su memoria. Descansen en paz y que dios los tenga en su santa gloria.

Por último quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que de alguna forma u otra participaron, ayudaron e intervinieron, durante el proceso de mi formación académica y en la terminación de la tesis.

ÍNDICE

| Contenido | Página |
|---|---------------|
| Índice de Figuras | i |
| Índice de Tablas | v |
| Índice de Anexos | vi |
| Nomenclaturas y Abreviaturas | vii |
| Resumen | xi |
| Abstract | xiii |
| I.- INTRODUCCIÓN | 1 |
| I.1. Antecedentes | 1 |
| I.2. Localización y vías de acceso | 2 |
| I.3. Trabajos previos | 4 |
| I.4. Objetivos | 6 |
| I.5. Metas | 6 |
| I.6. Hipótesis | 6 |
| I.7. Metodología de trabajo | 6 |
| 1.7.1. Trabajo de campo | 6 |
| 1.7.2. Trabajo de gabinete | 7 |
| II.- FISIOGRAFÍA | 8 |
| II.1. Provincias fisiográficas | 8 |
| II.2. Clima | 9 |
| II.2.1. Temperaturas | 10 |
| II.2.2. Precipitación media mensual y anual | 11 |
| II.3. Hidrografía | 13 |
| III.- GEOLOGÍA | 15 |
| III.1. Geología regional | 15 |
| III.2. Estratigrafía del área de estudio | 19 |
| III.3. Geología estructural | 32 |
| III.3.1. Descripción de estructuras | 37 |
| III.3.2. Análisis de fracturas | 42 |

| | |
|---|-----|
| IV.- HIDROGEOLOGÍA | 52 |
| IV.1. Unidades hidrogeológicas | 52 |
| IV.2. Tipos de acuíferos | 53 |
| IV.3. Piezometría | 59 |
| IV.4. Metodología hidrogeológica | 62 |
| IV.5. Carta hidrogeológica | 63 |
| IV.5.1. Profundidad nivel estático | 64 |
| IV.5.2.-Niveles piezométricos | 65 |
| IV.5.3.-Evolución nivel piezométrico | 68 |
| IV.6. Zonas Potenciales hidrogeológicas | 70 |
| V.- HIDROGEOQUÍMICA | 72 |
| V.1. Muestreo y análisis del agua subterránea | 74 |
| V.2. Familias de agua | 84 |
| V.3. Calidad del agua | 88 |
| VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 91 |
| VI.1. Conclusiones | 91 |
| VI.2. Recomendaciones | 92 |
| VII.- BIBLIOGRAFÍA | 93 |
| ANEXOS | 103 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figuras | Página |
|--|---------------|
| I.1.- Plano de localización y acceso al área de estudio. | 3 |
| II.1.- Carta de provincias fisiográficas. (Raisz, E.1964). | 8 |
| II.3.-Clasificación de tipos de Climas de Köppen, de la República Mexicana modificado por García, (1998). | 9 |
| II.4.-Temperaturas máximas 2000-2009 de las estaciones Climatológicas Saltillo y Carneros (CONAGUA 2010). | 10 |
| II.5.-Temperaturas mínimas 2000-2009 de las estaciones climatológicas Saltillo y Carneros (CONAGUA, 2010). | 11 |
| II.6.- Precipitación media mensual 2000-2009 de las estaciones climatológicas. Saltillo y Carneros (CONAGUA, 2010). | 12 |
| II.7.- Precipitación media anual 2000-2009 de las estaciones climatológica Saltillo y Carneros. (CONAGUA, 2010). | 12 |
| II.8.- Regiones hidrológicas (INEGI 2011). | 14 |
| III.1.-Evolución del NE de México de acuerdo a Goldhammer, (1999). | 16 |
| III.2.-Área de estudio en el contexto de terrenos Tectonoestratigráficos de Dra. Campa- Uranga (1985). | 18 |
| III.3.-Columna estratigráfica del área de estudio (Modificada del SGM, 2007). | 19 |
| III.4.-Afloramiento de la caliza Zuloaga (Jok Cz), puerto de piñones, seaprecia fracturas rellenas de calcita, estratos de 0.40 a 0.80 m de espesor. | 21 |
| III.5.-Lutitas y areniscas de la formación La Casita (Jkt Lu-Ar), localizada al este del puerto de piñones. | 22 |
| III.6.-Rocas calcáreo- arcillosas de la formación Taraises (Kbeh CzLu), mostrando grande pliegues tipo chevrón localidad en la Sierra El Cobre. | 23 |
| III.7.-Caliza fosilífera de la formación Cupido (Khap Cz), localidad Cañada la piñolienta. | 25 |

| | |
|--|----|
| III.8.-Calizas y lutitas de la formación La Peña (Kap Cz- Lu), presenta alternancias de bandas de pedernal. | 26 |
| III.9.-Calizas de la formación Aurora (Ka Cz- Do) estratos gruesos de 0.80 m de espesor, con nódulos y lentes de pedernal. | 27 |
| III.10.-Calizas y lutitas de la formación Cuesta del Cura con pliegues de tipo chevrón. | 29 |
| III.11.-Alternancia de calizas y lutitas de la formación Indidura, al oeste del poblado tanque de emergencia | 30 |
| III.12.-Lutitas y areniscas de la formación Parras, afloramiento localizado al suroeste del área de estudio. | 31 |
| III.13.-Vista panorámica de las zonas de coluvión (Qhoco) y aluvión (Qhoal), al fondo poblado de Agua Nueva, Coahuila. | 32 |
| III.14.-Paleolementos que influenciaron el desarrollo de la Curvatura de Monterrey - (Modificado de Chavez Cabello et al., 2005). | 33 |
| III.15.-Área de estudio en el contexto geológico de la Curvatura de Monterrey. Tomado de Padilla y Sánchez, 1985. | 34 |
| III.16.-Mapa estructural de la curvatura de Monterrey mostrando: principales estructuras presentes, regiones de diferentes estilos de plegamiento, direcciones locales (flechas negras) y la dirección regional del deslizamiento por décollement (flecha en blanco). Padilla y Sánche 1982. | 36 |
| III.17.-Vista transversal del anticlinal recumbente de Santa Fe. | 38 |
| III.18.-Cabalgadura Zapaliname, ubicado al noreste del área, su rumbo de NE 50° SW, con una vergencia hacia el noroeste. Contacto tectónico frontal de las formaciones Cupido y Taraises con la formación Parras. | 40 |
| III.19.-Contacto tectónico caliza Zuloaga (Jurásico) y lutita Parras (Cretácico). Cabalgadura Las Caleras rumbo N 75° E 33° SE. | 41 |
| III.20.-Contacto tectónico entre las formaciones Taraises - Parras y Casita, Zuloaga – Parras. Cabalgadura La Chorrera, con un Klippe en su parte frontal. | 42 |
| III.21.-Fracturas de la formación Zuloaga, graficadas con la roseta y la red de Schmidt. | 44 |

| | |
|--|----|
| III.22.- En la imagen (A) se muestra las fracturas “ac” y “bc”. En la (B) son fracturas “ac” y “bc”, y fracturas hk0 con ángulo agudo con respecto al eje “b”. Rumbo de capa definido por la cabeza de martillo. | 45 |
| III.23.- Redes de la formación La Casita. Flanco sur del anticlinal del Molano. | 45 |
| III.24.- Gráfica de las Redes de la formación Cupido, localidad al sur del poblado de Jagüey de Ferniza. | 46 |
| III.25.- Fracturas “ac” y “bc” afectando la caliza Cupido, mango de la pica indica rumbo de capa. | 46 |
| III.26.-Redes de la formación La Peña, flanco norte del anticlinal recumbente de Santa Fe. | 47 |
| III.27.-Red de Schmidt que muestran los diferentes tipos de fractura de tensión y cizalla de la formación Aurora. Así mismo, se muestra la roseta correspondiente de los rumbos de los echados de las fracturas. | 48 |
| III.28.-Caliza de la formación Aurora, se muestra las fracturas de tensión tipo “ac” y “bc”, y las fracturas de cizalla tipo hk0 con ángulo agudo al eje “a”. El mango del martillo indica el rumbo del echado. | 48 |
| III.29.-Gráfica de las redes correspondientes a la formación Cuesta del Cura. | 49 |
| III.30.-Gráfica de la red de Schmidt y roseta correspondiente a las fracturas de la formación Indidura. | 50 |
| III.31.-Roseta y red de Schmidt mostrando características de las fracturas de la formación Parras. | 50 |
| IV.1.-Formaciones geológicas frente al agua (González de Vallejo, et al., 2002). | 53 |
| IV.2.-Tipos de acuíferos y niveles piezométricos (González de Vallejo, et al., 2002). | 54 |
| IV.3.-Tipos de acuíferos según su textura. (González de Vallejo, et al., 2002). | 56 |
| IV.4.-Pozos perforados en el valle, en acuífero de grietas (Fm. Parras), ubicados cercanos al límite externo poniente del área de estudio. Tomado de Leser y Asociados S.A. de C.V. (2004). | 57 |
| IV.5.-Columna de un pozo perforado en acuífero de grietas, con profundidades de 550 m. Localizado al oriente del área de estudio. (AGSAL, 2010). | 58 |
| IV.6.-Plano de localización de los pozos existentes en el área de estudio. | 61 |

| | |
|--|----|
| IV.7.-Medición del nivel estático y dinámico en el pozo Santa Fe 3. Con la sonda sonora. | 62 |
| IV.8.-Medición del gasto con la escuadra en el pozo Jagüey 2, apoyado por personal de Aguas de Saltillo (AGSAL). | 62 |
| IV.9.-Localización de pozos AG-20 y tanque de emergencia II. | 63 |
| V.1.-Efectos y manifestaciones de flujo controlado por gravedad en una cuenca regional no confinada (Tomada de Navarro de León, 2005; modificada de Tóth, 1999). | 73 |
| V.2.-Muestreo del agua, del pozo Santa Fe 3, personal de COMIMSA. | 75 |
| V.3.-Preparación de las muestras para los análisis geoquímicos. Laboratorio de geoquímica COMIMSA S.A. de C.V. | 75 |
| V.4.-Plano de configuración de los contenidos de sólidos totales disueltos para el año 2010. | 81 |
| V.5.-Plano de configuración de los valores de conductividad eléctrica. | 83 |
| V.6.-Diagrama de Piper para las aguas subterráneas de los pozos muestreados. | 86 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tablas | Página |
|--|---------------|
| IV.1.-Parámetros hidrogeológicos de los pozos localizado en la zona de caliza al oriente del área de estudio AGSAL, (2009). | 60 |
| IV.2.-Profundidad del nivel estático (NE) de 1998 al 2009. | 65 |
| IV.3.-Niveles piezométricos 2008. | 66 |
| IV.4.-Niveles piezométricos 2009. | 67 |
| IV.5.-Evolución del nivel piezométrico general 1998-2009. | 69 |
| V.1.-Método empleado en el laboratorio para el análisis hidrogeoquímico de la muestras. | 76 |
| V.2.-Resultados del análisis fisicoquímico del muestreo. | 77 |
| V.3.-Calidad del agua con base a la concentración de sólidos totales disueltos. | 79 |
| V.4.-Resultados del análisis bacteriológico y minerales pesados. | 82 |
| V.5.-Resultados del análisis químico y balance iónico del muestreo. | 85 |
| V.6.-Límites máximos permisibles (LMP) establecidos por diversos organismos para la calidad del agua. (Tomado y modificado de Rodríguez, Rodríguez J. S. 2011) | 90 |

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Carta Geológica-Estructural de la región de Agua Nueva, Estado de Coahuila.

Anexo 2 Carta Hidrogeológica 2008, de la región Agua Nueva, Estado de Coahuila.

Anexo 3 Carta Hidrogeológica 2009, de la región Agua Nueva, Estado de Coahuila.

Anexo 4 Carta de Familias de agua 2004 de la región Agua Nueva, Estado de Coahuila.

Anexo 5 Carta de Familias de agua 2010 de la región Agua Nueva, Estado de Coahuila.

NOMENCLATURAS Y ABREVIATURAS

| | |
|------------------|---|
| AGSAL | Aguas de Saltillo. |
| °C | Grados centígrados. |
| C.V. | Capital Variable |
| Ca ⁺² | Ión Calcio |
| CE. | Conductividad Eléctrica. |
| CEAS | Comisión Estatal del agua. |
| Chih. | Chihuahua. |
| Cia. | Compañía |
| CINVESTAV | Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. |
| Cl | Ión Cloro. |
| Coah. | Coahuila |
| COMIMSA | Corporación Mexicana de Investigación de Materiales S.A. de C.V. |
| CNA | Comisión Nacional del Agua |
| CONAGUA | Comisión Nacional del Agua |
| COTAS | Comité técnico del Agua Subterránea |
| CRM | Consejo de Recursos Minerales |
| E | Este. |
| EUA | Estados Unidos de América |

| | |
|------------------|--|
| Fac. | Facultad. |
| Fidagua | Fideicomiso del Agua |
| GM | Golfo de México |
| GPS | Geoposicionador satelital. |
| HCO ₃ | Bicarbonato |
| INEGI | Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática. |
| K | Potasio. |
| Km. | Kilómetro |
| LMP | Límite máximo permisible. |
| Lps | Litro por segundo |
| m | Metros. |
| Ma. | Millones de Años. |
| Máx. | Máxima. |
| meq. | Miliequivalente. |
| Mg+2 | Ión Magnesio. |
| mg/l | Miligramos por Litro. |
| mm | Milímetros. |
| Mmho/cm | Micromhos por centímetros. |
| msnm | Metros sobre el nivel del mar |
| N | Norte. |
| Na | Sodio. |
| N.D. | Nivel Dinámico. |

| | |
|-------------------|-------------------------------------|
| N.E. | Nivel Estático. |
| NE | Noreste. |
| N.F. | Nivel Freático. |
| NOM | Norma. |
| No. | Número. |
| NO ₃ - | Nitrógeno. |
| N.L. | Nuevo León. |
| NNE | Nornoreste |
| NW | Noroeste. |
| pH | Potencial de Hidrógeno. |
| PULG. | Pulgada |
| Q | Gasto |
| S.A. | Sociedad Anónima |
| SE | Sureste. |
| SGM | Servicio Geológico Mexicano. |
| SMO | Sierra Madre Oriental. |
| S.L.P. | San Luis Potosí |
| SO ₄ | Sulfato. |
| STD | Sólidos Totales Disueltos |
| SW | Suroeste. |
| Tamps. | Tamaulipas. |
| Temp. | Temperatura. |
| UANL | Universidad Autónoma de Nuevo León. |

| | |
|------|---------------------------------|
| UNAM | Universidad Autónoma de México. |
| USA | Estados Unidos de América |
| W | Oeste. |
| WHO | World Health Organization |
| Zac. | Zacatecas |

RESUMEN

La ciudad de Saltillo capital del Estado de Coahuila, ha crecido a un ritmo acelerado, ocasionando así, una gran demanda del agua; por lo que existe la problemática de localizar zonas de acuíferos potenciales. El presente estudio basado en esta problemática, se planteo los siguientes objetivos: delimitar los diferentes sistemas de acuíferos en rocas jurásicas y cretácicas, realizar un análisis estructural del área, diseñar un modelo conceptual, para poder así definir posibles medios acuíferos y la probabilidad de explotación del agua para fines domésticos, municipales e industriales.

Para alcanzar el objetivo se basó en la elaboración de la cartografía geológica y estructural del área, elaboración de una carta hidrogeológica delimitando los sistemas acuíferos en función de los parámetros hidráulicos de las unidades hidroestratigráficas del Jurásico-Cretácico, para potenciales aprovechamientos, así como las direcciones de flujo del agua subterránea, el muestreo para la calidad y tipo de aguas e identificar sitios potenciales para fines de perforación.

El área de estudio se localiza, en la porción sur-oriental del estado de Coahuila, a 25 Km. al sureste de la Ciudad de Saltillo, Coah.

EL contexto geológico regional del noreste de México está ligado a los elementos paleogeográficos formados antes del Tríasico, relacionados con la apertura del Golfo de México. Estas estructuras controlaron la sedimentación en el Mesozoico y actuaron como barreras durante el esfuerzo máximo de la Orogenia Laramide, provocando que las rocas sedimentarias mesozoicas fueran plegadas y cabalgadas, dejando como testigo a las estructuras de la Curvatura de Monterrey y el sector Transverso. La geología local se manifiesta por rocas sedimentarias con edades que van del Jurásico al reciente, con una deformación dúctil - frágil, que se manifiesta en un conjunto de pliegues anticlinales y sinclinales recumbentes y en abanico, con unos ejes orientados en su mayoría en la dirección NW-SE y NE-SW. Así mismo se presentan una serie de cabalgaduras y fallas con rumbos variables que van de NE-SW, NW-SE y E-W. Se clasificaron 5 tipos diferentes de fracturas de cizalla y de tensión. La familia más predominante de fracturas, son las que

están orientadas con rumbos de NW-SE y como segunda en importancia las orientadas al NE-SW.

El acuífero por su textura y litología se subdividió en acuífero en medio fracturado (acuífero de grietas) entrampado en la lutita de la formación Parras, (zona del Valle) y en el acuífero de grietas y cárstico, confinado en las formaciones Zuloaga, Cupido y Aurora (zona oriente). El acuífero se recarga de la parte alta de la Sierra Madre, donde la lluvia aprovecha para su circulación, las fracturas, fallas, zonas de disolución y estructuras de anticlinales, su descarga lo realiza en un porcentaje en la zona del Valle.

Se analizó la evolución del nivel estático de 1998 a 2009. En zona oriente, registró un abatimiento máximo de 27.22 m., y un mínimo de 5.77 m. En general se observaron abatimientos considerables en todos los pozos para esta zona. En la zona del valle, el abatimiento máximo es de 36.65 m., y el mínimo de 1.01 m. El flujo subterráneo se manifiesta en dos direcciones, la primera de sur a norte y la segunda de este a oeste.

Se muestrearon 8 pozos de agua, distribuidos en una forma aleatoria dentro del área, cumpliendo con las normas establecidas para el muestreo. Los tipos de familia de agua encontrados son: Bicarbonatadas-Cálcicas-Magnésicas, Sódicas-Bicarbonatadas, Bicarbonatadas-Magnésicas-Cálcicas-Sódicas y Sulfatadas. En promedio el agua subterránea registra: pH de 7.5 Temperatura de 21.45 °C, Sólidos totales disueltos 476 mg/l, Sólidos disueltos 437.87 mg/l, Cl⁻ de 207.8 mg/l, SO₄ de 47.27 mg/l y NO₃ de 6.88 mg/l. Todos por debajo de los límites máximos permisibles.

Con base a las características litológicas, estructurales y el comportamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico del acuífero, se logró definir 3 zonas potenciales hidrogeológicas en la parte oriente y sureste del área de estudio, denominadas: Santa Fe, Los Ángeles y Molano. Se propone una profundidad de perforación de 550 m.

ABSTRACT

The City of Saltillo Coahuila state capital, has grown at an accelerated rate, causing a great demand for water, this situation led to the problematic of locating zones for potential groundwater exploitation. The present study is based on this problem, and has the following goals: a) definition of the different aquifer systems in Jurassic and Cretaceous rocks, b) the structural analysis of the area, c) development of a conceptual mode, d) the identification of possible aquifers, and e) the possibility of the water exploitation for domestic, municipal and industrial purposes.

To reach these goals this work was made upon the development of the geological and structural maps of the area, including the hydrogeological aquifer systems based on hydraulic parameters of the potential hydrostratigraphic of the Jurassic-Cretaceous units, as well as the flow directions, the groundwater quality and classification. All these parameters are considered for the identification of potential sites for prospection.

The study area is located in the southeastern portion of the state of Coahuila, 25 km southeast of the city of Saltillo.

The regional geological context of the Northeastern of Mexico is linked to the paleogeographic elements formed before Triassic times, in relationship to the opening of the Gulf of Mexico. These structures controlled the sedimentation during the Mesozoic and acted as barriers for the maximum stress regime of the Laramide Orogeny, resulting in Mesozoic sedimentary rocks that were later folded and thrust, leaving as a witness to the structures of the Curvature of Monterrey and Transverse sector. The local geology is manifested by sedimentary rocks with ages ranging From Jurassic to Recent, deformed under ductile – brittle conditions, which is manifested in a series of anticlines and synclines, which axes are mostly oriented NW-SE and NE-SW. Also NE-SW, NW-SE and EW thrust and faults are present. Five different types of shear and tensional fracture were determined.. The prevalent fractures family are those NW-SE oriented and as second in importance are oriented NE-SW.

The aquifer for its texture and lithology was subdivided in: a) fractured one (aquifer cracks) trapped in the Parras Shale Formation (zone of the Valley), and b) along fractures and karstic structures in limestones of the Zuloaga, Cupido and Aurora formations. The aquifer is recharged at the higher areas of the Sierra Madre, where the water infiltrates along fractures, faults, dissolution areas and anticlinal structures. The water discharge takes place in the valley.

The evolution of the static level from 1998 to 2009 was analyzed. In the eastern zone, a maximum lowering of water level of 27.22 m and a minimum of 5.77 m. was registered. All wells in this area showed a considerable descent in the water table. In the Valley zone, the maximum descent of water level is 36.65 m and the minimum of 1.01 m. Groundwater flow occurs in two directions, first from South to North and the second from East to West.

Eight randomly distributed water wells were sampled, following the Mexican official standards established for sampling. It was possible to determine water family types: a) calcium-magnesium bicarbonate, b) sodium-bicarbonate, c) magnesium-calcium bicarbonate, and d) sodium and sulfate. The groundwater shows in average following parameter: pH 7.5 Temperature 21.45 ° C, total dissolved solids 476 mg / l, dissolved solids 437.87 mg / l, Cl-207.8 mg / l, SO₄ of 47.27 mg / l NO₃ of 6.88 mg / l. All these data are below the maximum permissible limits of the Mexican norms.

Based on the lithological and structural properties and the hydrogeological and hydrogeochemical characteristics of the aquifer, it was possible to define 3 hydrogeological potential zones in the eastern and southeastern areas of the study area, namely: Santa Fe, Los Angeles and Molano. A drilling depth of 550 m is proposed.

I.- INTRODUCCIÓN

I.1.- Antecedentes

Hoy día, unos de los principales problemas de todas las ciudades del mundo es el ritmo acelerado del incremento de la población, y con ello el aumento de la demanda de diversos recursos, entre estos el agua, elemento más importante para el sustento de la vida. A nivel nacional el 75% de la totalidad del agua subterránea disponible se destina a usos agrícolas y el 14% se dedica al consumo humano (CEAS, 2010).

El Estado de Coahuila a nivel nacional es el tercer estado más grande de la República Mexicana, pero también es el segundo o a veces el primero donde la precipitación pluvial es menor por año. Su capital la Ciudad de Saltillo, en los últimos años ha tenido un crecimiento poblacional e industrial acelerado. Tal es el caso de la zona industrial del Cañón del Derramadero, ubicado al suroeste de Saltillo. El crecimiento de esta zona, ha provocado una mayor demanda del agua, donde desde hace 12 años se ha observado un abatimiento en el nivel del agua subterránea del orden de más de 27 m y una disminución del caudal de extracción. Este hecho provocó que los usuarios del agua subterránea se organizaran para formar el Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS) de la Unidad Hidrogeológica del Cañón del Derramadero, y solicitar al Comisión Nacional del Agua (CNA) apoyo para la evaluación del acuífero y su disponibilidad, cuya licitación lo obtuvo la Cía. Lesser y Asociados, S. A. de C. V. mediante el contrato GAS-007-PRO04 (Lesser y Asociados. 2004).

El área de estudio se ubica al este de la unidad hidrogeológica del Cañón del Derramadero, y abarca parte de la Sierra Madre Oriental al este y de una zona baja al poniente formada por el Valle de Agua Nueva. Varios pozos que abastecen a Saltillo están localizados dentro del área de estudio, 13 de ellos están operados por la Cía. Aguas de Saltillo (AGSAL), el resto de los 5 pozos activos son propiedad de particulares. En total se explotan 87 pozos para generar un gasto de 2,826 l/s, con una demanda de 3297 l/s para Saltillo, lo que provoca un déficit de 471 l/s (CEAS, 2010).

El incremento en la demanda del agua, tanto doméstico como industrial, genera también un incremento en las aguas residuales, que generalmente están contaminadas con compuestos químicos, orgánicos e inorgánicos, tema que no se va tratar en este estudio.

Por lo tanto la problemática a resolver es la localización de los grandes acuíferos en las rocas del Jurásico y Cretácico a través de este estudio.

I.2.- Localización y vías de acceso

El área de estudio se localiza en la porción noreste de la carta Agua Nueva G14-C43 que se ubica en la porción sur-oriental del estado de Coahuila, en el municipio de Saltillo, Coahuila. Geográficamente el área se encuentra limitada por las coordenadas $25^{\circ} 08'$ y $25^{\circ} 15'$ de latitud norte, y los meridianos $101^{\circ} 00'$ y $101^{\circ} 10' 30''$ de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 230.39 km^2 . El acceso al área de estudio se realiza por la carretera federal No. 54, tramo Saltillo-Concepción del Oro, con un recorrido de 25 Km, hasta llegar al área, esta vía cruza a la carta en su sector occidental y de ella se desprenden otras vías alternas como carretera y camino de terracería, que dan acceso a otros sectores del área de estudio (Figura I.1).

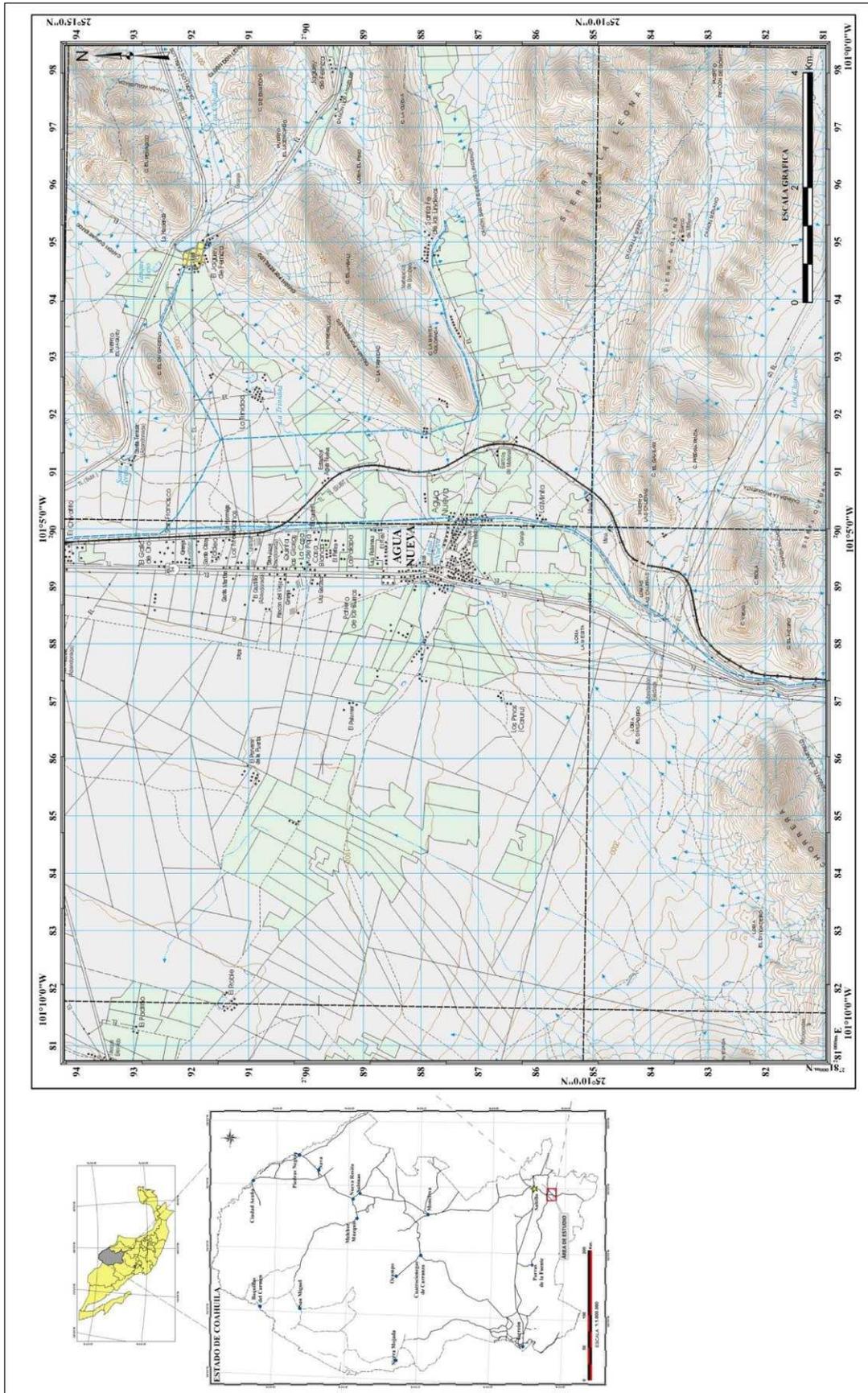


Figura. I.1 Plano de localización y acceso al área de estudio G14-C43

I.3.- Trabajos previos

Se recopiló la información de trabajos previos relacionados con la geología e hidrogeología del área de estudio, visitando a las oficinas e instituciones siguientes: Gerencia Estatal de la CNA en la ciudad de Saltillo, Coah. Comisión Estatal del Agua Potable de Saltillo, Coah.(CEAS), Agua de Saltillo (AGSAL). INEGI, El Servicio Geológico Mexicano (SGM) e Instituciones como la UNAM.

De manera regional y local se han realizado varios estudios de geología, tectónica, yacimientos minerales e hidrogeología por diversos autores.

Alfonso, Zwanzinger, J. (1979). Establece con claridad la distribución y características de un elemento sedimentológico del Cretácico Inferior que denominó Complejo Arrecifal Cupido, que separa 2 áreas sedimentarias definidas como Plataforma y Mar Abierto.

Bufete Geológico y Construcciones S, A. de C.V. 1983-1984. Realizó un estudio geohidrólogo preliminar, zona Derramadero, que su objetivo fue la de determinar la carga del acuífero, definir las condiciones de explotación en que se encuentra el mismo y el volumen de agua aprovechable sin inducir a efectos perjudiciales.

De Cserna (1956). Realiza la síntesis estratigráfica y paleogeográfica en su estudio sobre la Sierra Madre Oriental entre Monterrey y Torreón.

Eguiluz de Antuñano et al., (2000). Establece la extensión de la Sierra Madre Oriental y describe los estilos estructurales que constituye la zona frontal de esta provincia geológica

Estudios y proyectos de Agua y Tierra Rubriselva, S.A. de C.V. para CNA (1998). Se estableció una red de monitoreo piezométrico en 6 valles del estado de Coahuila, en las cuales está el Cañón del Derramadero.

Imlay (1936). En los estudios regionales sobre la Sierra de Parras y sobre la extremidad occidental de la Sierra de Mimbres, define de manera formal una serie de términos de la estratigrafía mexicana.

Lesser y Asociados, S.A. de C. V. (2004). Realizó un Estudio Geohidrológico del área del Cañón del Derramadero, con el objeto de actualizar el censo de captación de agua subterránea, establecer el modelo conceptual del funcionamiento del acuífero y laborar un balance del agua subterránea.

Malcolm Pirinie, Inc (1994). Realizó para el Fideicomiso Fidagua de la Ciudad de Saltillo, Coah. Un estudio de isotopos para las Aguas Subterráneas de la Ciudad de Satillo, se enfocó de identificar las áreas de recarga de los acuíferos y evaluar la conexión hidráulica entre los acuíferos regionales que se explotan para el abastecimiento de agua a la ciudad de Saltillo. Incluye a los pozos de Agua Nueva.

Murray y Weidie (1967) determinan la estratigrafía del grupo Difunta subdividiéndolo en siete formaciones: Cerro del Pueblo, Cerro Huerta, Cañón del Tule, Las Imágenes, Cerro Grande, Las Encinas y Rancho Nuevo.

Padilla y Sánchez (1985). Realiza una síntesis de la geología y estratigrafía de la Curvatura de Monterrey, dividió y describió en 5 grandes áreas a los pliegues de la Curvatura de Monterrey y menciona que la Orogenia Laramide fue la Causante de los rasgos estructurales de la Curvatura.

Quintero y Aranda (1985). Realizan un estudio estructural de los anticlinorios de Parras y Arteaga y encontraron que entre estos existe el receso de Agua Nueva e interpretaron la existencia de dos cobijaduras mayores superpuestas entre si en esta región, denominadas cobijadura de Arteaga y cobijadura de Parras.

Santiago et al., (1999). Realizaron la Cartografía Geológica Minera y Geoquímica de la Carta Monterrey G14-7 Escala 1:250,000. En síntesis el estudio se enfocó al reconocimiento y descripción de: geología, yacimientos minerales y el muestreo petrográfico, mineralógico y geoquímico.

Tardy (1972,1973) Realiza la distinción entre la serie Parrense y la Coahuilense, y distinguió varias fases de deformación en el sector de Parras.

I.4.- Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo principal la delimitación de los diferentes sistemas de acuíferos, ubicados en rocas cretácicas y jurásicas, la definición de un modelo conceptual y un análisis estructural del área, para poder así definir posibles medios acuíferos y la probabilidad de explotación del agua para fines domésticos, municipales e industriales.

I.5.- Metas

1. Cartografía geológica y estructural del sector oriente de la hoja Agua Nueva G14C43 en escala 1:50,000
2. Carta hidrogeológica delimitando los sistemas acuíferos en función de los parámetros hidráulicos de las unidades hidroestratigráficas del Jurásico-Cretácico para potenciales aprovechamientos, así como las direcciones de flujo del agua subterránea
3. Carta hidrogeoquímica de los aprovechamientos hidráulicos para conocer las características químicas de las aguas subterráneas
4. Identificar sitios potenciales hidrogeológicos para fines de perforación

I.6.- Hipótesis

Se postula la existencia de acuíferos potenciales en las secuencias carbonatadas del Jurásico-Cretácico. De ser así, surge la pregunta acerca de las características acuíferas en cantidad y calidad que presentan estas formaciones, para posible aprovechamiento.

I.7.- Metodología del trabajo

I.7.1.- Trabajo de campo

1).- La Cartografía geológica - estructural se realizó a escala 1:50,000, abarcando la porción noreste de la carta Agua Nueva. El mapeo se hizo por medio de secciones transversales a las sierras, aprovechando los arroyos y cañadas que existen en toda el área del estudio.

El mapeo incluye la toma de datos estructurales (fracturas, fallas, cabalgaduras, rumbos y echados).

2).- Localizar y documentar los aprovechamientos hidráulicos (pozos, norias, y papalotes), que existen en el área de estudio y la medición de los mismos a través de las sondas sonoras, Gps, altímetro digital y el PH-metro.

3).- Muestreo de agua de los pozos para análisis químicos se realizó con base a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y de la Organización Mundial de la Salud (WHO - 2000).

I.7.2.- Trabajo de gabinete:

- 1). Elaboración de la carta geológica-estructural
- 2). Elaboración de secciones geológicas
- 3). Elaboración de la carta hidrogeológica
- 4). Análisis de los resultados
- 5). Redacción y revisión del trabajo de tesis

II. FISIOGRAFÍA

II.1.- Provincia fisiográfica

Fisiográficamente el área de estudio se localiza en la parte oriental de las Sierras Transversas, subprovincia de la Sierra Madre Oriental (E. Raisz, 1964), (Figura II.1). Esta es una de las subprovincias más extensas de la República Mexicana, la cual, forma parte del cinturón de pliegues y cabalgaduras. Está constituida por un conjunto de rocas plegadas que conforman extensos anticlinorios cuyos ejes longitudinales normalmente tienen dirección casi E-W. Regionalmente el área de estudio se ubica al este del Anticlinorio de Parras y dentro de la provincia de la Sierra Madre Oriental (Anticlinorio de Arteaga), (De Cserna 1956). La Sierra de Parras, es un sistema de alineamientos montañosos que generalmente corresponden a pliegues anticlinales y sinclinales, cuyos ejes mantienen orientación preferencial NW-SE, y que son representados en la carta por las sierras: La Leona (máxima elevación dentro del área con 2780 m.s.n.m.), Molano, Quemada, Moreno, La Chorrera, Cerro El Gavilán y Cerro El Negro.

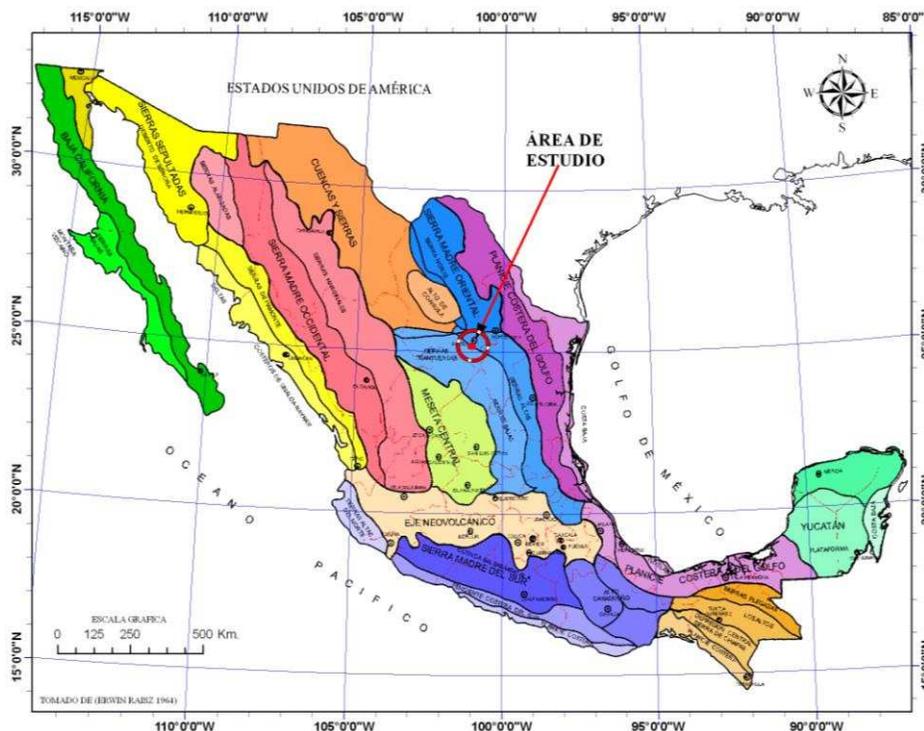


Figura II.1.- Carta de provincias fisiográficas. (E. Raisz, 1964).

II.2.- Clima

La República Mexicana cuenta con una variedad de climas, determinado por varios factores, destacando: la altitud sobre el nivel del mar, latitud geográfica, las condiciones atmosféricas y la distribución de suelos y agua. (INEGI 2010).

Basado en la clasificación de Köppen, el área de estudio en su porción noroeste, presenta un clima de tipo $BS_1 Kx'$ que corresponde a un subtipos semisecos templados y en la porción noreste y sureste presenta un clima de tipo Cx' que es templados y subhúmedos con lluvias escasas todo el año.

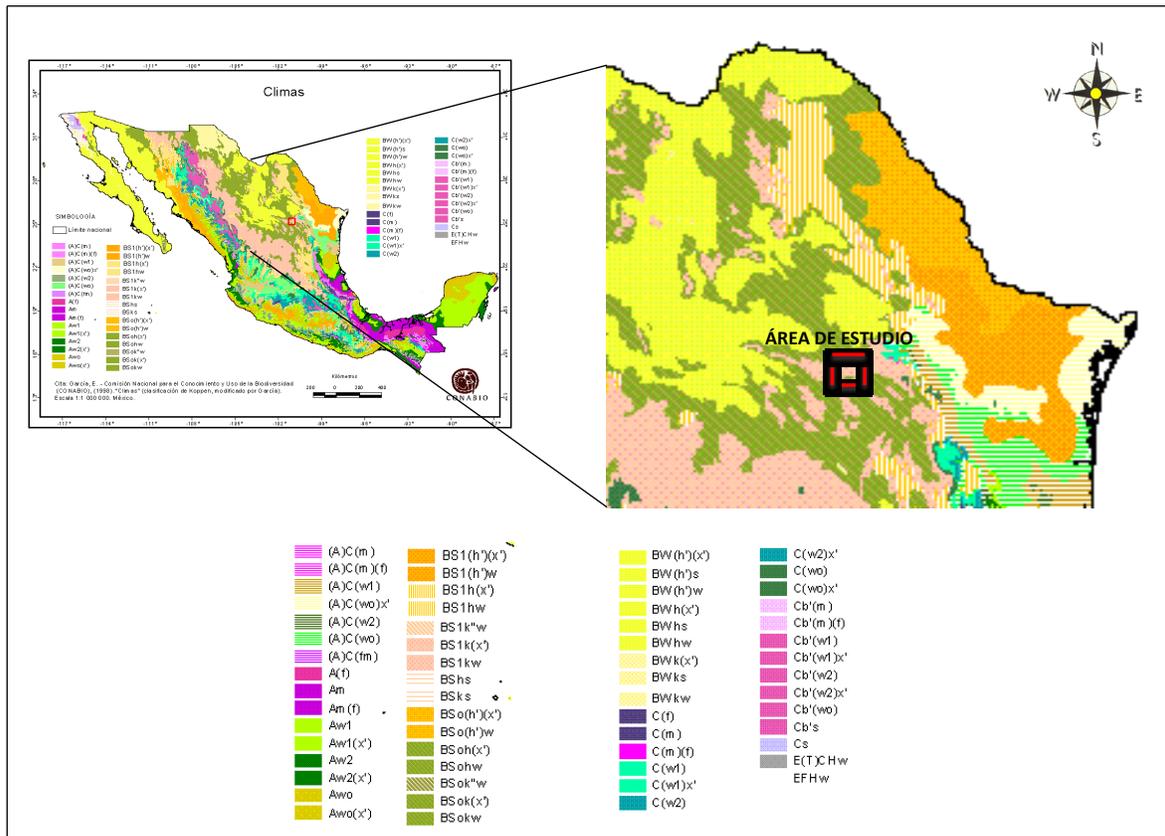


Figura II.3. Clasificación de tipos de Climas de Köppen, de la República Mexicana modificado por García, (1998).

II.2.1.- Temperaturas

A nivel regional el estado de Coahuila, presenta como meses más calurosos a Junio y Julio, con temperaturas promedio de 35°C a 37°C (2005), en contraposición, los inviernos son fríos con temperaturas mínimas promedios de 3°C a 4°C en el año (2000). Los meses de transición entre poco húmedo y seco son: Mayo y Octubre, y la estación seca corresponde al periodo de Noviembre y Abril, presentando los valores mínimos en Febrero y Marzo (CONAGUA 2010).

Con base a la información climatológica proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA 2010) en el periodo de 2000 - 2009, para las estaciones de Saltillo y Carneros, se puede observar que para la estación Saltillo el rango de temperaturas máximas oscila entre 26°C a 35°C y para la estación de Carneros, las temperaturas máximas varía entre 25°C y 34° C. En ambas estaciones la máxima temperatura se manifestó en el mes de mayo (Figura II.4.).

Para la temperatura mínima anual, la variación en el caso de la estación Saltillo, osciló entre 12°C y - 3.5°C, y en la estación Carneros, la variación fue de 9.8°C a - 5.8°C. En ambos casos la temperatura mínima se presentó en los meses de enero y diciembre (Figura II.5).

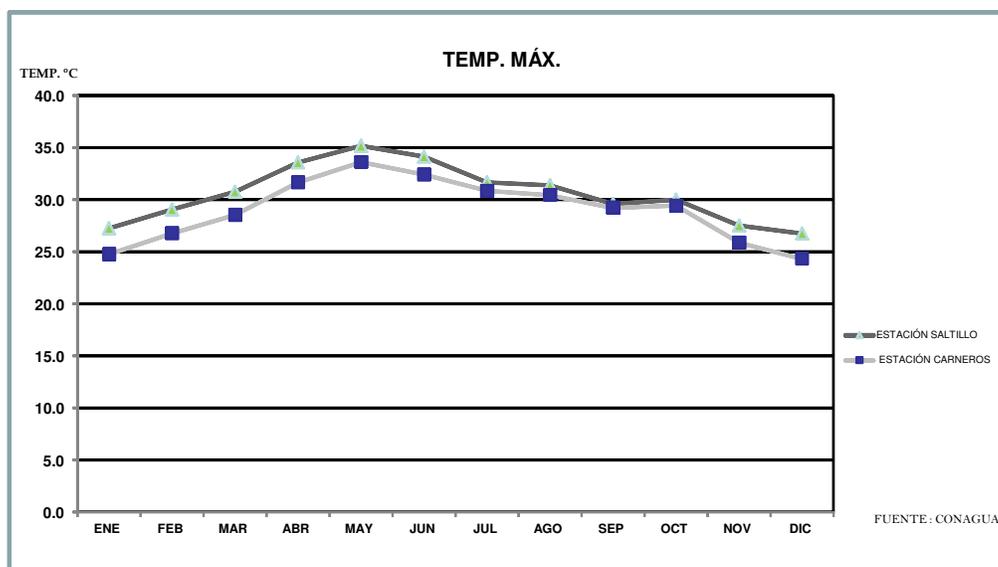


Figura II.4.- Temperaturas máxima 2000-2009 de las estaciones climatológicas Saltillo y Carneros (CONAGUA, 2010).

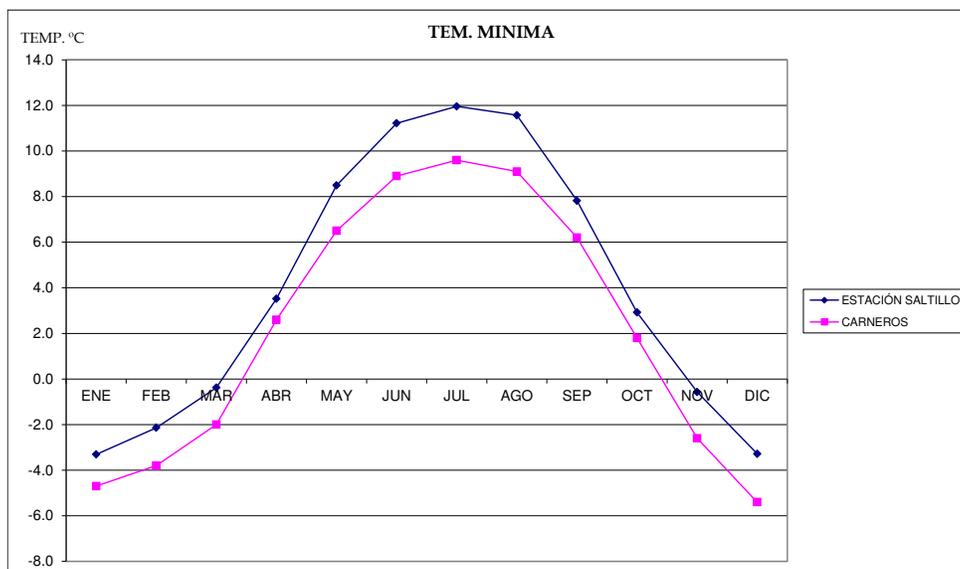


Figura II.5.- Temperaturas mínima 2000-2009 de las estaciones climatológicas Saltillo y Carneros (CONAGUA, 2010).

II.2.2.- Precipitación media mensual y anual

Coahuila es el tercer estado de la República Mexicana con menor precipitación, después de los estados de Baja California Norte y Sur y Chihuahua, su media anual es del orden de los 350 mm. Sus valores van de 150 a los 550 mm anuales, dependiendo de las regiones. Las mayores precipitaciones se dan en la zona norte del estado, y la temporada de lluvia se presenta en los meses de junio a septiembre, que es cuando se precipita el 75% de la lluvia media anual.

Con base a la información climatológica de las estaciones Saltillo y Carneros. (CONAGUA). Podemos apreciar la variación que existe de la precipitación media mensual para las dos estaciones, con respecto a los primeros cuatro meses (Enero-Abril), en la que, la estación de Saltillo alcanza valores de 10 mm hasta 13 mm y la estación Carneros, alcanza valores de 2 mm hasta 26 mm de precipitación, y todo lo contrario, para los meses siguientes empezando con mayo hasta septiembre la precipitación media mensual alcanzó valores de 30 mm hasta 102 mm, como es el caso de la estación Saltillo, y para la estación Carneros vemos que los valores oscilaron entre 16 mm hasta 40 mm como la máxima (Figura II.6).

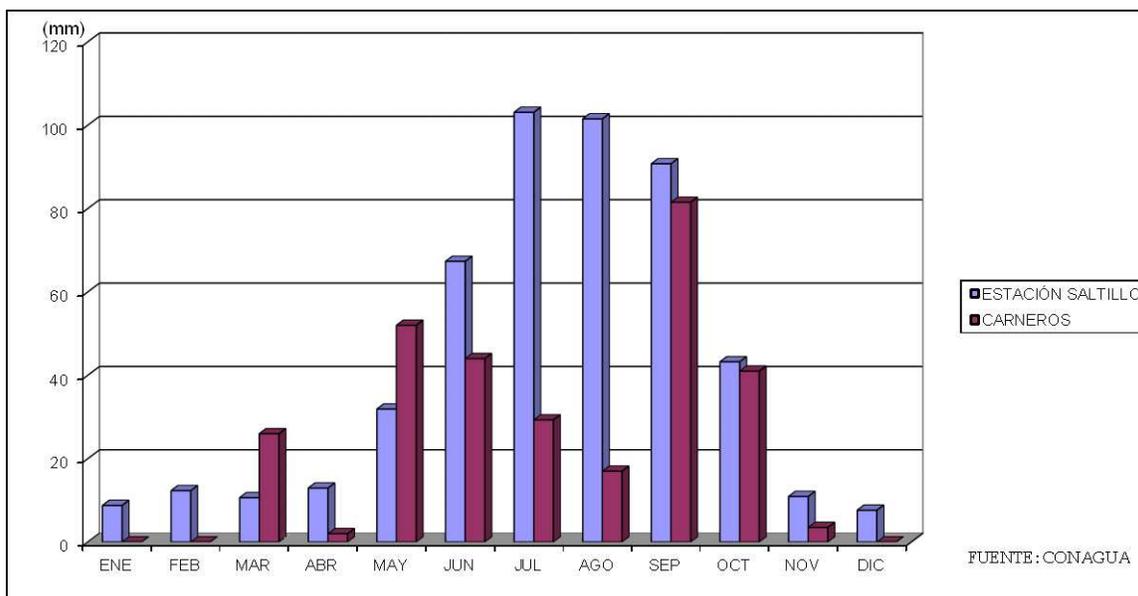


Figura II. 6.- Precipitación media mensual 2000-2009 de las estaciones climatológicas. Saltillo y Carneros (CONAGUA, 2010).

La precipitación media anual reportada en las estaciones Saltillo es de 501.08 mm y la de Carneros fue de 439.34mm. Es decir que para la zona de la estación de Saltillo se ha presentado más precipitación, teniendo un repunte sobresaliente en el año 2003, como se puede ver en la (Figura II.7).

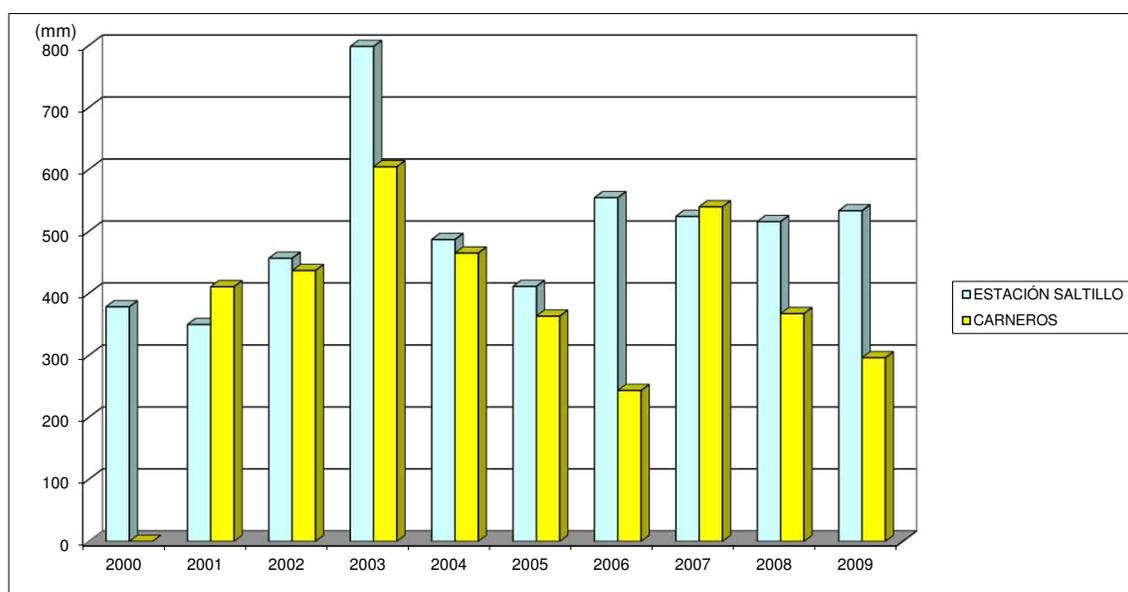


Figura II.7.- Precipitación media anual 2000-2009 de las estaciones climatológicas Saltillo y Carneros (CONAGUA, 2010).

II.3.- Hidrografía

Dentro de la superficie que cubre el área de estudio, no existen corrientes de agua de carácter perene. La red hidrológica corresponde, en su mayor parte, al tipo dendrítico y paralelo intermitente, cuya característica principal es que al llegar a los valles desaparece por la gran infiltración que presentan los suelos característicos de las regiones semidesérticas.

La superficie del área de estudio, se ubica en la región hidrológica del Río Bravo – Conchos RH-24, en la Cuenca Río Bravo - San Juan 24 B.

Las corrientes superficiales se desarrollan a través de serie de arroyos intermitentes, caracterizados por descargas torrenciales en épocas de lluvias. Estos arroyos son una fuente de recarga para el acuífero localizado en la zona del valle. La recarga se realiza por la infiltración del agua, a través de sus cauces y los depósitos aluviales (Figura II.8).

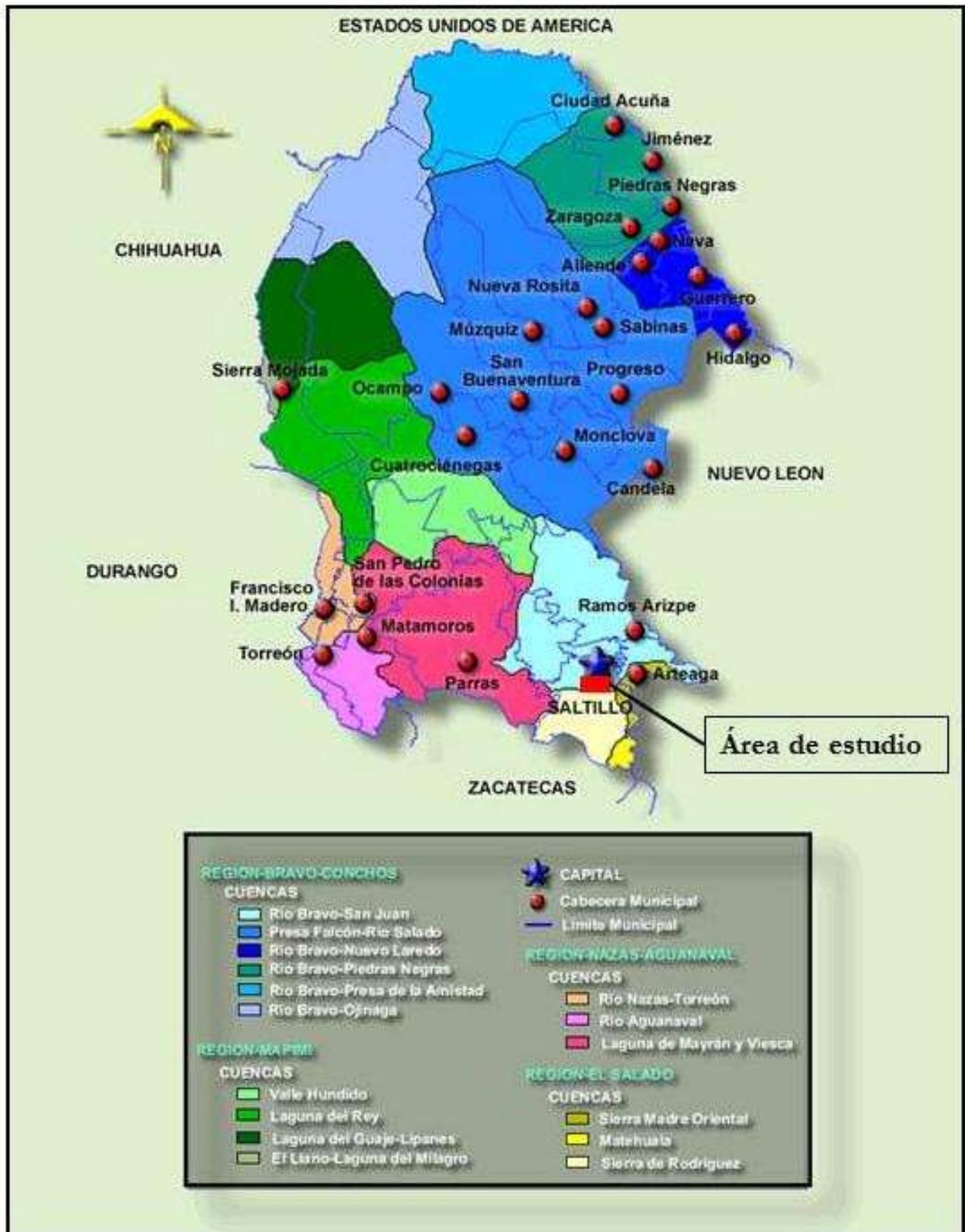


Figura II.8.- Regiones hidrológicas (INEGI 2011)

III.- GEOLOGÍA

III.1.- Geología regional

Los patrones que presenta el noreste de México así como su fisiografía están directamente ligados a un grupo de altos estructurales desarrollados antes del Triásico, relacionado con la apertura del Golfo de México que empezó a formarse durante el Triásico Tardío. Estos controlaron la depositación de sedimentos prácticamente durante todo el Mesozoico, y también están ligados a la Orogenia Laramide, que alcanzó su máxima expresión para el Eoceno, siendo el responsable de formar todas las estructuras plegadas que conforma el noreste de México, especialmente la Sierra Madre Oriental (Padilla y Sánchez 1982,1986; Goldhammer et al 1991, 1999) (Figura III.1).

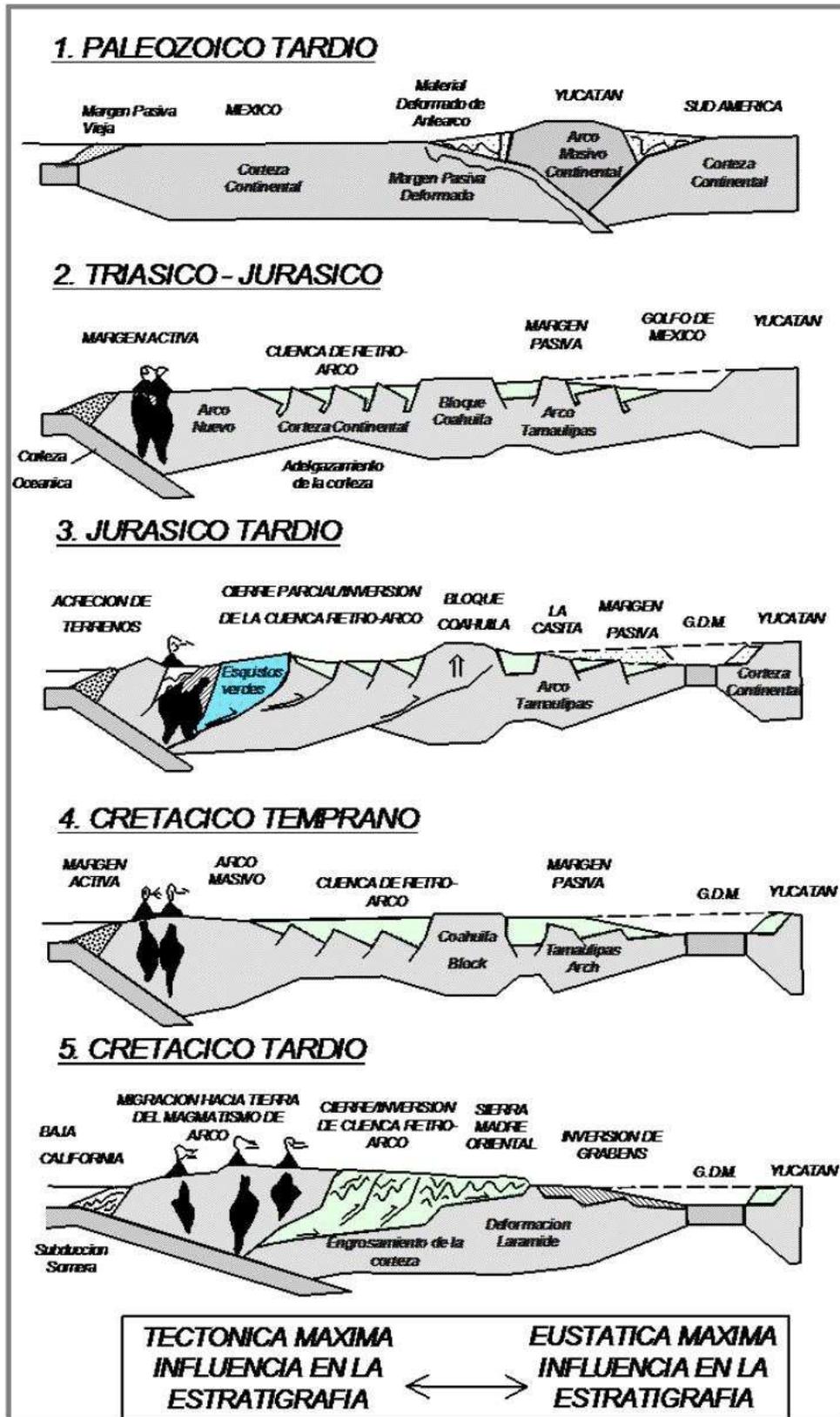


Figura III.1.- Evolución del NE de México de acuerdo a Goldhammer (1999).

Clark et al., (1982) reportaron que al igual que en EUA, el Norte de México experimentó la migración del arco magmático entre 80 y 35 Ma., desde el borde continental hacia la parte interna del continente hasta 1,000 km. Este fenómeno se ha relacionado con la disminución del ángulo de subducción de la placa Farallón, que trajo como consecuencia la somerización de la misma. Este evento ha sido considerado por Dickinson et al., (1988) y Bird, (1988, 1998, 2002) como el inicio de la Orogenia Laramide en el Norte de México.

Los estilos de deformación regional que se presentan en México por efecto de la Orogenia Larámide, son superficiales e involucra principalmente a la cubierta sedimentaria. Esto se debe que la secuencia evaporítica Jurásicas, ayudaron para provocar un estilo de deformación de despegue característico en esta zona. (Padilla y Sánchez, 1982; Meiburg et al., 1987; Eguiluz et al., 2000). Sin embargo, existen zonas donde el basamento participó activamente como es el caso de San Pedro el Gallo y Huayacocotla (Eguiluz et al., 2000).

Por otro lado, también se reactivaron estructuras más antiguas como la falla de San Marcos, y localmente el basamento fue involucrado y el esquema estructural antiguo jugó un papel importante en la orientación de las estructuras formadas durante la Orogenia Laramide (Mckee et al., 1990; Montemayor Sánchez, 2003; Chávez-Cabello et al., 2005) en Ramirez Peña C. F. (2011).

Dentro del contexto de terrenos estratotectónicos, el área de estudio se ubica en el terreno Sierra Madre casi en el límite con el terreno Coahuila (Campa-Uranga, 1985) (Figura III.2). El terreno Sierra Madre, debe su origen a la deformación de rocas mesozoicas que fueron depositadas sobre un complejo basal que consiste de un caleidoscopio de rocas que varían en litología y edad, desde gneis de edad Precámbrica, en Anticlinorio Huizachal - Peregrina, Tamps., hasta esquistos de edad preoxfordiana, que aparecen en diversas localidades como son: San Julián, Zac., Jimulco, Coah., Aramberri, N. L., Miquihuana, Tamps., y Teziutlán, Puebla (Padilla y Sanchez, 1982). La cuenca de Parras, de edad Laramídica, es caracterizada por plegamientos anticlinales estrechos y alargados, en ocasiones doblemente buzantes y orientados preferencialmente en dirección E-W y NW-SE. (Tardy,1973)

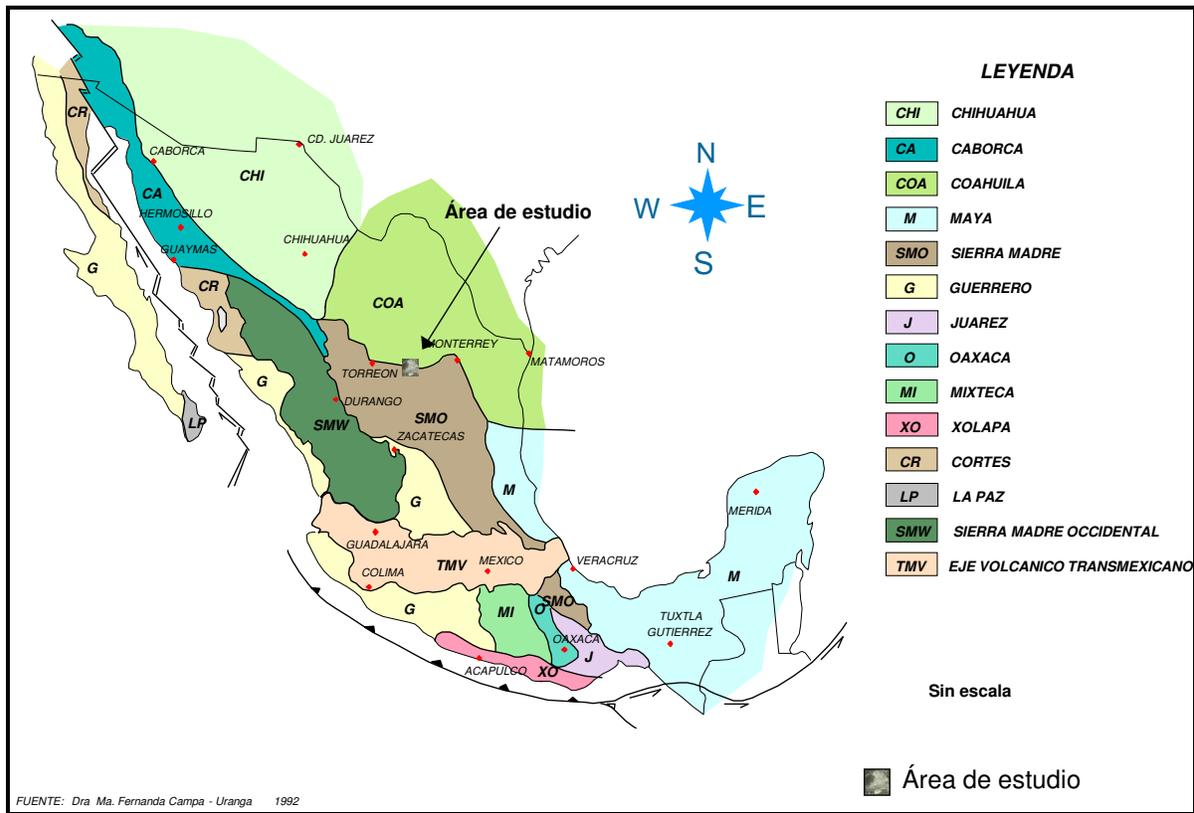


Figura III.2.- Área de estudio en el contexto de terrenos Tectonoestratigráficos, de acuerdo a Campa -Uranga (1985).

Se identificaron dos unidades tectónicas mayores en la Sierra Madre Oriental en áreas contiguas a la depresión de Agua Nueva, que corresponden a la Cobijadura de Parras y la Cobijadura de Arteaga, considerando esta última la más antigua (Quintero-Legorreta y Aranda-García, 1985).

El área de estudio se ubica en el límite de la cuenca de Parras y la Sierra Madre Oriental, abarcando en su porción oriente la secuencia Mesozoica de la Sierra Madre y en su zona poniente la secuencia de la Cuenca de Parras.

Regionalmente la secuencia estratigráfica que aflora pertenece al Mesozoico y varían en edad del Triásico Superior al Cretácico Superior, con intrusiones ígneas de edad Terciaria.

III.2.- Estratigrafía del área de estudio

La columna estratigráfica expuesta en el área de estudio, corresponde a rocas cuyas edades varían desde el Jurásico superior hasta el reciente (Figura III.3). El Jurásico está representado por las formaciones: Zuloaga y La Casita, el Cretácico Inferior por las formaciones: Taraises, Cupido, La Peña, Aurora y Cuesta del Cura, para el Cretácico Superior lo conforman las formaciones Indidura y Parras, y en el Holoceno se depositan sedimentos sueltos, (limos, arcillas, arenas, grava y bloques) (Anexo 1).

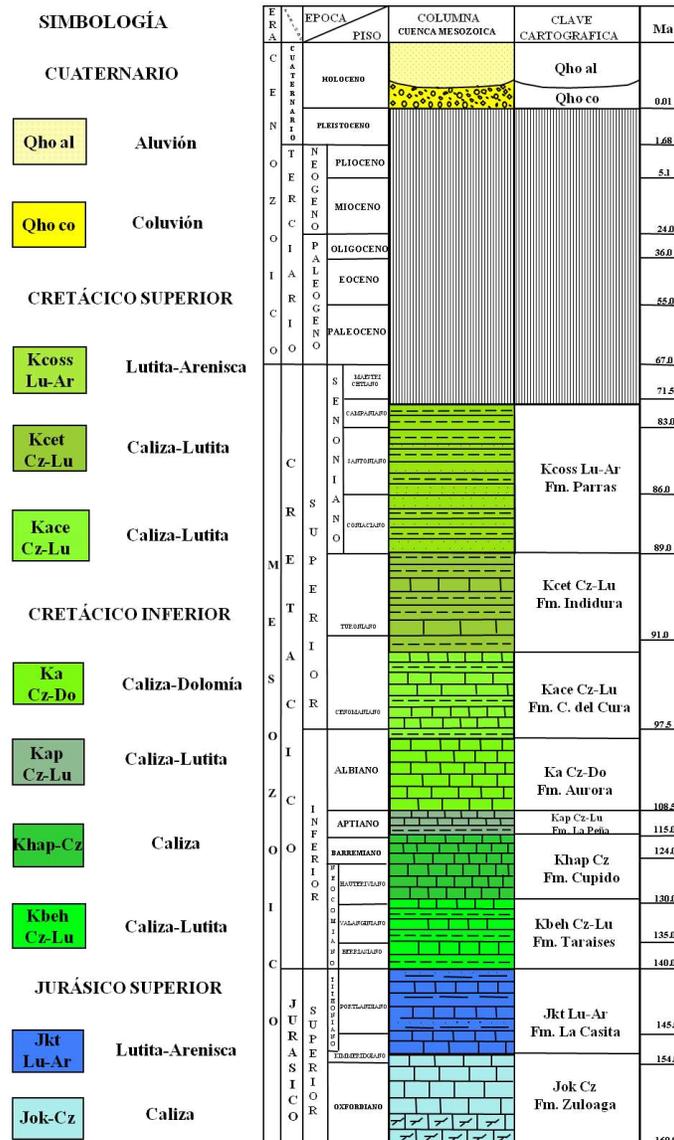


Figura III.3.- Columna estratigráfica del área de estudio (Modificada del SGM, 2007)

Jurásico Superior

Formación Zuloaga (Jok Cz)

Burckhardt (1930), describió a una caliza con *Nerinea* sp. Imlay (1938), la definió como formación Zuloaga y estableció la localidad tipo en la sierra de Sombrerito, al norte del municipio de Melchor Ocampo, Zacatecas.

En el área de estudio aflora ampliamente en los núcleos de los siguientes anticlinales: Molano, Carneros y Buñuelos, así como en el cerro del Divisadero. La unidad consiste de caliza de color gris a gris oscuro, textura wackestone, con muchos oolitos, contiene fósiles de *Nerineas* sp., contiene nódulos de pedernal negro, en estratos gruesos a masivos, presenta interstratificación con yesos, cuyos espesores sobrepasan los 50 m. Estos yesos por la forma en que están intercalados pudieran ser de la misma formación, pero más al oeste del área se comportan como un diapiro, que nos indicaría que el yeso correspondería a la formación Olvido. Presenta líneas estilolíticas, así como abundantes vetas de calcita y óxidos. El espesor de esta formación se estima en 450 m en zonas profundas y de 150 a 500 m en zonas someras. (Oivanki, 1974). La Facultad de Ingeniería de la UNAM. (1973) midió un espesor de 90 m en el prospecto Viesca -Parras. Para el área de estudio se estima un espesor de 450 m. Subyace concordantemente a la formación La Casita, mientras que su contacto inferior no se observó (Figura III.4).

De acuerdo a los fósiles: (*Nerinea* sp., *Pholadomya* sp., *Trigonia* sp., *Pseudomonotis durangensis*) se le asignan edad del Oxfordiano Kimmeridgiano. Se correlaciona con las formaciones Olvido del área del Cañón de la Peregrina, Tamps., y Galeana, N. L., con La Gloria del sector transversal y con Las Trancas de la plataforma Valles – San Luis Potosí.

Su ambiente de depósito fue marino somero retirado de la Isla de la Mula, Coahuila y de la península de Burro Peyotes. Formó grandes plataformas o rampas carbonatadas de bajo ángulo. Las zona más profundas eran de ambientes de inframarea y de poca energía, y la

zonas someras eran de tipo sabka, pasando a llanuras de intermarea y lagunares en la parte media de la rampa. (Oivanki, 1974, Johnson et al., 1991)



Figura III.4.- Afloramiento de la caliza Zuloaga (Jok Cz), puerto de piñones, se aprecia fracturas rellenas de calcita, estratos de 0.40 a 0.80 m de espesor.

Formación La Casita (Jkt Lu–Ar)

Imlay, (1936), dio el nombre de formación La Casita a una serie de lutita, limolita, arenisca y caliza, localizada en el cañón de La Casita, en la parte media de la sierra de Parras.

Se encuentra expuesta en los núcleos de los anticlinales: Molano, Carneros y Buñuelos, así como en el cerro del Divisadero. Su litología corresponde a una alternancia rítmica de lutita y arenisca predominando la primera. La arenisca comúnmente contienen fauna en donde destacan conchas de bivalvos, belemnites y amonitas, es común encontrar horizontes de lutita carbonosa, presentando color negro en roca fresca y tonos rosa a amarillo paja, en estratos delgados a laminares (Figura III.5). El espesor varía de 50 a 80 m. Descansa concordantemente sobre la formación Zuloaga y subyace de igual forma a la formación Taraises.

Basándose en su contenido faunístico, se le asigna edad Kimmeridgiano superior Tithoniano y cambia de facies a la formación La Caja hacia el sector sureste de la Sierra Madre Oriental (Rogers et al., 1961).

El depósito de esta formación, se efectuó en ambiente marino nerítico con sedimentación dominante del tipo terrígena, producto de una etapa regresiva debido a levantamientos que generaban una gran cantidad de sedimentos terrígenos.



Figura III.5.- Lutitas y areniscas de la Formación la Casita (Jkt Lu-Ar), localizada al este del puerto de piñones.

Formación Taraises (Kbeh Cz–Lu)

Imlay (1936), definió como Formación Taraises a una secuencia calcárea y calcáreo – arcillosa que sobryace a las formaciones La Caja o La Casita y subyace a la formación Cupido, estableció la localidad tipo en el cañón de Taraises en la sierra de Parras, Coahuila. Los afloramientos de la formación, se localizan en los flancos de los anticlinales: Molano, Carneros y Buñuelos. Se presenta como una alternancia de caliza arcillosa, de color gris oscuro en roca fresca y gris claro con tonos amarillo paja, con estratos de 0.3 m a 0.10 m,

lentes de pedernal negro, intercaladas con estratos de lutita de color café amarillento, con espesor de hasta 0.60 m. En la parte media continúa caliza arcillosa, lajeada y carbonosa, la parte superior se presenta como una alternancia de lutita y caliza arcillosa de 0.20 a 0.40 m. de espesor, en toda la secuencia está presente el pedernal, siendo más notorio en su cima. El espesor es aproximadamente de 175 a 220 m. (Figura III.6).

Sobreyace concordantemente a la formación La Casita y subyace concordante a la formación Cupido. La edad de acuerdo a su posición estratigráfica y contenido faunístico es, Berriasiano-Hauteriviano (Goldhammer et al., 1993). Es correlacionable con las formaciones Las Vigas, de Villa Ahumada, Chih., Houston del sur de Texas, Menchaca, San Marcos, y Barril Viejo del Golfo de Sabinas.

El depósito de la formación ocurrió en ambiente de cuenca profunda, en donde predominaba la depositación carbonatada, todo el depósito está marcado por un ambiente reductor, con abundante fauna de amonitas.

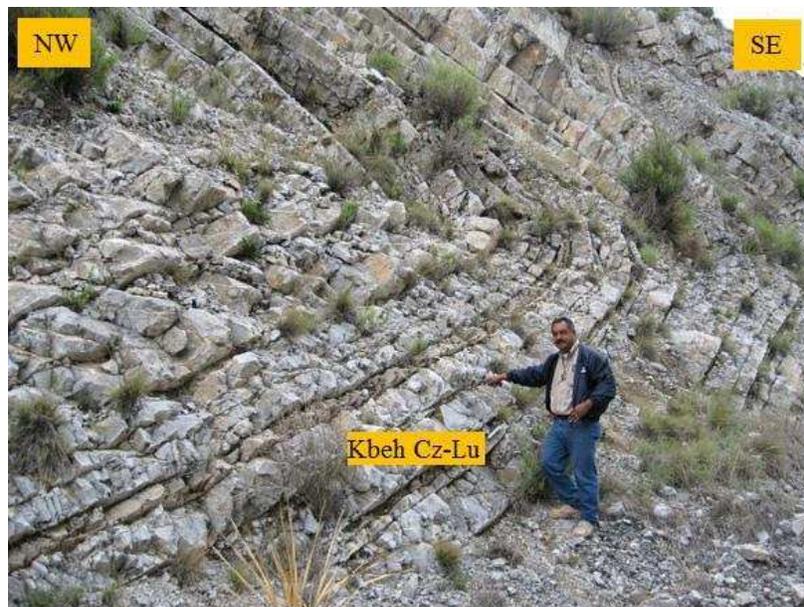


Figura III.6.- Rocas calcáreo- arcillosas de la formación Taraises (Kbeh CzLu) mostrando grandes pliegues tipo chevrón, localidad en la Sierra El Cobre.

Formación Cupido (Khap Cz)

Imlay (1936), definió esta formación como una secuencia calcárea entre las formaciones Taraises y La Peña, en la parte norte del cañón del Mimbres en la sierra de Parras, Coahuila. Originalmente descrita por Muir (1936), quien incluye a todas las rocas sedimentarias situadas sobre el Jurásico tardío, en el cañón de La Borrega, en la sierra de Tamaulipas. Aflora en el núcleo del anticlinal Santa Fe, en los flancos de los anticlinales y en los cerros: Viejo, bola, La Leona, El Divisadero, Coyotes Bravos y Piedra Pinta (Figura III.7).

Esta constituida por caliza de color gris claro con textura mudstone a packstone con estratificación que varía de 0.30 a 0.60 m, con nódulos de fierro y líneas estilolíticas, en su base se presenta muy fosilífera con estratos dolomitizados. En la región se habla de un rango de espesor de 250 a 850 m, pero en área de estudio el espesor se estima de 350 m.

Por el comportamiento de los espesores a nivel regional de esta formación, se deduce claramente que su depósito estuvo regido por el arrecife que representa el borde de una plataforma sobre la cual se depositó el Complejo Sedimentario Cupido y se le considera transgresiva, por lo que cierra el ciclo del citado Complejo. Alfonso (1976).

Sobreyace concordantemente a La formación Taraises y subyace de igual manera con formación La Peña.

Con base a las variantes fosilíferas reportadas por Blauser (1981), determinaron la edad del Hauteriviano temprano al Aptiano tardío y se correlaciona con las formaciones Padilla, Pátula y La Mula. Su medio ambiente de depósito, debió haber sido en margen de plataforma bioestromatal.



Figura III.7.- Caliza fosilífera de la formación Cupido (Khap Cz), localidad Cañada la Piñolienta.

Formación La Peña (Kap Cz–Lu)

Originalmente descrita por Imlay (1936). Como un unidad compuesta por dos miembros: el inferior calcáreo y el superior calcáreo – arcillosos, en el flanco occidental de la sierra de Parras, Coah. Posteriormente redefinida en la sierra de Los Muertos, cerca de Monterrey N. L., por Humphrey (1949). Quien consideró al miembro calcáreo-arcilloso como la formación La Peña.

Aflora ampliamente en los núcleos de los anticlinales, se distingue por formar pequeños puertos de erosión y en otras se nota por la línea de vegetación muy oscura. Consiste en una alternancia de capas delgadas de caliza arcillosa, lutita y bandas de pedernal de color negro (Figura III.8).

Su espesor es de 30 a 40 m. Sobreyace en forma concordante a la formación Cupido, su contacto superior es concordante con la formación Aurora. De acuerdo al contenido faunístico en áreas vecinas se le ha ubicado en el Aptiano superior.

Su ambiente de depositación es de facies de cuenca en ambiente pelágico somero con aporte de terrígenos (Goldhammer et al. 1999).



Figura III.8.- Calizas y lutitas de la formación la Peña (Kap Cz- Lu), presenta alternancias de bandas de pedernal.

Formación Aurora (Ka Cz-Do)

Fue definida por Burrows, (1910), en la sierra de Cuchillo Parado, en el noreste del estado de Chihuahua, llamándose así a caliza densa y gruesa, de pequeño espesor, que forma la parte basal de la caliza Cuesta del Cura. Según algunos autores, esta caliza dentro del área se le debe de llamar Tamaulipas Superior, alegando que litológicamente es diferente. Pero para el presente trabajo se le asigna la formación Aurora.

Aflora en el flanco del anticlinal de Santa Fe, en los cerros localizados al norte de Jagüey de Ferniza, al este de la población de Santa Fe de los Linderos, flanco norte de la sierra de la Leona y en el núcleo del sinclinal de la Quemada.

Esta constituida por caliza de color gris claro de estratificación mediana o masiva, de textura mudstone, contiene nódulos de pedernal, fosilífera, presentando líneas estilolíticas paralelas a la estratificación, alternando con algunos paquetes de dolomías de color gris obscuro (Figura III.9).

Su espesor varía de 300 a 625 m. Cabe mencionar que hacia el sector transverso presenta menos espesor (100 m). El contacto inferior es concordante con la formación La Peña y el superior es también concordante con la formación Cuesta del Cura.

Por su contenido faunístico y su posición estratigráfica se le asigna edad del Albiano inferior y medio. Se correlaciona con la formación Acatita, de la isla de Coahuila, con las formaciones Glen Rose y Telephone Canyon de la plataforma Burro Peyotes y hacia el sur con la formación El Abra de la Plataforma Valles, SLP.

Por su litología y contenido faunístico, se sugiere un depósito en ambiente nerítico de aguas tranquilas y someras.

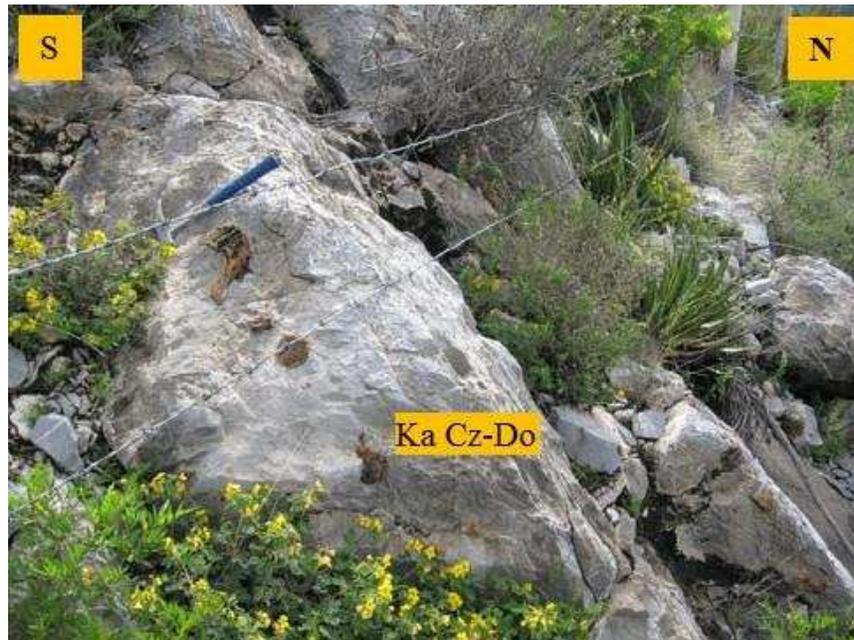


Figura III.9.- Calizas de la formación Aurora (Ka Cz- Do) estratos gruesos de 0.80 m de espesor, con nódulos y lentes de pedernal.

Formación Cuesta del Cura (Kace Cz-Lu)

Imlay (1936), definió como formación Cuesta del Cura a caliza gris oscura, ondulada, intercalada con pedernal negro, ubicada entre las formaciones Tamaulipas Superior e Indidura. Estableció la localidad tipo en la Cuesta del Cura al oeste de la ciudad de Parras, Coahuila.

Está ampliamente distribuida, sobre todo en el flanco de los sinclinales. Consiste de caliza con estratificación 0.05 a 0.20 m., con textura mudstone a wackestone de color gris oscuro, se encuentra intercalada con bandas y lentes de pedernal negro de 0.05 a 0.10 m y marga de 0.08 m. de espesor. La característica más notable en su secuencia son los estratos ondulados. Su espesor varía de 150 a 300 m. (Figura III.10).

El contacto inferior es concordante con la formación Aurora y subyace de igual forma a la formación Indidura. Es de edad Albiano medio – Cenomaniano inferior. Se correlaciona con el Grupo Washita; con las formaciones Tamaulipas Superior y El Abra de la plataforma Valles, S.L.P

Su ambiente de depositación es pelágico de agua profunda y en zonas frontales a plataforma elevada. Indica una etapa inicial regresiva del mar.



Figura III.10.- Calizas y lutitas de la formación Cuesta del Cura con pliegues tipo chevrón.

Formación Indidura (Kcet Cz-Lu)

La Formación Indidura fue primero estudiada por Bose en 1906 en la Sierra de Parras. Posteriormente Kelly (1936), definió la formación Indidura en la localidad de Delicias, Coahuila, en el flanco oriental del cerro de La Indidura, a 8 km al norte del tanque Toribio. En este sitio la formación consiste de 30 m. de lutita y caliza lajeada (López Ramos 1980).

Aflora ampliamente en los núcleos de los sinclinales. Consiste de una alternancia de lutita y caliza arcillosa y laminillas de yeso. La caliza arcillosa presenta una coloración que varía de gris oscuro a negro y gris verdoso a rosa, mientras que la lutita es de color amarillo crema., su espesor de 100 m. El contacto inferior con la formación Cuesta del Cura es concordante y transicional y el superior es concordante con la formación Parras (Figura III.11).



Figura III.11.- Alternancia de calizas y lutitas de la formación Indidura, al oeste del poblado de Tanque de Emergencia.

Formación Parras (Kcoss Lu–Ar)

Imlay (1936, 1937) aplicó el nombre de Parras a una masa potente de lutita negra comprendida entre la formación Indidura y el Grupo Difunta. La localidad tipo esta en las lomas de San Pablo, aproximadamente a 6.4 km al oriente de Parras, Coahuila.

Aflora en los valles localizados al norte del área de estudio. Está constituida principalmente por lutita calcárea de color gris verdoso y en partes oscura con algunas intercalaciones de arenisca de grano fino en capas delgadas, es muy común las vetillas de calcita. En la cuenca de Parras se reporta un espesor de 1500 m, Weidie y Murray (1967). Para el área de estudio se le estima un espesor de 700 m. (Figura III.12).

Esta unidad descansa de manera concordante sobre la formación Indidura del sector transversal y con la formación Caracol dentro de la Mesa Central, y subyace al Grupo Difunta Boyd (1959). Por su posición estratigráfica se le asigna edad del Coniaciano – Santoniano, se le correlaciona con la parte inferior de la formación Méndez.

El depósito de esta unidad es el clásico flysch de antefosa, en ambientes marinos relativamente someros con influencia de plataforma externa en facies de pro-delta.



Figura III.12.- Lutitas y areniscas de la formación Parras, afloramiento localizado al suroeste del área de estudio.

Coluvión (Qho co)

Estos depósitos están constituidos principalmente por guijarros y grava de caliza que varían de subanguloso a subredondeado, débilmente cementados por arcilla y caliche, formando abanicos aluviales depositados al pie de las sierras. Figura III.13.

Aluvión (Qho al)

Depósito reciente que aflora en las partes más bajas y planas de la carta, especialmente en los valles en la porción norte y una parte de la porción suroeste. Está constituido por una delgada capa de limo y arena, sin consolidar, de color café claro, ocre y gris amarillento. Cubren a la caliza y al coluvión, con espesores que van de unos cuantos metros a decenas de metros. No tienen expresión topográfica alguna, y se le asigna edad del Holoceno.

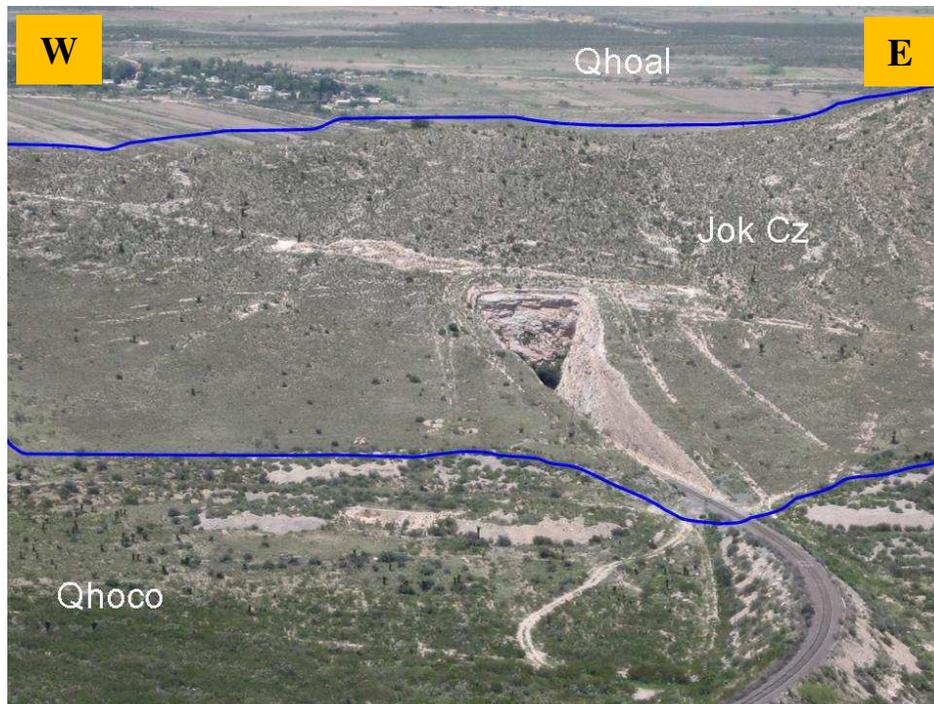


Figura III.13.- Vista panorámica de las zonas de coluvión (Qhoco) y aluvión (Qhoal), al fondo poblado de Agua Nueva, Coahuila.

III.3.- Geología estructural

Este capítulo es de importancia en la descripción de las estructuras de pliegues, fallas y fracturas, ya que con ello, se puede explicar y entender la generación y propagación de las fracturas durante la etapa de plegamiento, y asociarlo con posibles reservorios fracturados de acuíferos.

Para entender el modelo estructural del área de estudio se explicará con la evolución de la de la Sierra Madre Oriental.

La Sierra Madre Oriental (SMO) está compuesta por una gruesa secuencia de rocas carbonatadas y terrígenas del Mesozoico, que fueron plegadas y cabalgadas por los esfuerzos máximos de la Orogenia Laramide durante el paleoceno tardío y Eoceno temprano; presenta dos flexiones importantes en su estructura: una en las cercanías de

Torreón, Coahuila y otra en la vecindad de Monterrey, Nuevo León. Esta última es la que se denomina Curvatura de Monterrey, y se localiza en el extremo sureste del Golfo de Sabinas, al sureste del horst de la Isla de Coahuila y al suroeste del horst de la Isla de San Carlos. (Padilla y Sánchez, 1985) (Figura III.14).



Figura III.14.- Paleolementos que influenciaron el desarrollo de la Curvatura de Monterrey (Modificado de Chávez Cabello et al., 2005).

La Curvatura de Monterrey como se definió, abarca todos los pliegues y fallas en el área comprendida entre las ciudades de: Saltillo, Monterrey, Linares y Concepción del Oro. Estos pliegues y fallas varían en forma y tamaño y contrastan notablemente con los pliegues del extremo sur del Golfo de Sabinas, con los pliegues de la parte oriental de la

Cuenca de Parras y con las tierras bajas de planicie costera del Golfo (Padilla y Sánchez, 1985) (Figura III.15).

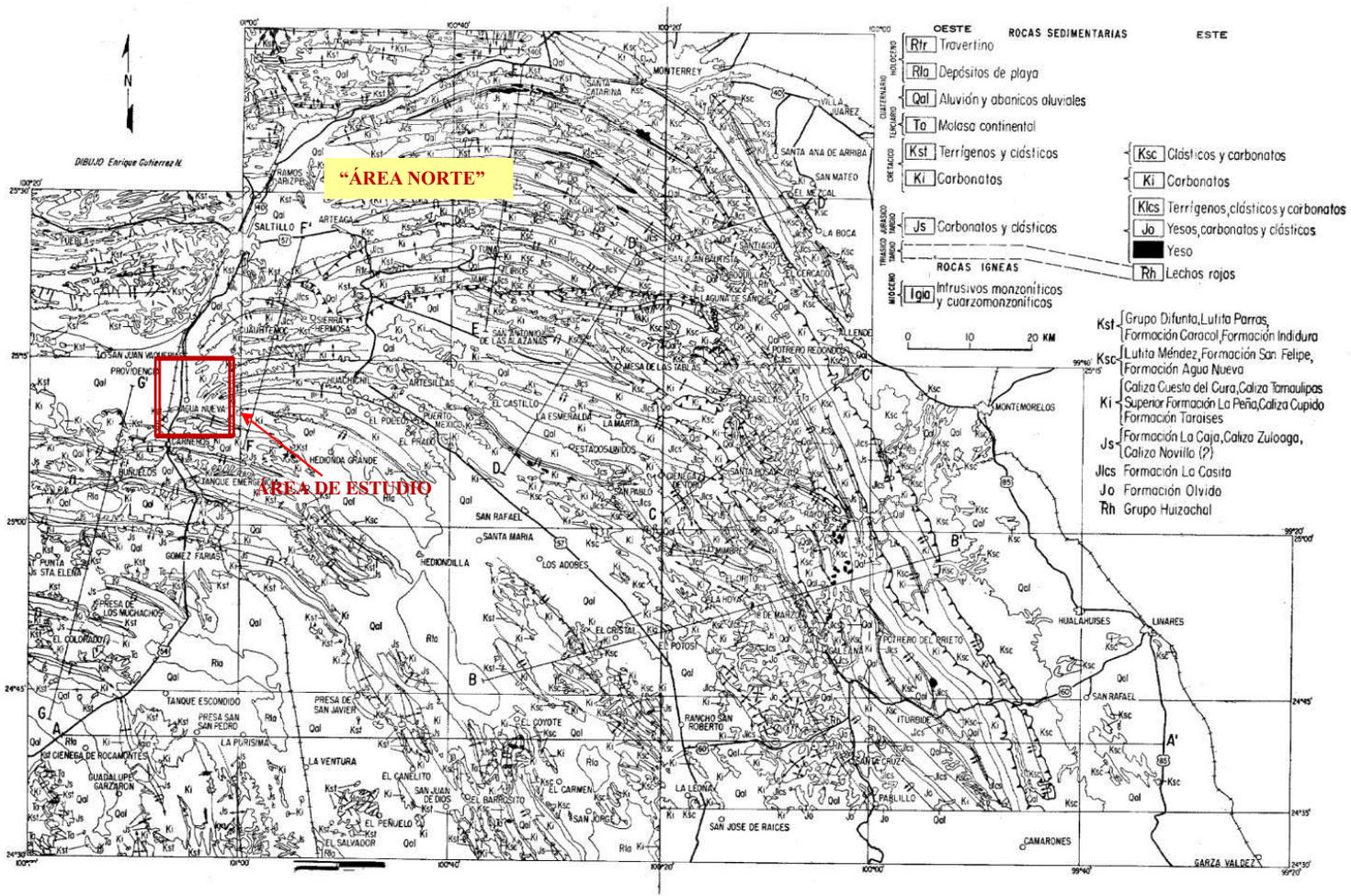


Figura III.15.- Área de estudio en el contexto geológico de la Curvatura de Monterrey. Tomado de Padilla y Sánchez, 1985.

Los pliegues de la Curvatura de Monterrey se dividieron en 5 grandes áreas con diferente estilo de plegamiento, y la denominada “Área Norte” por (Padilla y Sánchez, 1985) es la que colinda con su parte suroeste con el área de estudio. Todos los pliegues contenidos en el “Área Norte” es lo que Cserna en 1956, denominó “Anticlinorio de Arteaga”, y se caracterizan por ser apretados y simétricos con planos axiales casi verticales (Padilla y Sánchez, 1985) (Figura III.16).

Otros autores como Quintero y Aranda, (1985), identificaron dos unidades tectónicas en la Sierra Madre Oriental, en áreas contiguas a la depresión de Agua Nueva, que corresponden a la Cobijadura de Parras y la Cobijadura de Arteaga, considerando esta última como la más antigua.

Los esfuerzos máximos de la Orogenia Laramide (Paleoceno tardío-Eoceno temprano) son los causantes de los rasgos estructurales de la Curvatura de Monterrey. Las formas arqueadas de los pliegues de esta zona son producto del deslizamiento de las rocas mesozoicas hacia el noreste sobre las evaporitas y lutita del Jurásico Superior. La vergencia general de los pliegues hacia el norte y noreste, indican que la dirección de movimiento total de la cadena montañosa fue hacia el noreste. (Padilla y Sánchez, 1985; Campa, 1985) (Figura III.16).

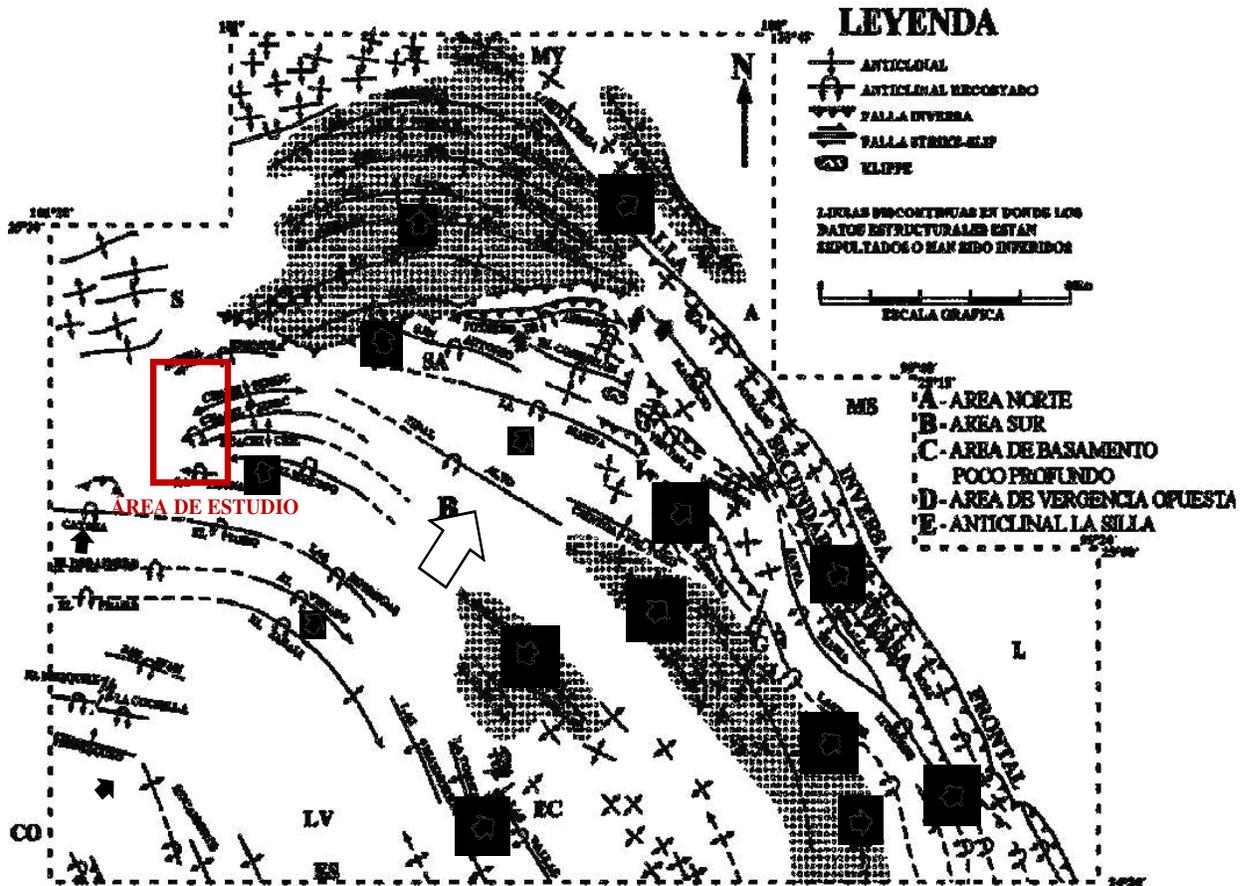


Figura III.16.- Mapa estructural de la curvatura de Monterrey mostrando, principales estructuras presentes, regiones de diferentes estilos de plegamientos, direcciones locales (flechas negras) y la dirección regional del deslizamiento por décollement (flecha en blanco). (Padilla y Sánchez, 1982).

Como producto de la deformación dúctil - frágil, en el área de estudio se manifiesta un conjunto de pliegues anticlinales y sinclinales recumbentes y en abanico, con unos ejes orientados en su mayoría en la dirección NW-SE en la parte sur (Sector transversal) y NE-SW en su porción norte (Anticlinorio de Arteaga). Así mismo se presentan una serie de cabalgaduras con rumbos variables que van de NE-SW, NW -SE y E-W y una falla lateral izquierda de rumbo general de NW 45° SE.

III.3.1.- Descripción de las estructuras

Lowell (1985) indica que hay que analizar las trampas o reservorios de hidrocarburos con base a los estilos estructurales y propone diferenciarlas con base a dos condiciones:

-Zonas donde el basamento está involucrado, desarrollando: fallas de arrastre de desplazamiento lateral en conjuntos estructurales (wrench – fault assemblages), bloques de falla por compresión, cabalgamiento del basamento, bloque de falla por extensión y deformación del basamento en forma de domo y/o arco.

Zona donde el basamento no está involucrado desarrollando: conjuntos de pliegues cabalgados por un décollement, fallas lítricas, estructuras salinas y estructuras arcillosas. (Peterson R. R.H., 1998).

Según Mc Dowell y Clabaugh, (1981). La Sierra Madre Oriental se comporta como un antepaís del complejo volcánico inferior de la Sierra Madre Occidental, el cual se puede señalar como un orógeno formado a finales del Cretácico y principios del Terciario.

El área de estudio se correlaciona con el estilo estructural donde el basamento no está involucrado, ya que presenta las siguientes características:

- Estilo estructural: conjunto de pliegues cabalgados a favor de un décollement.
- Fuerza de deformación dominante: compresión horizontal.
- Ambiente tectónico: ambiente primario, desarrollado en el antepaís de un cinturón orogénico.

Cserna (1956) ubica al área de estudio al norte de la unión de dos cadenas montañosas pertenecientes a la Sierra Madre Oriental, denominadas: Anticlinorio de Parras y Anticlinorio de Arteaga y al oriente de la llanura denominada Depresión de Agua Nueva.

A continuación se describirán las estructuras de pliegues, cabalgaduras y falla existente en el área de estudio (Anexo 1).

Anticlinal Santa Fe.- Localizado en la esquina noreste del área, es una estructura de anticlinal recumbente con su vergencia hacia el norte, con una longitud 2.1 km, prolongándose hacia el este fuera del área de estudio, con amplitud máxima de 500 m; rumbo E - W, con una ligera flexión en su eje hacia el suroeste. En su núcleo aflora la caliza de la formación Cupido y en sus flancos las formaciones La Peña, Aurora y Cuesta del Cura (Figura III.17).

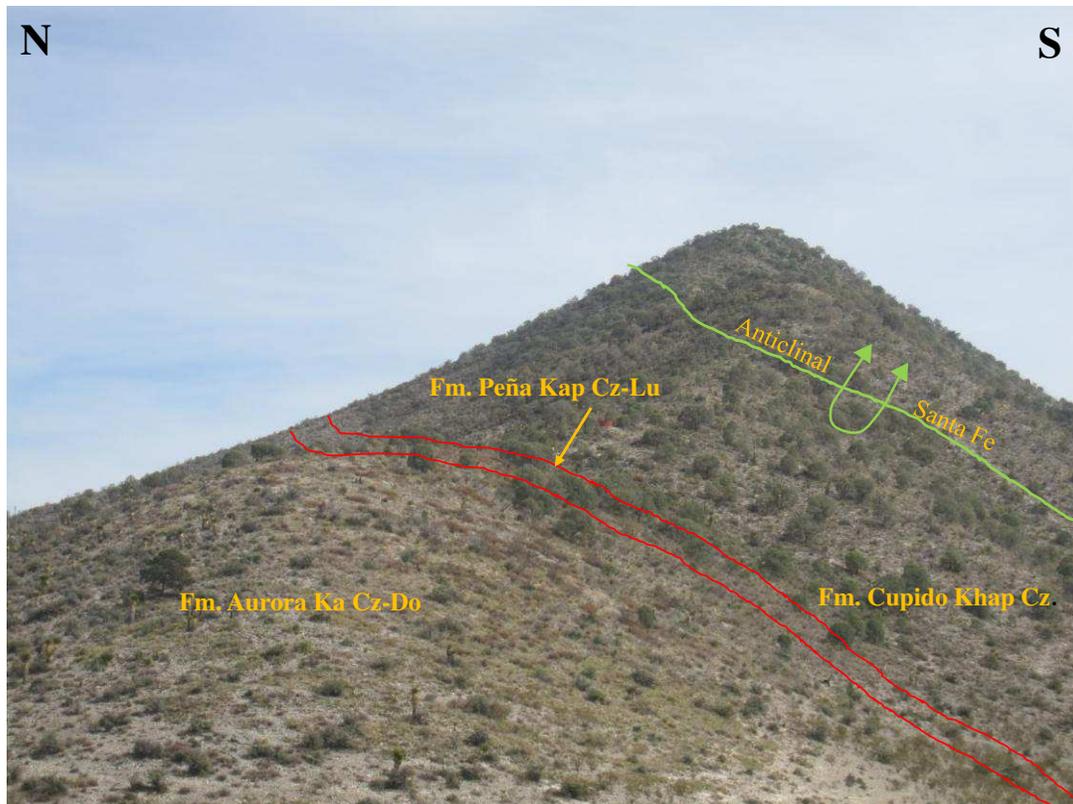


Figura III.17.- Vista transversal del anticlinal recumbente de Santa Fe.

Anticlinal Molano.- Localizado en la porción sureste del área de estudio, en la sierra Molano, de donde toma su nombre. Es una estructura en abanico, de 10.2 km de longitud y 600 m de amplitud máxima. Presenta rumbo NW 75° SE, cambiando en su extremo oeste a una dirección de S 70° W. En su núcleo aflora la caliza de la formación Zuloaga. En su extremo oeste, su flanco norte se ve afectado por la cabalgadura Las Caleras.

Anticlinal La Chorrera.- Estructura localizada en la porción suroeste del área, sensiblemente presenta un rumbo este – oeste, es un anticlinal simétrico con echados suaves en sus extremos, en su núcleo aflora la formación Taraises.

Sinclinal La Chorrera.- Estructura situada al suroeste del área, es un sinclinal simétrico con una longitud de 2 km. Con su eje orientado al N 05° W, en su núcleo aflora la caliza de la formación Cupido y en sus flancos la formación Taraises. Las capas presentan echados de 31° a 45° de intensidad.

Sinclinal La Quemada.- Ubicado en la porción sur del área. Es la continuación de una estructura regional de 6 km de longitud y una amplitud de 700 m. con una vergencia hacia al suroeste. Ya dentro del área de estudio, presenta 1.6 km de longitud, un eje orientado al NW 70° SE. En su núcleo aflora caliza y lutita de la formación Cuesta del Cura. Los echados de las capas varían de 35° a 47° de intensidad en su flanco norte.

Cabalgadura Zapaliname.- Estructura localizada al norte del área, es una cabalgadura que está emplazada en el flanco de estructura regional denominado sinclinal de Zapaliname, que presenta un rumbo de N 45° E. Ya para el área presenta un rumbo de NE 50° SW, con un cabalgamiento hacia el noroeste, longitud de 1.3 Km. Es una estructura que se observa desde la carretera que une Saltillo con el Poblado de Agua Nueva y permite ver un contacto tectónico entre las formaciones Cupido y Parras (Figura III.18).

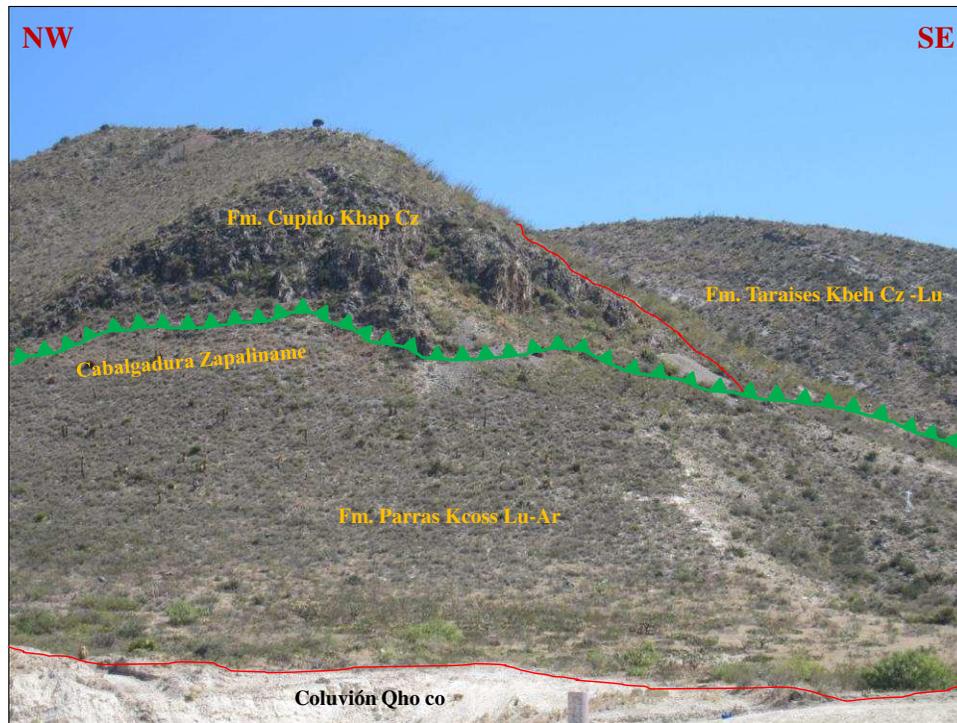


Figura III.18.- Cabalgadura Zapaliname, ubicado al norte del área, su rumbo de NE 50° SW, con una vergencia hacia el noroeste. Contacto tectónico frontal de las formaciones Cupido y Taraises con la formación Parras.

Cabalgadura Jabalí.- Localizada al noreste del área, con un rumbo de NE 45° SW y longitud de 5 Km, su dirección de cabalgamiento es hacia el noroeste y permite ver el cabalgamiento de la formación Cupido sobre la formación Indidura. En sus dos extremos se pierden en el Coluvión. Aparentemente el extremo noreste chocaría con una falla lateral izquierda sepultada, de rumbo NW-SE, misma que trunca el extremo oeste del anticlinal recumbente de Santa Fe.

Cabalgadura Potrerillos.- Es una estructura de rumbo general NE 50° SW, con ligeros cambios de rumbo en su parte central. El contacto tectónico se define por el cabalgamiento de la formación Indidura sobre la formación Cupido. La dirección del esfuerzo es hacia el noroeste.

Cabalgadura Linderos.- Estructura ubicada al este del área, presenta un rumbo casi este - oeste en su parte central y de noreste – suroeste en sus extremos, su longitud es de 4.4 Km.

El cabalgamiento está dado de la formación Cupido sobre la formación Indidura. Esta estructura junto con la cabalgadura de la Leona, pertenecen ya a la Sierra Madre Oriental o el Anticlinorio de Arteaga propuesta por Padilla y Sánchez 1985.

Cabalgadura Las Caleras.- Es una cabalgadura de rumbo NE 75° SW, y una longitud de 3 Km, la formación Zuloaga cabalga sobre la formación Parras. Los dos extremos de la cabalgadura terminan en el coluvión (Figura III. 19).



Figura III.19.- Contacto tectónico caliza Zuloaga (Jurásico) y lutitas Parras (Cretácico). Cabalgadura Las Caleras rumbo N 75° E 33° SE.

Cabalgadura El Negro.- Se localiza en porción sur del área, tiene una longitud de 2.65 Km y un rumbo de NW 87° SE en su extremo este y sensiblemente este- oeste, en su porción oeste. Se manifiesta por el contacto tectónico entre las formaciones Taraises y Cupido.

Cabalgadura La Chorrera.- Se localiza al suroeste del área de estudio, es una estructura que pone en contacto tectónico a las formaciones Taraises y Parras, presenta una longitud de 4.0Km, el rumbo de su traza varía de: este – oeste, N50°E y N75°W. La cabalgadura se considera como la continuidad de la Napa de Parras en su porción este. Como reflejo de

esta misma cabalgadura existen varios Klippes, localizados en su parte frontal (Figura III.20).

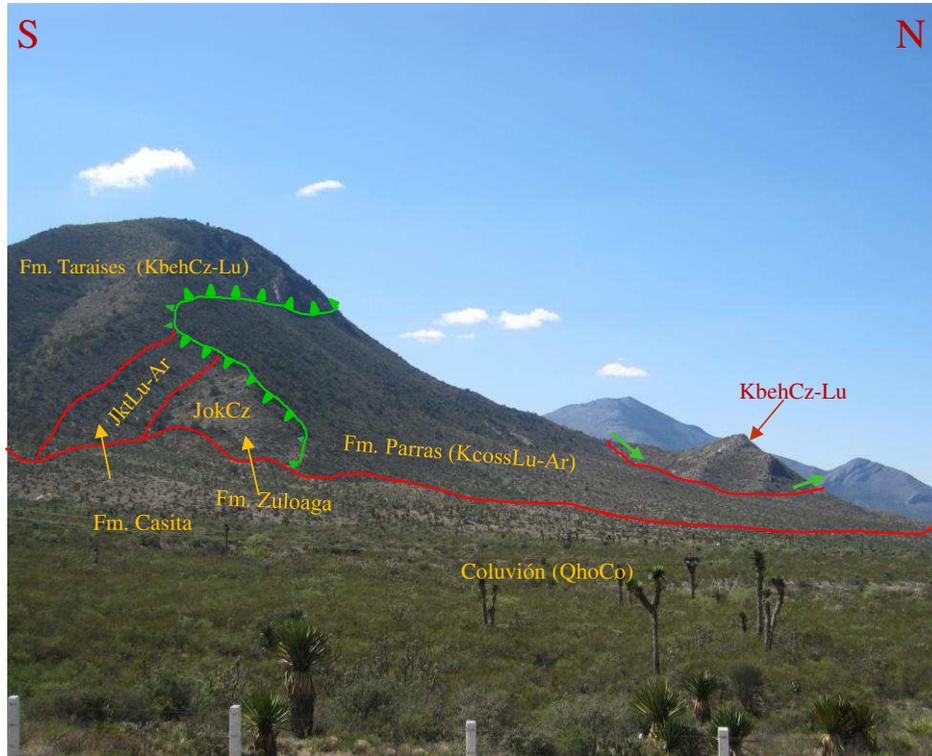


Figura III.20.- Contacto tectónico entre las formaciones Taraises - Parras y La Casita, Zuloaga - Parras. Cabalgadura La Chorrera, con un Klippe en su parte frontal.

Falla Jaguey.- La estructura se localiza en el sector noreste del área de estudio. Es una falla de tipo lateral izquierda, con una longitud 3.7 Km, su rumbo presenta dos orientaciones: en su parte noroeste el rumbo es de $NW25^{\circ}SE$ y en su porción sureste, el rumbo es de $NW53^{\circ}SE$. La falla está inferida en el plano, ya que lo cubre los sedimentos del Coluvión, La más clara evidencia de su existencia, es la afectación que provoca al anticlinal recumbente de Santa Fe.

III.3.2.-Análisis de fracturas

Bajo el campo de la deformación frágil las rocas se rompen conforme a superficies planas. Las superficies de ruptura se denominan fracturas y son discontinuidades

aproximadamente planares que separan bloques de la roca con desplazamiento perpendicular al plano de discontinuidad. (Silva et al., 2001). El origen de las fracturas está relacionado con el tectonismo, diagénesis, gradiente termal y gravedad. (Stearns, 1996a).

Los sistemas de fracturas tienden a relacionarse con la orientación regional y reorientación local del campo de esfuerzos existentes durante la propagación de estas. De tal forma que es difícil y muchas veces imposible poder interpretar el origen de algunos de estos sistemas. (Price y Cosgrove, 1990).

Para establecer un buen modelo de interpretación geométrica de la tercera dimensión de las fracturas en el reservorio fracturado, es necesario conocer el esparcimiento, ancho y morfología de las fracturas, así como el campo de esfuerzos bajo el cual se desarrollaron dichas fracturas (Nelson, 1996). Estas características ayudan a interpretar las propiedades del reservorio fracturado como son la permeabilidad, porosidad, saturación de fluidos y el factor de recuperación esperado en las rocas. Todos estos factores ayudaran a establecer el modelo de flujo en las fracturas, el cual simulará la circulación de flujos a través de estas. (Aarseth et al., 1997) (En Peterson 1998).

La clasificación de fracturas según Hancock, (1985) y Stearn (1996b), así como los modelos de interpretación dinámica de fallas de Anderson (1951), ayudan a comprender el desarrollo de fracturas con respecto al pliegue.

En el desarrollo de la cartografía geológica del área de estudio, se logró realizar el inventario tectónico de datos estructurales de fracturas y fallas para cada unidad formacional, sobre todo cercanos a los pozos, con la finalidad de conocer las principales direcciones de los esfuerzos que afectaron a las rocas de cada unidad.

Dado la cantidad de datos recuperados, se apoyó con las redes estereográficas para representar los datos estructurales tridimensionales en diagramas bidimensionales. Billings (1972) y Freeman (1992). La ventaja de esta herramienta es que permite incorporar en un solo diagrama cientos de datos estructurales (Padilla y Sánchez 1996).

Para definir la relación entre las fracturas y la estratificación se utilizó el programa Stereonett para Windows versión 2.46, donde se graficaron los datos usando la nomenclatura de Clar, y se clasificaron las fracturas de acuerdo a la clasificación propuesta por Hancock (1985).

A continuación se muestran las diferentes familias de fracturas que afectan a cada litología de cada una de las unidades formacionales.

Formación Zuloaga. La formación aflora en la parte noreste, sureste y suroeste del área de estudio, conformando el núcleo de los anticlinales. La recolección de datos se realizó en el extremo noreste del Cerro del Divisadero que conforma en su totalidad por la caliza Zuloaga.

La interpretación con la roseta se observa que hay tres sistemas de fracturas: una con buzamiento hacia SW, la segunda con buzamiento hacia el NW y la tercera buza hacia el SE (Figura III.21).

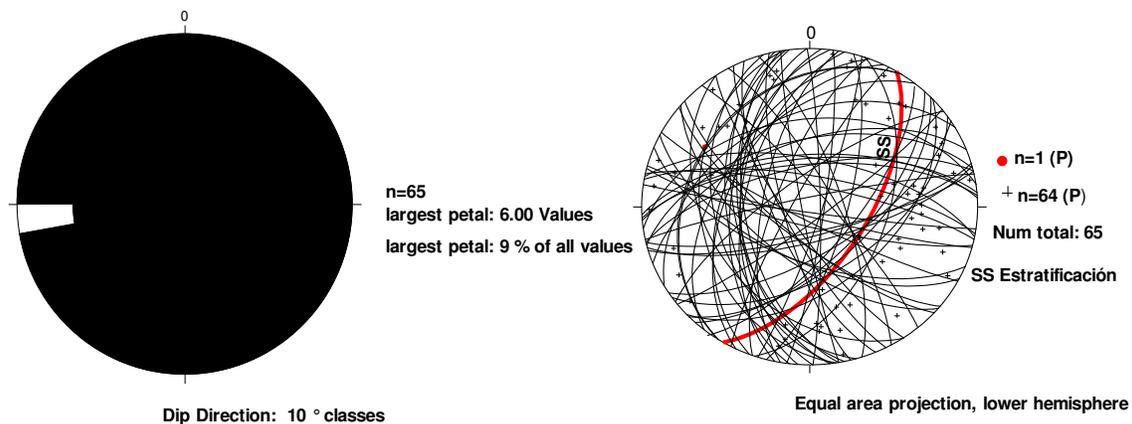


Figura III.21.- Fracturas de la formación Zuloaga, graficadas con la roseta y la red de Schmidt.

De acuerdo al diagrama de Schmidt Figura III.21 y III.22., se tienen: fracturas hk_0 con ángulo agudo respecto al eje “b” y Fracturas de tipo “ac” y “bc”.

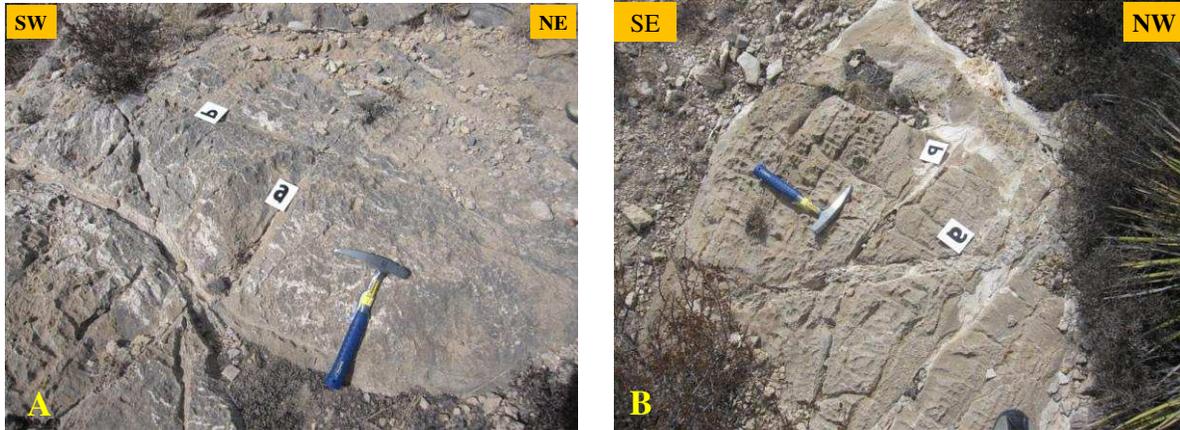


Figura III.22.- En la imagen (A) se muestra las fracturas “ac” y “bc”. En la (B) son fracturas “ac” y “bc”, y fracturas hk0 con ángulo agudo con respecto al eje “b”. Rumbo de capa definido por la cabeza de martillo.

Formación La Casita. La recolección de datos se realizó en el extremo sur del área de estudio, en el flanco sur del anticlinal en abanico del Molano. La unidad presenta fracturas de tensión de tipo “ac” y “bc” y fracturas de cizalla de tipo hk0 con ángulo agudo al eje “a”. En la roseta se observa que el buzamiento más marcado es hacia el NW (Figura III.23).

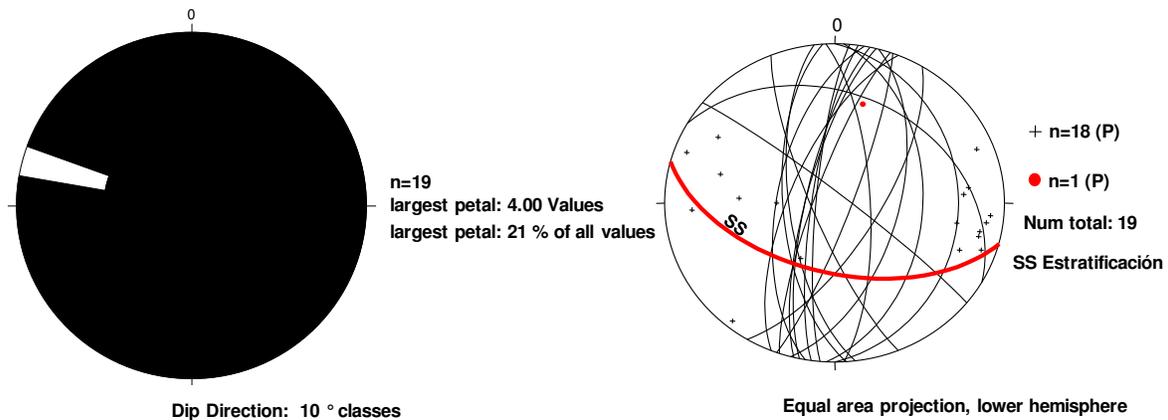


Figura III.23.- Redes de la formación La Casita. Flanco sur del anticlinal del Molano.

Formación Cupido.- Los datos estructurales fueron recolectados en la parte noreste del área, cercano al Pozo de Jagüey 2. De acuerdo a las gráficas de las redes se tiene fracturas de tensión de tipo “ac”, y fracturas de cizalla hk0 con ángulo agudo al eje “a”. En la roseta

se observan familias de fracturas con buzamiento al SW, y otra familia con buzamiento hacia el NE (Figura III.24).

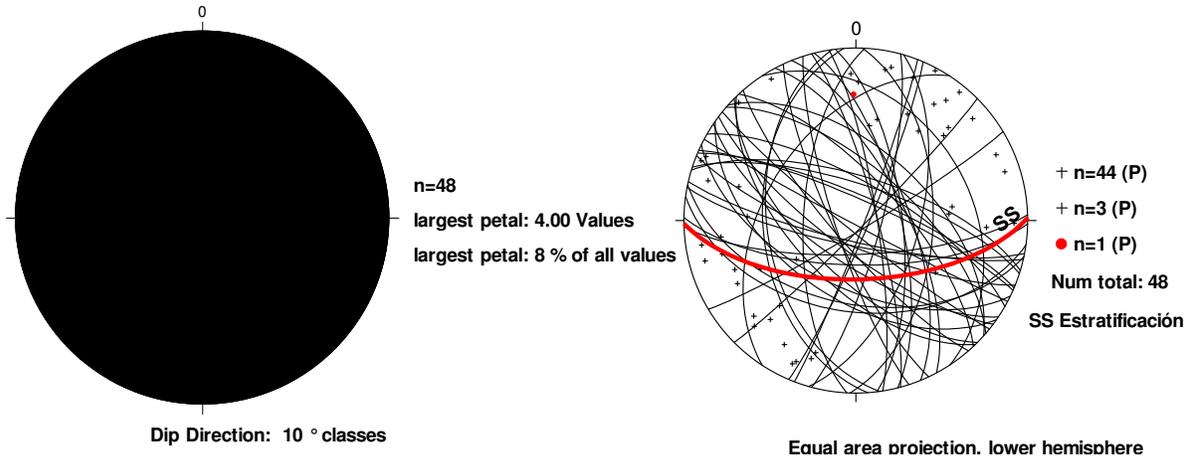


Figura III.24.- Gráfica de las Redes de la formación Cupido, localidad al sur del poblado de Jagüey de Ferniza.



Figura III.25.- Fracturas “ac” y “bc” afectando la caliza Cupido. El mango de la pica indica el rumbo de capa.

Formación La Peña. Los datos estructurales de las fracturas de esta unidad, se recolectaron en la zona noreste del área de estudio. Resultando fracturas de tensión de tipo

“ac” y “bc” y fracturas de cizalla de tipo $hk0$ con ángulo agudo al eje “a”. Con la roseta se observa que el buzamiento de la familia de fracturas es hacia el noreste (Figura III.28).

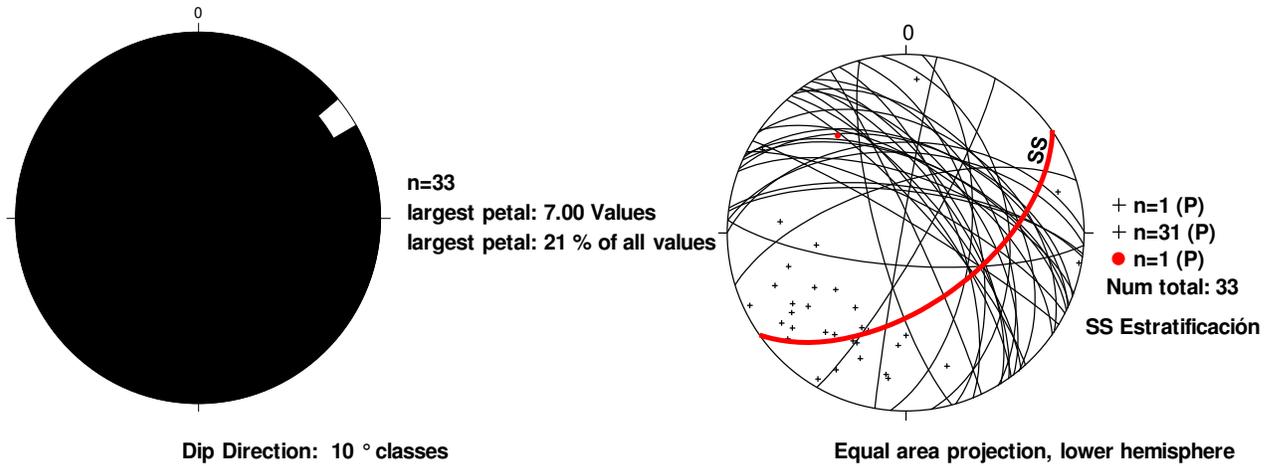


Figura III.26.- Redes de la formación La Peña, en el flanco norte del anticlinal recumbente de Santa Fe.

Formación Aurora.- La toma de datos estructurales de las fracturas para esta unidad litológica, se realizó en el sector oriente del área de estudio, entre los Pozos Santa Fe 2 y 3. Las gráfica de las redes nos muestra fracturas de tensión de tipo “ac” y “bc” y fracturas de cizalla de tipo $hk0$ con ángulo agudo al eje “a”. En la roseta se observa que el buzamiento preferencial es hacia NE, aunque existe otro grupo menos dominante hacia el NW y otro hacia el SW (Figura III.27 y 28).

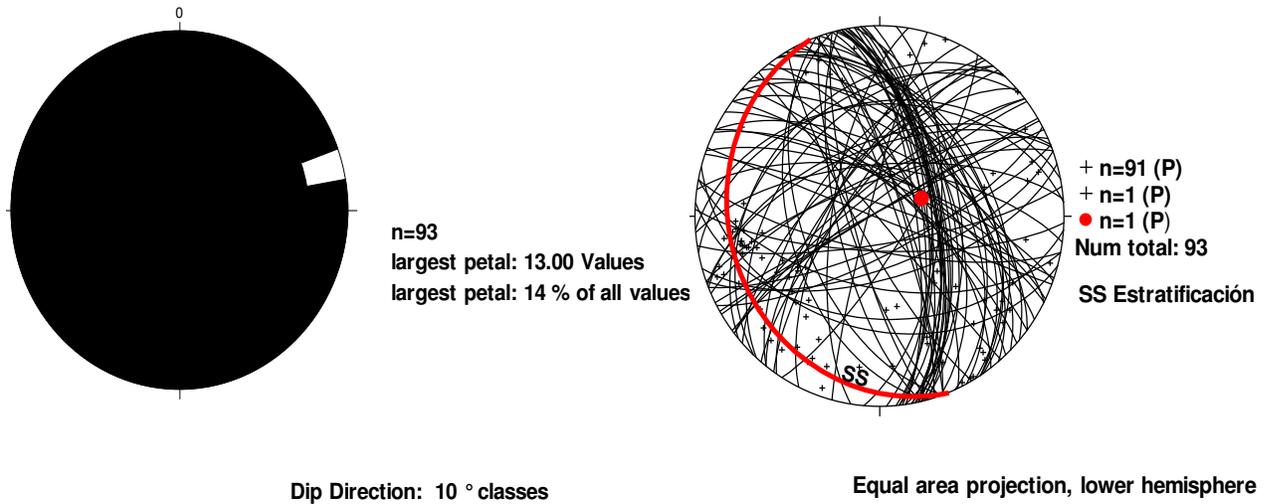


Figura III. 27.- Red de Schmidt que muestran los diferentes tipos de fracturas de tensión y de cizalla de la formación Aurora. Así mismo, se muestra la roseta correspondiente de los rumbos de los echados de las fracturas.

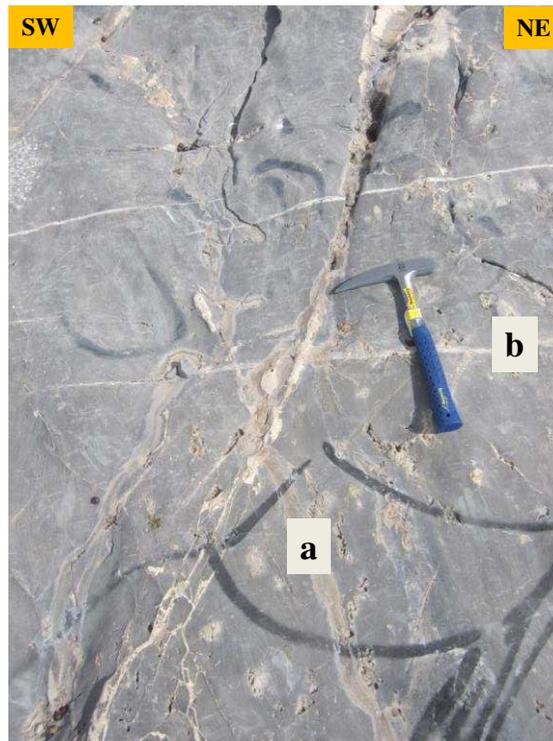


Figura III.28.- Caliza de la formación Aurora, se muestra las fracturas de tensión tipo “ac” y “bc”, y las fracturas de cizalla tipo hk0 con ángulo agudo al eje “a”. El mango del martillo indica el rumbo del echado.

Formación Cuesta del Cura.- Las fracturas de esta unidad se recolectaron en la porción noreste del área de estudio, en el flanco norte del anticlinal de Santa Fe. La gráfica de las redes muestran fracturas de tensión de tipo “ac” y fracturas de cizalla de tipo hk0 con ángulo agudo al eje “a”, hk0 con ángulo agudo al eje “b” y 0kl con ángulo agudo al eje “c”. Con la roseta se puede visualizar que hay dos tendencias con los rumbos de los echados de las fracturas: la primera predominan más hacia el SW y la segunda en menor porcentaje es hacia el NE (Figura III.29).

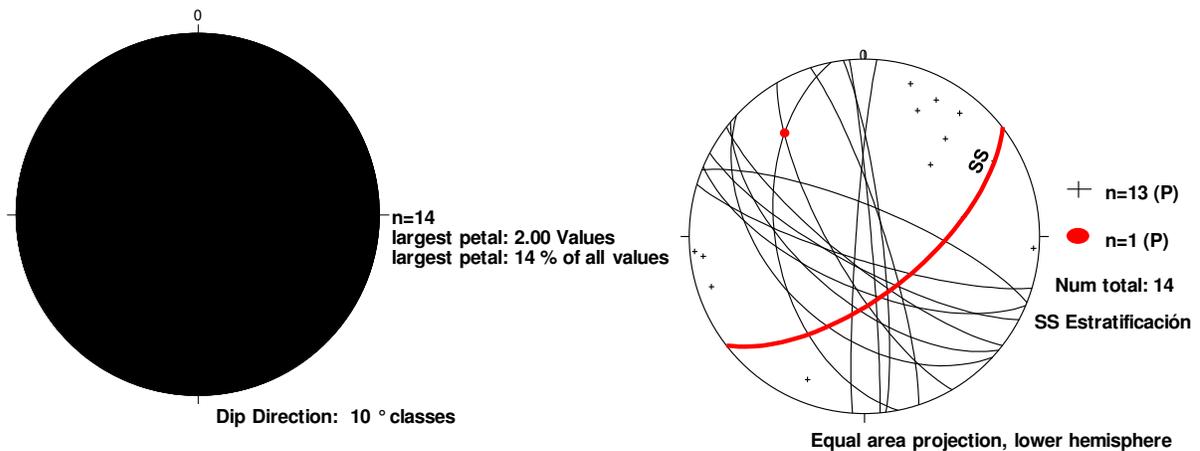


Figura III.29.- Gráfica de las redes correspondientes a la formación Cuesta del Cura.

Formación Indidura.- Los datos estructurales de las fracturas contenidas en esta unidad, fueron tomados en la porción noreste del área de estudio, al norte de la cabalgadura del Jabalí. De acuerdo a las gráficas de la (Figura III.30). En el diagrama de Schmidt, se manifiesta fracturas de tensión de tipo “ac” y fracturas de cizalla de tipo hk0 con ángulo agudo al eje “a” y 0kl con ángulo agudo al eje “c”, y en la roseta se nota que los buzamientos predominan hacia el NE y en menor proporción hacia el SW.

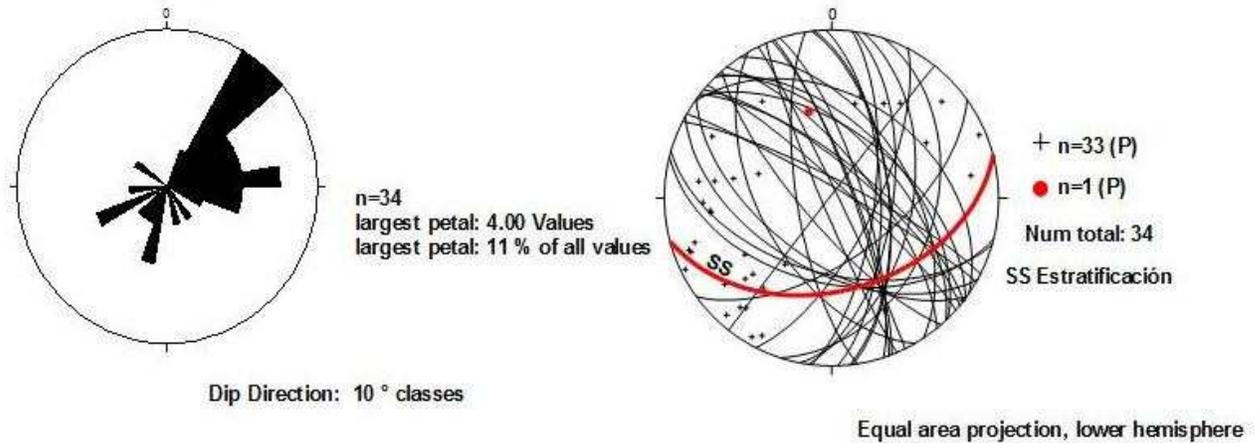


Figura III.30.- Gráfica de la Red de Schmidt y roseta correspondiente a las fracturas de la formación Indidura.

Formación Parras.- Los datos de las fracturas de esta formación se recolectaron en el sector sur del área de estudio, cercano a la Cabalgadura de las Caleras. De acuerdo a las gráficas de Schmidt (Figura III.31) se ve que tenemos presencia de fracturas de tensión de tipo “ab” y “ac” y fracturas de cizalla hk_0 con ángulo agudo al eje “b” y h_0l con ángulo agudo al eje “a”. Con la roseta, vemos que las familias de fracturas con más frecuencia son las que tienen buzamiento al SE y como segunda familia en importancia serian los que buzanan hacia el SW sin descartar también que se manifiestan hacia al NE aunque en menor proporción.

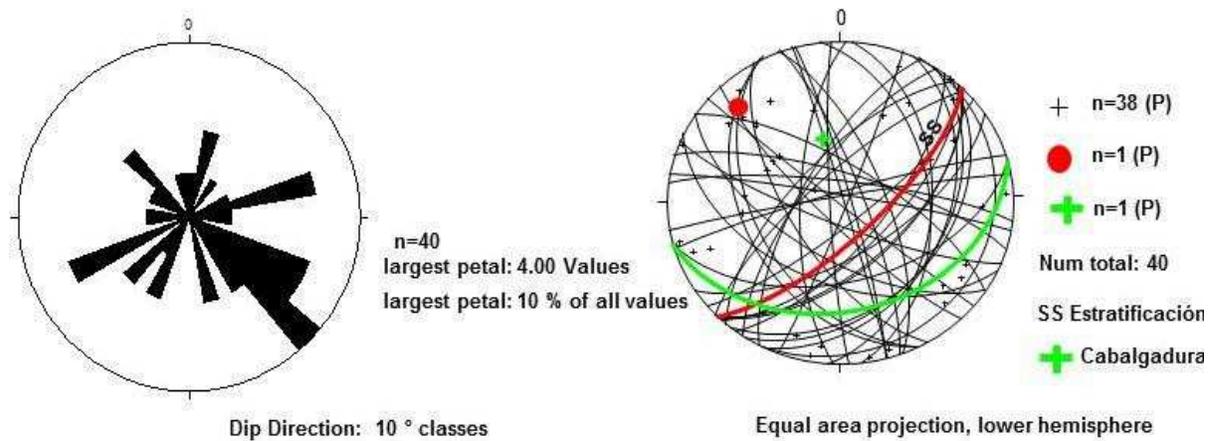


Figura III.31.- Roseta y red de Schmidt mostrando características de las fracturas de la formación Parras.

De acuerdo al análisis del inventario tectónico, se identificó que existen para el área de estudio por lo menos 5 tipos diferentes de fracturas, producto de la deformación regional Laramide. Las fracturas se clasificaron de acuerdo a Hancock (1985) como: fracturas de cizalla hk0 con ángulo agudo al eje “a” (formaciones: Casita, Cupido, Peña, Aurora, Cuesta del Cura e Indidura), hk0 con ángulo agudo al eje “b” (formaciones: Zuloaga, Cuesta del Cura y Parras), 0kl con ángulo agudo al eje “c” (formaciones Cuesta del Cura e Indidura) y h0l con ángulo agudo al eje “a” (formación Parras) y fracturas de tensión tipo “ac” y “bc” (contenidas en todas las formaciones).

También se identificó que las fracturas que predominan o con más frecuencia, son las que presentan su rumbo de NW-SE y que están contenidas en las siguientes formaciones Zuloaga, Cupido, Peña, Cuesta del Cura, Indidura y Parras. Como segunda familia de fracturas predominantes están las orientadas con rumbo NE-SW y afectan a las formaciones La Casita, Aurora y Parras.

Como se puede observar, la formación Parras es de la más afectada por la deformación dentro del área de estudio, ya que contiene las dos familias predominantes de fracturas NW-SE y NE-SW. Cosa que concuerda del porqué se le considera un acuífero de grietas de poca capacidad.

IV.- HIDROGEOLOGÍA

La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la ocurrencia de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación (Mijailov 1985).

IV.1.- Unidades hidrogeológicas.

Con la cartografía geológica, se diferenciaron las características: litológicas, estratigráficas y estructurales de cada una de las formaciones que afloran en el área, y, con base a su capacidad de almacenar, infiltrar y dejar circular el agua, se definieron como: rocas permeables (acuífero), rocas semipermeables (acuitardo) y rocas impermeables (acuicludo) (Figura IV.1).

Rocas permeables. La caliza de la Formación Aurora, Cupido y Zuloaga pertenecen a este tipo de rocas ya que presentan una estratificación mediana a gruesa, una textura mudstone, fracturada, estilolitas paralelas a la estratificación y cárstificación. Gracias a estos parámetros las formaciones recargan, almacenan y permite la circulación del agua en el subsuelo. Se localizan en los flancos de las estructuras de anticlinales y sinclinales. La caliza Aurora presenta permeabilidad alta a través de las fracturas y conductos de disolución. (Leser y Asociados, 2004). El gasto de los pozos que cortaron la caliza de estas formaciones oscilan entre 27 y 67 l/s.

Otras rocas semipermeables son la lutitas y areniscas de la formación Parras, que en su columna litológica, presentan zonas fracturadas, que permite la infiltración y circulación del agua en el subsuelo. La permeabilidad en esta unidad es en general reducida (Leser y Asociados, 2004). El gasto de los pozos en esta formación es del orden de 1 a 9 l/s.

Rocas semipermeables. Las formaciones: Taraises, Cuesta del Cura e Indidura, se incluyeron en este rango, dado que presentan alternancias de caliza y lutita, lo que hace que sean poco permeables. Se carece de información sobre posibles gastos en estas unidades.

Rocas impermeables. Para el área de estudio se incluyen en este rango a las formaciones La Casita y la Peña, la primera consiste de lutita y la segunda por caliza arcillosa y lutita, característica litológica que les da el carácter de impermeables.

| | Capacidad de almacenar | Capacidad de drenar | Capacidad de transmitir | Formaciones características |
|------------|------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------------|
| ACUÍFEROS | ALTA | ALTA | ALTA | Gravas, arenas, calizas |
| ACUITARDOS | ALTA | MEDIA/BAJA | BAJA | Limos, arenas limosas y arcillosas |
| ACUICLUDOS | ALTA | MUY BAJA | NULA | Arcillas |
| ACUIFUGOS | NULA | NULA | NULA | Granitos, gneises, mármoles |

Figura IV.1.- Formaciones geológicas frente al agua (González de Vallejo et al., 2002)

IV.2.- Tipos de acuíferos.

Un acuífero es aquel estrato o formación geológica permeable que permite la circulación y el almacenamiento del agua subterránea por sus poros y grietas, de tal manera que pueda extraerse en cantidades económicamente aprovechables (Custodio y Llamas, 1996; Werner 1996).

Existe una clasificación de acuíferos de acuerdo a las condiciones de presión que se encuentren el subsuelo o por su comportamiento hidrodinámico CONAGUA, (2000 a) y Werner, (1996) (Figura IV.2):

a). Acuífero libre: Es el acuífero que se encuentra en directo contacto con la zona saturada del suelo. En este acuífero la presión de agua en la zona superior es igual a la presión atmosférica, aumentando en profundidad a medida que aumenta el espesor saturado.

b). Acuífero confinado: Es aquel acuífero que se encuentra cubierto por algún nivel relativamente impermeable o un acuitardo. En estos acuíferos la presión del agua es mayor que la presión atmosférica, y cuando son perforados por un pozo, el agua se elevará por encima del nivel del acuífero, y en algunos casos por encima del nivel del terreno, a lo que se conoce como pozo fluyente o artesiano.

c). Acuífero semiconfinado: Es un acuífero limitado por formaciones menos permeables (acuitardo) que él mismo, pero a través de las cuales puede recibir o ceder volúmenes significativos de agua. El acuífero semiconfinado contiene agua a mayor presión que la atmósfera. El agua es libre de moverse a través de los acuitardos en sentido vertical, hacia arriba o hacia abajo.

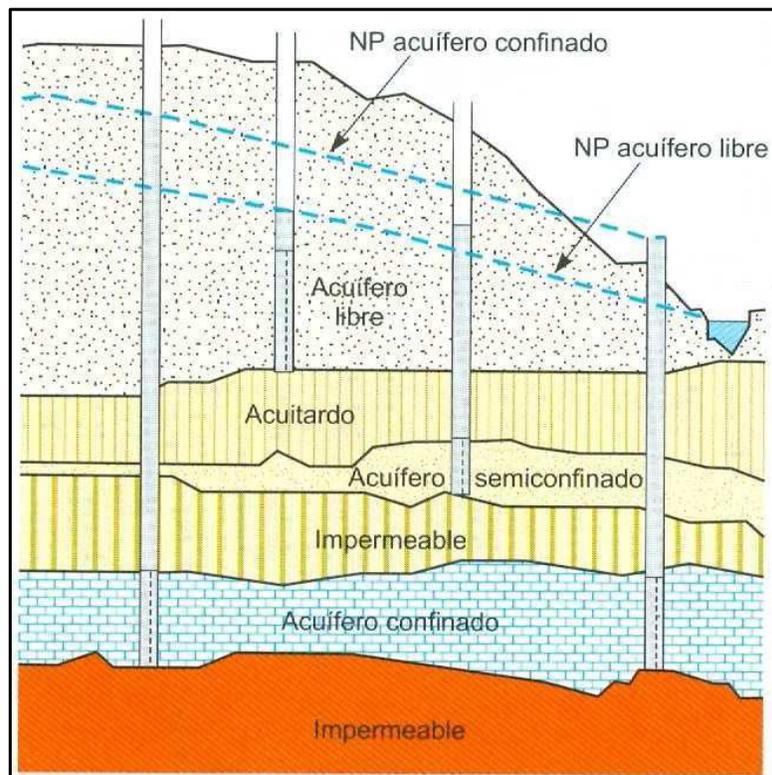


Figura IV.2.- Tipos de acuíferos y niveles piezométricos (González de Vallejo et al., 2002)

Por otro lado también los acuíferos por su textura y litología se clasifican en tres tipos: acuíferos de poros, acuíferos de grietas o fisurados y acuíferos cársticos. González de Vallejo et al., (2002) y Werner (1996) (Figura IV.3).

Acuíferos de Poros. La mayor parte se trata de sedimentos sueltos como gravas y arenas. Que su permeabilidad se debe a la porosidad intergranular. La textura del medio es de granos, que permite que el agua se almacene y circule por los huecos intergranulares. Los medios granulares dada su génesis, suelen ser muy homogéneos a escalas reducidas. (González de Vallejo et al., (2002).

Acuífero de Grietas. El agua en este tipo de acuífero se mueve en las fracturas abiertas de origen tectónico o de intemperismo. El contenido de poros generalmente es despreciable. (Werner, 1996).

Acuífero Cárstico. La karstificación es un proceso de disolución por la acción del agua sobre formaciones carbonatadas previamente fracturadas y prácticamente el agua circula a través de las cavernas y canales de diámetros variables. González de Vallejo et al., (2002) y Werner (1996) (Figura IV.3).

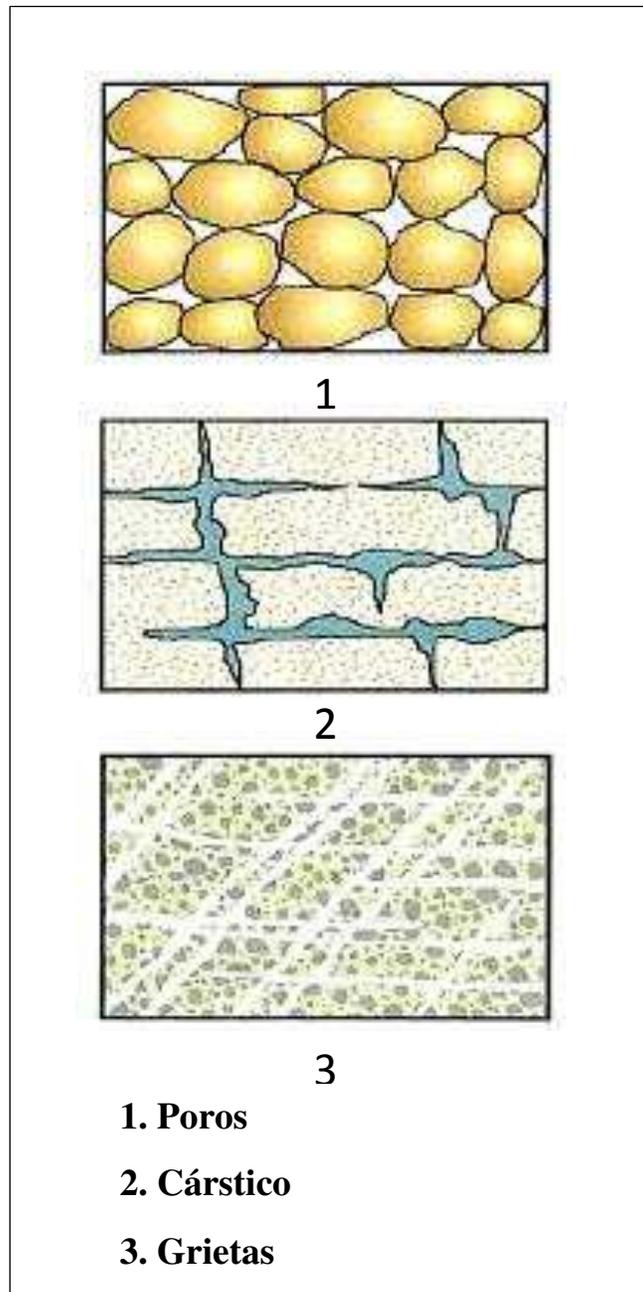


Figura IV.3.- Tipos de acuíferos según su textura. (González de Vallejo et al., 2002).

En el área de estudio, el acuífero se subdividió en dos tipos: El primero es un acuífero en medio fracturado (acuífero de grietas) entrampado en la lutita y arenisca de la formación Parras, con una permeabilidad reducida; cubiertos por los sedimentos del Cuaternario, formando el gran valle localizado al poniente del área. Existen en el valle pozos con

profundidades de 495 m (Pozo RP-2) fuera del área y de 632 metros (Pozo AG-20) (Figura IV.4 y IV.6).

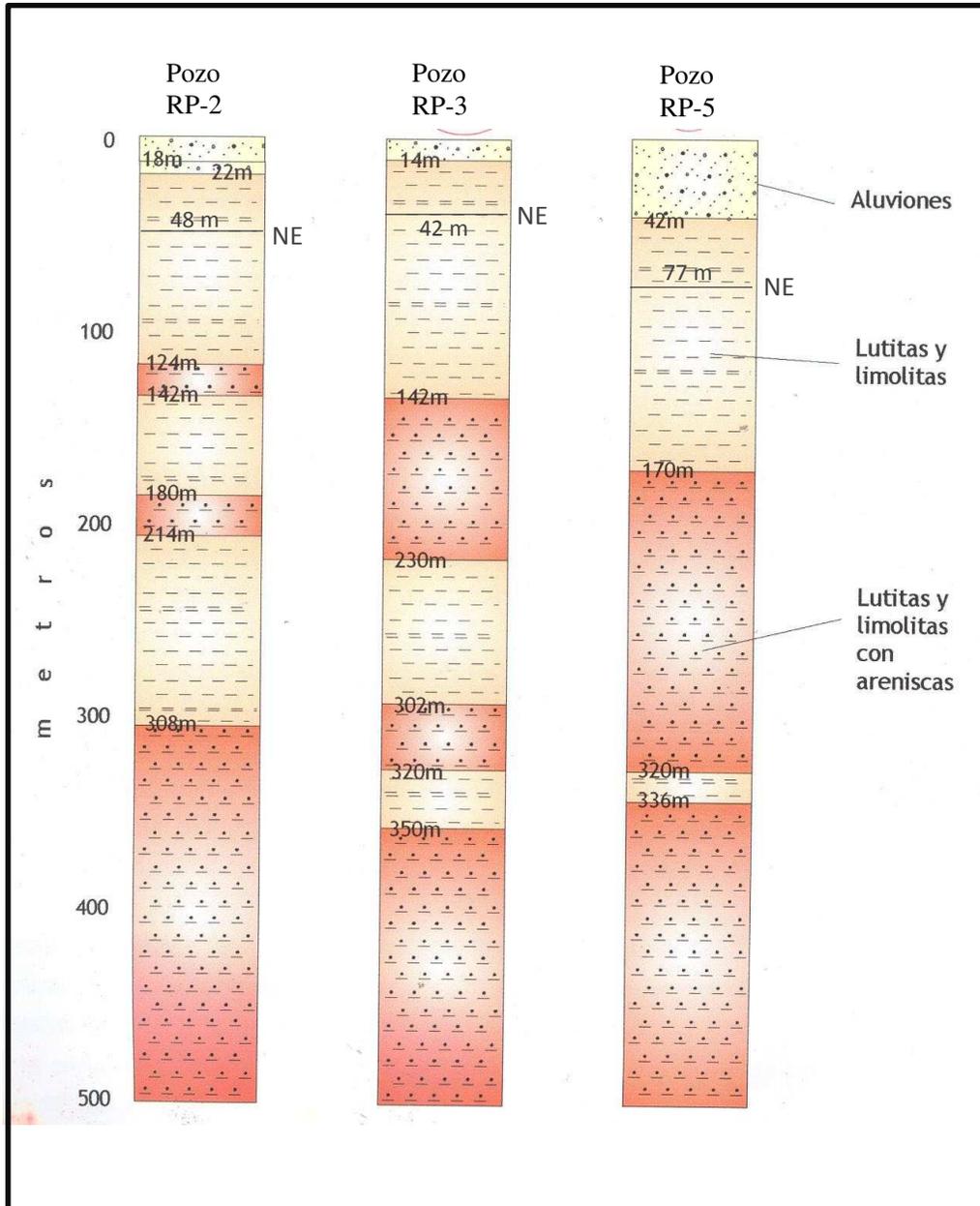


Figura IV.4. Columnas litológicas de acuerdo a pozos perforados en el valle, en acuífero de grietas (Fm. Parras), ubicados cercanos al límite extremo poniente del área de estudio. Tomado de Leser y Asociados, (2004).

El segundo tipo, es el acuífero de grietas y cárstico, confinado en la caliza de las formaciones Jurásicas – Cretácicas (Zuloaga, Cupido y Aurora), localizada en las

estribaciones Sierra Madre Oriental, sector oriente del área de estudio (zona de caliza) (Figura IV.5).

El acuífero se recarga de la parte alta de la sierra, donde la lluvia aprovecha para su circulación, las fracturas, fallas, zonas de disolución y estructuras de anticlinales, para así formar un acuífero de gran potencial. Aunque este acuífero se localiza en la caliza de la Sierra Madre Oriental, parte de su descarga lo realiza en el acuífero localizado en el valle (medio fracturado).

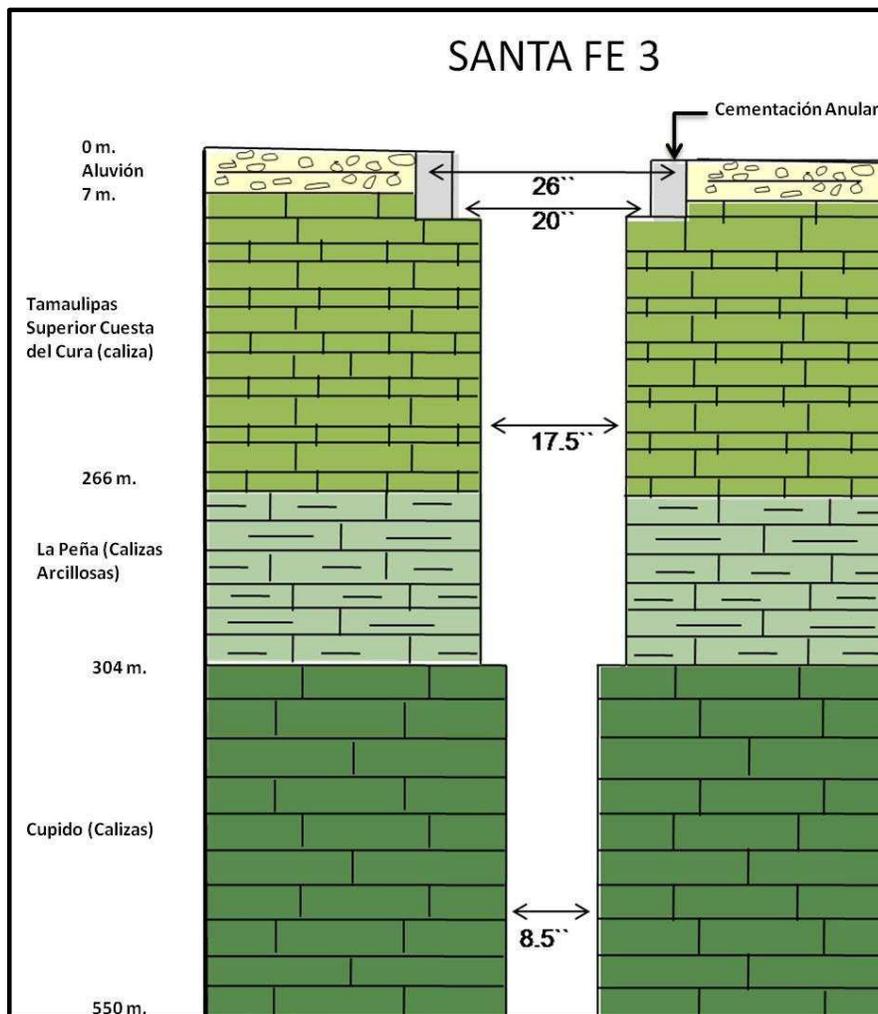


Figura IV.5.- Columna de un pozo perforado en acuífero de grietas, con profundidades de 550 m. Localizado al oriente del área de estudio. (AGSAL, 2010).

IV.3.- Piezometría

El conocimiento de la piezometría del agua subterránea es importante, ya que nos permite, conocer el sentido del flujo, diferenciar área de recarga y descarga y los gradientes de su flujo (gradiente piezométrica) mediante la toma de medida del nivel piezométrico (Werner, 1996).

Se recopiló información piezométrica de la CNA de los años 1998,2000, 2004 y 2007, así como de la empresa Aguas de Saltillo de los años 2008 y 2009. Ver Tabla IV.1.

De acuerdo a la información recopilada, en la zona del Valle, sector noroeste del área de estudio, se han perforado alrededor de 45 pozos, y para la zona oriente se tiene reportado 12 pozos. (Figura IV.6).

TablaIV.1.- Parámetros hidrogeológicos de los pozos localizados en la zona oriente del área de estudio. AGSAL (2009)

| CLAVE | FECHA | HORA | PROPIEDAD | TIPO DIAMETRO(PULG.) | X | Y | LONGITUD DE COLUMNA | PROF. TOTAL (m) | Q(lps) | N.E. (m) | N.D.(m) | ELEV. BROCAL (msnm) | ELEV. N.F. (msnm) | PH | C | GEOLOGÍA | OBSERVACIONES |
|------------------|------------|-------|-------------------|----------------------|--------|---------|---------------------|-----------------|--------|----------|---------|---------------------|-------------------|------|-------|--------------|-------------------------------|
| SANTA FE-2 | 09/01/2009 | 14:00 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-8 | 295099 | 2787732 | 243.58 | | 33 | 224.05 | | 1836.12 | 2058.12 | | | FM. AURORA | EN RESERVA |
| SANTA FE-2 | 24/06/2009 | 11:00 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-8 | 295099 | 2787732 | 243.58 | | 52 | | 229.06 | 1836.12 | 2058.12 | 6.93 | 22.5 | FM. AURORA | PRODUCCIÓN |
| SANTA FE-2 | 13/08/2009 | 13:30 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-8 | 295099 | 2787732 | 243.58 | | 52 | | 226.09 | 1836.12 | 2058.12 | 6.93 | 23.1 | FM. AURORA | PRODUCCIÓN |
| SANTA FE-2 | 08/09/2009 | 12:30 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-8 | 295099 | 2787732 | 243.58 | | 48 | | 229.31 | 1836.12 | 2058.12 | 6.89 | 22.9 | FM. AURORA | EN RESERVA |
| SANTA FÉ 3 | 09/01/2009 | 13:30 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-6 | 295415 | 2787654 | 270.2 | 550 | | 240.43 | | 1834.22 | 2074.19 | | | FM. AURORA | EN RESERVA |
| SANTA FÉ 3 | 24/06/2009 | 12:00 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-6 | 295415 | 2787654 | 270.2 | 550 | | | | 1834.22 | 2074.19 | | | | MANTENIMIENTO |
| SANTA FÉ 3 | 13/08/2009 | 11:45 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-6 | 295415 | 2787654 | 270.2 | 550 | 33 | 243.8 | 246.64 | 1834.22 | 2074.19 | | | FM. AURORA | EN RESERVA |
| SANTA FÉ 3 | 08/09/2009 | 12:00 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-6 | 295415 | 2787654 | 270.2 | 550 | | 245.68 | | 1834.22 | 2074.19 | | | FM. AURORA | EN RESERVA |
| LOMAS DEL PINO-1 | 09/01/2009 | 15:20 | AGUAS DE SALTILLO | POZO -8 | 294055 | 2787701 | 233 | | 61 | 210.6 | | 1834.99 | 2044.99 | | | FM. AURORA | PARADO |
| LOMAS DEL PINO-1 | 24/06/2009 | 09:30 | AGUAS DE SALTILLO | POZO -8 | 294055 | 2787701 | 233 | | 61 | | 212.95 | 1834.99 | 2044.99 | 7.08 | 21.5 | FM. AURORA | PARADO |
| LOMAS DEL PINO-1 | 13/08/2009 | 15:15 | AGUAS DE SALTILLO | POZO -8 | 294055 | 2787701 | 233 | | 60.6 | | 213.15 | 1834.99 | 2044.99 | 7.09 | 21.3 | FM. AURORA | PARADO |
| LOMAS DEL PINO-1 | 24/09/2009 | 10:30 | AGUAS DE SALTILLO | POZO -8 | 294055 | 2787701 | 233 | | | 210.37 | | 1834.99 | 2044.99 | | | FM. AURORA | PARADO |
| LOMAS DEL PINO-2 | 09/01/2009 | 14:50 | AGUAS DE SALTILLO | POZO -6 | 294625 | 2788089 | 268 | | 46 | | 243.71 | 1833.61 | 2076.71 | 7 | 21.5 | FM. AURORA | EN RESERVA |
| LOMAS DEL PINO-2 | 24/06/2009 | 10:15 | AGUAS DE SALTILLO | POZO -6 | 294625 | 2788089 | 268 | | | | 242.89 | 1833.61 | 2076.71 | 7.06 | 22.3 | FM. AURORA | PARADO |
| LOMAS DEL PINO-2 | 13/08/2009 | 14:30 | AGUAS DE SALTILLO | POZO -6 | 294625 | 2788089 | 268 | | 46 | | 245.17 | 1833.61 | 2076.71 | 7.03 | 21.9 | FM. AURORA | PARADO |
| LOMAS DEL PINO-2 | 08/09/2009 | 13:30 | AGUAS DE SALTILLO | POZO -6 | 294625 | 2788089 | 268 | | 52 | | 247.75 | 1833.61 | 2076.71 | | | FM. AURORA | PARADO |
| JAGUEY-1 | 09/01/2009 | 10:50 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 295589 | 2791842 | 257.2 | 550 | 29 | | 231.66 | 1836.17 | 2043.87 | 6.97 | 20.5 | FM. AURORA | PRODUCCIÓN |
| JAGUEY-1 | 18/06/2009 | 14:45 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 295589 | 2791842 | 257.2 | 550 | 27 | 210 | | 1836.17 | 2043.87 | 6.9 | 19.03 | FM. AURORA | EN RESERVA |
| JAGUEY-2 | 09/01/2009 | 12:30 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 294971 | 2791622 | 226.7 | 550 | 27 | | 204.46 | 1832.98 | 2038.63 | 6.9 | 21 | FM. TARAISES | PRODUCCIÓN |
| JAGUEY-2 | 18/06/2009 | 12:30 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 294971 | 2791622 | 226.7 | 550 | 44 | | 207.59 | 1832.98 | 2038.63 | 6.9 | 19.03 | FM. TARAISES | PRODUCCIÓN |
| JAGUEY-3 | 09/01/2009 | 11:40 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 294626 | 2791939 | 218 | 550 | 67 | | 196.25 | 1833.6 | 2028.63 | 7.04 | 20 | FM.CUPIDO | PRODUCCIÓN |
| JAGUEY-3 | 18/06/2009 | 13:15 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 294626 | 2791939 | 218 | 550 | | | 196.86 | 1833.6 | 2028.63 | 6.99 | 20 | FM.CUPIDO | PRODUCCIÓN |
| PUNTAS-1 | 15/01/2009 | 10:50 | AGUAS DE SALTILLO | POZO -8 | 291727 | 2787870 | 213 | | 49 | | 179.44 | 1837.51 | 2004.712 | 7 | 22.5 | FM.CUPIDO | POZO ACTIVO, AGUA FRÍA, DULCE |
| PUNTAS-1 | 24/06/2009 | 13:00 | AGUAS DE SALTILLO | POZO -8 | 291727 | 2787870 | 213 | | 42 | 167.96 | | 1837.51 | 2004.712 | | | FM.CUPIDO | POZO ACTIVO, AGUA FRÍA, DULCE |
| PUNTAS-2 | 15/01/2009 | 10:00 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-8 | 292087 | 2786965 | 215 | | | | 193.33 | 1836.04 | 1991.84 | 6.92 | 22.7 | FM.CUPIDO | POZO ACTIVO, AGUA FRÍA, DULCE |
| PUNTAS-2 | 11/06/2009 | 12:45 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-8 | 292087 | 2786965 | 215 | | 74 | 157.92 | 193.15 | 1836.04 | 1991.84 | | | FM.CUPIDO | POZO ACTIVO, AGUA FRÍA, DULCE |
| DIVISADERO 1 | 09/01/2009 | 10:00 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-6 | 293354 | 2792765 | 251.1 | 450 | 30 | | 212.2 | 1824.54 | 2024.48 | 6.93 | 23.6 | ZULOAGA | PRODUCCIÓN |
| DIVISADERO 1 | 18/06/2009 | 11:15 | AGUAS DE SALTILLO | POZO-6 | 293354 | 2792765 | 251.1 | 450 | 42 | 206.75 | | 1824.54 | 2024.48 | | | ZULOAGA | PRODUCCIÓN |
| DIVISADERO 2 | 05/01/2009 | 10:20 | AGUAS DE SALTILLO | POZO- | 291950 | 2791962 | | 450 | | 211.97 | | | | | | ZULOAGA | EN RESERVA |
| DIVISADERO 2 | 18/06/2009 | 11:45 | AGUAS DE SALTILLO | POZO- | 291950 | 2791962 | | 450 | | 209.17 | | | | | | ZULOAGA | EN RESERVA |

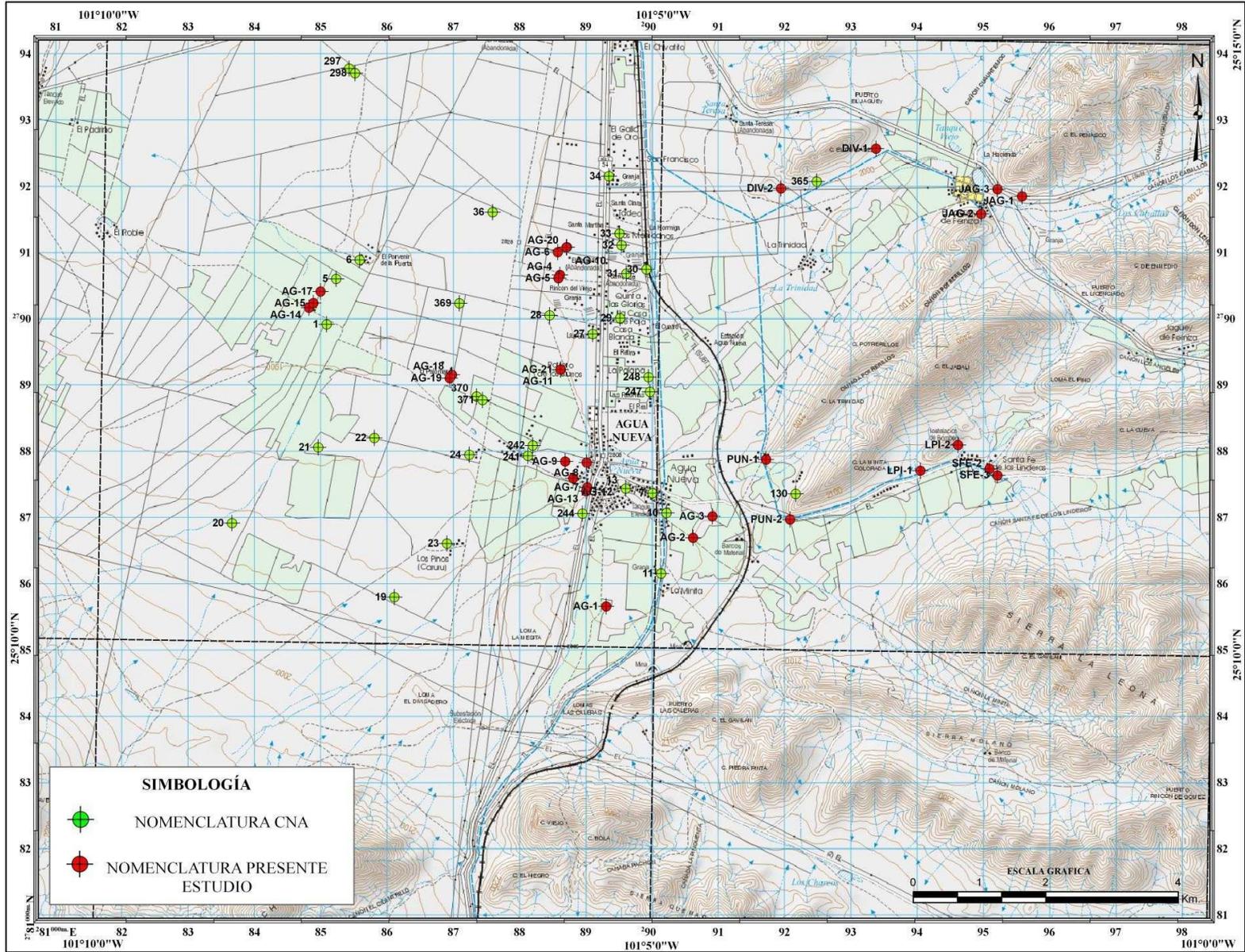


Figura IV.6.- Plano de localización de los pozos existentes en el área de estudio.

IV. 4.- Metodología hidrogeológica

En el presente trabajo se realizaron recorridos en todo el área de estudio, con la finalidad de documentar y actualizar el censo de los pozos. En cada pozo se midieron y registraron datos como: Localización, Clave, Tipo de aprovechamiento, Elevación del terreno, Nivel estático (N.E), Nivel Dinámico (N.D), pH, Temperatura y Gasto (Q) con escuadra. Figuras IV.7, IV.8 y IV.9.



Figura IV.7.- Medición del nivel estático y dinámico en el pozo Santa Fe 3. Con la sonda sonora.



Figura IV.8.- Medición del gasto con la escuadra en el pozo Jagüey 2, apoyado por personal de Aguas de Saltillo (AGSAL).

Para la medición del nivel estático se utilizó la zonda sonora marca Solinst (300 m. de longitud). En la localización de los pozos se usó el Gps Marca Garmin etrex vista, un altímetro digital para la medición de la elevación del terreno y un Ph-metro.

Para la zona del Valle se logro documentar 21 pozos, de los cuales 5 están activos y para el sector oriente (zona de Sierras) se documentaron un total de 11 pozos, todos activos, operados por la compañía AGSAL. (Figura IV.9 y IV.6).



Figura IV.9.- Localización de pozos AG-20 y tanque de emergencia II.

IV.5.- Carta hidrogeológica

Para la construcción de la carta hidrogeológica, se basó en los datos obtenidos del levantamiento del censo de los pozos como lo es la elevación del terreno y la profundidad del nivel estático y para ello se utilizó el método de triangulo hidrológico, que se basa en la interpolación lineal entre tres puntos de diferente elevación o nivel piezométrica.

En el presente estudio, se elaboraron 2 cartas hidrogeológicas correspondientes a los años de 2008 y 2009. (Anexo 2 y 3).

IV.5.1.-Profundidad del nivel estático

La profundidad del nivel estático es la distancia vertical desde la superficie del terreno hasta el nivel del agua subterránea y se mide desde la parte superior del brocal hasta el espejo del agua subterránea (CONAGUA 2000).

Los datos de los años 1998 y 2004 se recopilaron de CONAGUA (Actualización geohidrológica del acuífero Cañón del Derramadero, Coahuila. 2004), y de los años 2008 al 2009 se consultaron de los datos generados por la compañía paramunicipal de Aguas de Saltillo (AGSAL). Otra parte de la información se generó por el presente estudio Tabla IV.2.

Analizando los datos correspondientes de la profundidad del Nivel Estático (NE) durante los años de 1998 al 2009, se observó que está relacionada con la topografía y la columna estratigráfica del área. Es decir, que para el sector oriente del área de estudio (zona de caliza), los valores de más profundidad oscilaron entre 231.0 m a 243,87 m., destacando los pozos Lomas del Pino 2 y Santa Fe 3 respectivamente, dichos pozos tienen cota de 2076.71 msnm y 2074.19 msnm, cortaron caliza de la formación Aurora. Los valores de menor profundidad se presenta en el pozo Puntas 2, que mostró variación de 146.3 m a 161.13 m., la cota del pozo es de 1991.84 msnm y corto la caliza de la formación Cupido.

Para el sector poniente del área de estudio (zona del Valle), los valores máximos de la profundidad del nivel estático oscilaron entre 61.0 m y 97.65 m., específicamente el pozo DE-19, y los mínimos oscilaron entre los valores de 25.0 m a 37.24 m., datos corroborados por los pozos DE-23 y AG-13, cuyas cotas varían de 1864 a 1920 msnm respectivamente. En general la columna estratigráfica perforada por estos pozos abarca desde los sedimentos del coluvión (gravas y arenas) hasta las lutitas de la formación Parras (Figura IV.4).

Tabla IV.2. Profundidad del nivel estático (NE) de 1998 al 2009.

| POZOS | FECHA | PROPIEDAD | TIPO DIAMETRO (PULG.) | X | Y | LONGITUD DE COLUMNA | PROF.. TOTAL (m) | N.E. (m) 1998 | N.E. (m) 2004 | N.E. (m) 2008 | N.E. (m) 2009 |
|------------------|------------|----------------------|-----------------------------|--------|---------|---------------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| SANTA FE-2 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 295099 | 2787732 | 243.58 | 500 | 213.15 | 222 | 227.56 | 224.05 |
| SANTA FE-3 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 295217 | 2787634 | 270.2 | 550 | 229.34 | 239.97 | 243.87 | 240.43 |
| LOMAS DEL PINO-1 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 294055 | 2787701 | 233 | 500 | 198.02 | 210 | 214.15 | 210.6 |
| LOMAS DEL PINO-2 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 294625 | 2788089 | 268 | 500 | 231 | 243.1 | | 243.76 |
| JAGUEY-1 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 295589 | 2791842 | 257.2 | 550 | 194.33 | 207.7 | 216.95 | 210 |
| JAGUEY-2 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 294974 | 2791579 | 226.7 | 550 | 192.44 | 205.65 | | 206.32 |
| JAGUEY-3 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 295217 | 2791950 | 218 | 550 | 183.3 | 195.03 | 203.68 | 197.09 |
| PUNTAS-1 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 291727 | 2787870 | 213 | 500 | 156.75 | 167.2 | 177.6 | 167.96 |
| PUNTAS-2 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 292087 | 2786965 | 215 | 500 | 146.3 | 155.8 | 161.13 | 156.23 |
| DIVISADERO 1 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 293386 | 2792563 | 251.1 | 450 | 179.81 | 199.94 | 201.96 | 207.1 |
| DIVISADERO 2 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 291950 | 2791962 | 249 | 450 | | 187.72 | 200.17 | 211.97 |
| AG-1 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO | 289312 | 2785654 | | 100 | | 36.73 | | |
| AG-4 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO | 288614 | 2790657 | | | | | | |
| AG-5 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO | 288591 | 2790606 | | | | | | |
| AG-13 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO | 289012 | 2787394 | | | 37.24 | | | |
| AG-15 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO-3 | 284892 | 2790233 | | 100 | 41.86 | 43.18 | | |
| AG-18 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO | 286986 | 2789149 | | 100 | | 48.55 | 50.13 | 42.19 |
| DE-28 | 1998 -2009 | BACHOCO | POZO-3 | 288564 | 2790029 | | | | | 96.75 | |
| DE-50 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO-3 | 281396 | 2793548 | | 120 | | 32.56 | 29.27 | 20.79 |
| DE-23 | 1998 -2009 | CRFG | POZO | 287051 | 2786455 | | 100 | | 25 | 57 | 57.43 |
| DE-349 | 1998 -2009 | NIMEX | POZO | 288449 | 2795270 | | 400 | | 73 | 74.67 | 71.37 |
| DE-21 | 1998 -2009 | CRFG | POZO-4 | 285143 | 2787993 | | 300 | | | 68.1 | |
| DE-20 | 1998 -2009 | CRFG | POZO | 283892 | 2786801 | | 300 | | | 78.92 | 81.9 |
| DE-19 | 1998 -2009 | CRFG | POZO-2 | 286254 | 2785618 | | 200 | 61 | 78.86 | 97.65 | |

IV.5.2.-Niveles piezométricos

El nivel Piezométrico se refiere al nivel en que se encuentra el agua subterránea con respecto al nivel del mar.

La elevación del brocal se calculó con las cotas del terreno más la altura del brocal. Y para el cálculo del nivel piezométrico se restó la elevación del brocal del nivel estático.

El nivel piezométrico en el 2008, para la zona oriente, se tiene variaciones de 1799.83msnm a 1830.84 msnm. Donde las elevaciones más altas se presentan al oriente del área de estudio, básicamente en los pozos Loma del Pino 1, Puntas 2 y Santa Fe 3. Y la elevación más baja se presentan al noreste del área, manifestado por el pozo Divisadero 2, con un nivel piezométrico de 1799.83 msnm.

Con respecto a la zona del Valle, porción oeste del área de estudio, la elevación más alta se presentó en la zona sur del valle, con valor de 1880.58 msnm., en el pozo DE-23. La elevación menor de 1822.58 msnm., se presentó en el pozo DE-28, ubicado en la zona norte del Valle. Tabla IV.3.

Tabla IV.3.- Niveles piezométricos 2008.

| POZOS | CLAVE | X | Y | ELEVACIÓN BROCAL | 2008 N.E. | NIVEL PIEZOMÉTRICO |
|------------------|--------|--------|---------|---------------------|--------------|-----------------------|
| SANTA FE-2 | SFE-2 | 295099 | 2787732 | 2058.12 | 227.56 | 1830.56 |
| SANTA FÉ 3 | SFE-3 | 295217 | 2787634 | 2074.19 | 243.87 | 1829.93 |
| LOMAS DEL PINO-1 | LPI-1 | 294055 | 2787701 | 2044.99 | 214.15 | 1830.84 |
| JAGUEY-1 | JAG-3 | 295589 | 2791842 | 2043.87 | 216.95 | 1826.92 |
| JAGUEY-3 | JAG-2 | 295217 | 2791950 | 2028.63 | 203.68 | 1824.95 |
| PUNTAS-1 | PUN-1 | 291727 | 2787870 | 2,005 | 177.6 | 1827.4 |
| PUNTAS-2 | PUN-2 | 292087 | 2786965 | 1991.84 | 161.13 | 1830.71 |
| DIVISADERO 1 | DIV-1 | 293386 | 2792563 | 2024.48 | 201.96 | 1822.52 |
| DIVISADERO 2 | DIV-2 | 291950 | 2791962 | 2000 | 200.17 | 1799.83 |
| AG-18 | AG-18 | 286986 | 2789149 | 1908.3 | 50.13 | 1858.17 |
| DE-28 | DE-28 | 288564 | 2790029 | 1919.33 | 96.75 | 1822.58 |
| DE-50 | DE-50 | 281396 | 2793548 | 1864 | 29.27 | 1834.73 |
| DE-23 | DE-23 | 287051 | 2786455 | 1937.58 | 57 | 1880.58 |
| DE-349 | DE-349 | 288449 | 2795270 | 1908 | 74.67 | 1833.33 |
| DE-21 | DE-21 | 285143 | 2787993 | 1917.97 | 68.1 | 1849.87 |
| DE-20 | DE-20 | 283892 | 2786801 | 1947.3 | 78.92 | 1868.38 |
| DE-19 | DE-19 | 286254 | 2785618 | 1952 | 97.65 | 1854.35 |

El nivel piezométrico del año 2009, para la zona de caliza, nos muestra también variaciones, siendo el pozo Puntas 1, él que registró la mayor elevación que es de 1788.03

msnm., y el de menor elevación está dado por el pozo Divisadero 2, que es de 1836.75 msnm.

De igual manera para la zona del Valle, se presenta dos valores del nivel piezométrico, un máximo y un mínimo. El máximo se manifiesta en el pozo AG-13, localizado en el centro del área de estudio, con una elevación 1889.28 msnm., y el mínimo de 1836.63 msnm., lo presenta el pozo DE-349 ubicado fuera del área de estudio, cercano al límite norte, Tabla IV.4.

Tabla IV.4.- Niveles piezométricos 2009.

| POZOS | CLAVE | X | Y | ELEVACIÓN BROCAL | 2009 N.E. | NIVEL PIEZOMÉTRICO |
|------------------|--------|--------|---------|---------------------|--------------|-----------------------|
| SANTA FE-2 | SFE-2 | 295099 | 2787732 | 2058.12 | 224.05 | 1834.07 |
| SANTA FÉ 3 | SFE-3 | 295217 | 2787634 | 2074.19 | 240.43 | 1833.76 |
| LOMAS DEL PINO-1 | LPI-1 | 294055 | 2787701 | 2044.99 | 210.6 | 1834.39 |
| LOMAS DEL PINO-2 | LPI-2 | 294625 | 2788089 | 2076.71 | 243.76 | 1832.95 |
| JAGUEY-1 | JAG-1 | 295589 | 2791842 | 2043.87 | 210 | 1833.87 |
| JAGUEY-2 | JAG-2 | 294974 | 2791579 | 2038.63 | 206.32 | 1832.31 |
| JAGUEY-3 | JAG-3 | 295217 | 2791950 | 2028.63 | 197.09 | 1831.54 |
| PUNTAS-1 | PUN-1 | 291727 | 2787870 | 2004.71 | 167.96 | 1836.75 |
| PUNTAS-2 | PUN-2 | 292087 | 2786965 | 1991.84 | 156.23 | 1835.61 |
| DIVISADERO 1 | DIV-1 | 293386 | 2792563 | 2024.48 | 207.1 | 1817.38 |
| DIVISADERO 2 | DIV-2 | 291950 | 2791962 | 2000 | 211.97 | 1788.03 |
| AG-13 | AG-13 | 289012 | 2787394 | 1920 | 30.72 | 1889.28 |
| DE-28 | DE-28 | 288564 | 2790029 | 1919.33 | 78.81 | 1840.52 |
| AG-18 | AG-18 | 286986 | 2789149 | 1908.3 | 42.19 | 1866.11 |
| DE-50 | DE-50 | 281396 | 2793548 | 1864 | 20.79 | 1843.21 |
| DE-23 | DE-23 | 287051 | 2786455 | 1937.58 | 57.43 | 1880.15 |
| DE-349 | DE-349 | 288449 | 2795270 | 1908 | 71.37 | 1836.63 |
| DE-20 | DE-20 | 283892 | 2786801 | 1947.3 | 81.9 | 1865.4 |

IV.5.3.-Evolución del nivel piezométrico

La evolución del nivel piezométrico en el periodo 1998 a 2009, para la zona de caliza, registró un abatimiento máximo de 27.29 m para el pozo Divisadero 1 y un abatimiento mínimo de 9.93 en el pozo Puntas 2. En general se observó abatimientos considerables en todos los pozos para esta zona. Ver Tabla IV.5.

Para este mismo periodo, pero para la zona del Valle, se registro un abatimiento máximo de 36.65 m en el pozo DE-19, y un mínimo de 1.32 en el pozo AG-13. Sin embargo, también hubo recuperación en 2 pozos: AG-18 con 6.36 m., y DE-50 con 11.77 m. Analizando en general la información de los 13 pozos, se observa que 4 de ellos tuvieron abatimientos, 3 se recuperaron y 6 que no tuvieron referencia de datos para compararlos. Tabla IV.5.

En el 2008, los pozos de la zona de caliza, se recuperaron de 3 m a 8m en su Nivel Estático, y en el 2009 se recuperaron de 1.0 m a 6.50 m.

Tabla IV.5.- Evolución nivel piezométrico general 1998-2009.

| POZOS | FECHA | PROPIEDAD | TIPO DIAMETRO (PULG.) | X | Y | LONGITUD DE COLUMNA | PROF. TOTAL (m) | N.E. (m) 1998 | N.E. (m) 2004 | N.E. (m) 2008 | N.E. (m) 2009 | EVOLUCIÓN 1998-2009 |
|------------------|------------|----------------------|-----------------------------|--------|---------|---------------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------|
| SANTA FE-2 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 295099 | 2787732 | 243.58 | 500 | 213.15 | 222 | 227.56 | 224.05 | -10.9 |
| SANTA FE-3 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 295217 | 2787634 | 270.2 | 550 | 229.34 | 239.97 | 243.87 | 240.43 | -11.09 |
| LOMAS DEL PINO-1 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 294055 | 2787701 | 233 | 500 | 198.02 | 210 | 214.15 | 210.6 | -12.58 |
| LOMAS DEL PINO-2 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 294625 | 2788089 | 268 | 500 | 231 | 243.1 | | 243.76 | -12.76 |
| JAGUEY-1 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 295589 | 2791842 | 257.2 | 550 | 194.33 | 207.7 | 216.95 | 210 | -15.67 |
| JAGUEY-2 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 294974 | 2791579 | 226.7 | 550 | 192.44 | 205.65 | | 206.32 | -13.88 |
| JAGUEY-3 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 295217 | 2791950 | 218 | 550 | 183.3 | 195.03 | 203.68 | 197.09 | -13.79 |
| PUNTAS-1 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 291727 | 2787870 | 213 | 500 | 156.75 | 167.2 | 177.6 | 167.96 | -11.21 |
| PUNTAS-2 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 8 | 292087 | 2786965 | 215 | 500 | 146.3 | 155.8 | 161.13 | 156.23 | -9.93 |
| DIVISADERO 1 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 293386 | 2792563 | 251.1 | 450 | 179.81 | 199.94 | 201.96 | 207.1 | -27.29 |
| DIVISADERO 2 | 1998 -2009 | AGUAS DE SALTILLO | POZO - 6 | 291950 | 2791962 | 249 | 450 | | 187.72 | 200.17 | 211.97 | -24.25 |
| AG-1 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO | 289312 | 2785654 | | 100 | | 36.73 | | | |
| AG-4 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO | 288614 | 2790657 | | | | | | | |
| AG-5 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO | 288591 | 2790606 | | | | | | | |
| AG-13 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO | 289012 | 2787394 | | | 37.24 | | | | |
| AG-15 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO-3 | 284892 | 2790233 | | 100 | 41.86 | 43.18 | | | -1.32 |
| AG-18 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO | 286986 | 2789149 | | 100 | | 48.55 | 50.13 | 42.19 | 6.36 |
| DE-28 | 1998 -2009 | BACHOCO | POZO-3 | 288564 | 2790029 | | | | | 96.75 | | |
| DE-50 | 1998 -2009 | CNA-CONAGUA | POZO-3 | 281396 | 2793548 | | 120 | | 32.56 | 29.27 | 20.79 | 11.77 |
| DE-23 | 1998 -2009 | CRFG | POZO | 287051 | 2786455 | | 100 | | 25 | 57 | 57.43 | -32.43 |
| DE-349 | 1998 -2009 | NIMEX | POZO | 288449 | 2795270 | | 400 | | 73 | 74.67 | 71.37 | 1.63 |
| DE-21 | 1998 -2009 | CRFG | POZO-4 | 285143 | 2787993 | | 300 | | | 68.1 | | |
| DE-20 | 1998 -2009 | CRFG | POZO | 283892 | 2786801 | | 300 | | | 78.92 | 81.9 | -2.98 |
| DE-19 | 1998 -2009 | CRFG | POZO-2 | 286254 | 2785618 | | 200 | 61 | 78.86 | 97.65 | | -36.65 |

En general con la configuración de la carta hidrogeológica (2008-2009) definida con base a la configuración del nivel piezométrica (Anexo 2 y 3), podemos analizar lo siguiente:

a).- El gradiente Piezométrico (i) calculado para el año 2008 presenta un valor medio igual a 0.014 y para el año 2009 un valor medio de 0.008.

b).- En cuanto a las líneas de isopiezas, se nota cierta semejanza en la configuración para los años 2008 y 2009, en donde vemos primeramente, que existe un cono de abatimiento en la configuración de ambos casos, fenómeno que posiblemente sea por la sobre explotación de los pozos de esa zona. Por otro lado se observa también que hacia la zona del valle las curvas adquieren más distancias entre si, cosa que podría indicarnos un cambio de

permeabilidad según la ley de DARCY, o un cambio de espesor del acuífero. Werner (1996). Y para el caso del área indica que es un cambio en la permeabilidad, dado que la secuencia estratigráfica así lo confirma (formación Parras).

c).- La dirección del flujo del agua subterránea para el año 2008, se manifiesta con dirección de sur a norte hacia la zona del valle, es paralelo con los flujos de las corrientes superficiales. Para la zona oriente, la dirección del flujo subterráneo adquiere otro rumbo, que es sensiblemente de este a oeste. Cabe destacar que en este sector, es donde se forma el cono de abatimiento mencionado párrafos arriba. De igual forma para el año 2009 los flujos se comportan casi idénticos en cuanto a las direcciones, con la salvedad de que en el sector oeste del área (zona del Valle), existen un flujo subterráneos que toman dirección hacia al noroeste. En ambas carta hidrogeológicas, la zona de recarga se localiza al pie de la Sierra Madre y su zona de descarga en la zona del Valle.

d).- Para la zona oriente y sur del área de estudio, los niveles piezométricos, se encuentran en los acuíferos confinados de tipo grietas y cárstico, conformados por las formaciones Zuloaga, Cupido y Aurora, y para la zona del Valle el acuífero es de tipo fracturado y está representada por las lutitas y algo de areniscas de la formación Parras.

IV.6. Zonas potenciales hidrogeológicas

El estudio de las características litológicas, estructurales, del comportamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico del área de estudio, permitió definir 3 zonas potenciales hidrogeológicas, denominadas: Santa Fe, Los Ángeles y el Molano. (Anexo 3)

Zona Santa Fe.- Zona que se localiza en la parte noreste del área de estudio, se definió la zona, porque ser un flanco de un anticlinal, que estructuralmente es favorables para el flujo y almacenamiento del agua subterránea; sobre la caliza de la formación Cupido por ser el nivel hidrogeológico intermedio reconocido en el área, por manifestarse como un acuífero de fracturas y cárstico, la permeabilidad, porosidad y almacenamiento es buena y su calidad de agua subterránea es buena para el consumo humano, ya que sus contenidos de Sodio,

Cloruro, Sulfato, nitrato y Solidos Totales Disueltos están por debajo de los valores permisibles por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 1994 (2000). La profundidad programada para los pozos es de 550 m.

Zona Los Ángeles.- Se localiza en la porción noreste del área, se propuso el sitio en el flanco de un anticlinal, en cuyo núcleo aflora la caliza de la formación Aurora, que es una roca almacenadora, con buena permeabilidad y porosidad, se comporta como un acuífero de fracturas. La profundidad programada del pozo es de 550 m.

Zona Molano.- Es una zona localizada al sureste del área de estudio y es un punto potencial para perforar sobre la caliza de la formación Zuloaga, que es el nivel inferior hidrogeológico de los tres niveles reconocidos en el área de estudio, la formación se comporta como un acuífero de grietas y cárstico, la caliza presenta muy buena permeabilidad, porosidad y almacenamiento. La profundidad propuesta para el pozo es de 550 m.

V.- HIDROGEOQUÍMICA

La hidrogeoquímica es la compilación de varias ciencias, tales como la química del agua, que concierne al estudio de los procesos y reacciones químicas que afectan la distribución y circulación de especies disueltas en aguas naturales, combinada con la geología y la biología, debido a que durante el ciclo hidrológico el agua interactúa directamente con la biosfera. (Carrillo-Chávez 2007).

Dada su importancia en la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas se mencionará brevemente el concepto de sistema de flujo de agua subterránea y su interacción con el medio geológico.

El sistema de flujo de agua subterránea se define como una unidad tridimensional y coherente que presenta un área de recarga y una o varias de descarga (Toth, 1963; Doménico, 1972).

Tóth (1999) propuso un esquema de la distribución del flujo del agua subterránea en una cuenca idealizada, que incluye algunos parámetros hidrogeológicos típicos y fenómenos naturales asociados. En esta sección esquemática se explica la clasificación del sistema de flujo subterráneo en sistema de tipo: local, intermedio y regional. (Figura V.1).

El sistema local de flujo subterráneo se refiere a que el área de recarga es un alto topográfico y su área de descarga es un bajo. El sistema intermedio de flujo es el que su área de recarga y descarga se puede localizar entre varias zonas de elevaciones o de zonas bajas dentro de la cuenca y el sistema regional de flujo subterráneo es cuando su área de recarga se localiza en el parteaguas y su área de descarga se emplaza en la parte central de la cuenca (Tóth, 1999).

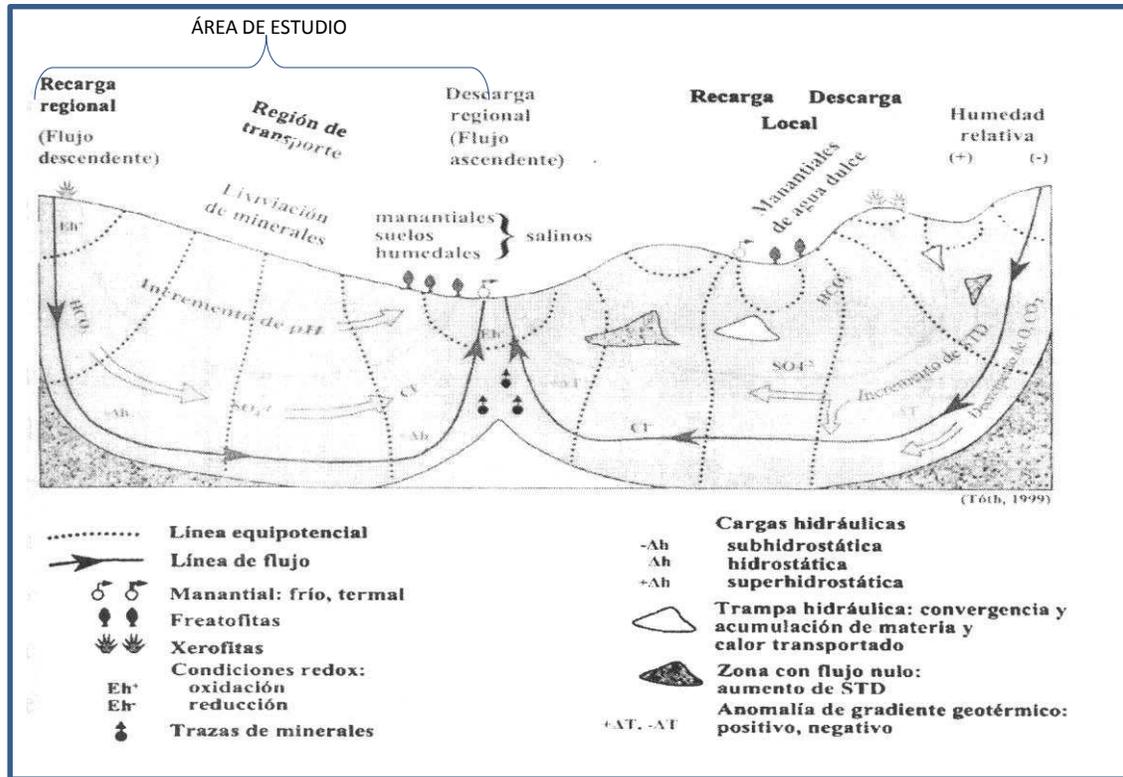


Figura V.1.- Efectos y manifestaciones de flujo controlado por gravedad en una cuenca regional no confinada (Tomada de Navarro de León, 2005; modificada de Tóth, 1999).

De acuerdo con los autores (Freeze y Cherry, 1979; Werner, 1996) cada sistema de flujo de agua subterránea indistintamente del tipo, está integrado por tres elementos: (a) zona de recarga, caracterizada por registrar altas presiones hidráulicas, (b) zona de transferencia, donde la energía mecánica del agua es invariante con la profundidad y por consecuencia el flujo es preferentemente lateral y (c) zona de descarga, zona de presión hidráulica baja, que origina un flujo ascendente. (Garza Castillo (2006).

Las dos causas fundamentales por el papel activo de las aguas subterráneas en la naturaleza son: su capacidad para interactuar con el medio ambiente y la distribución espacial del flujo.

Tóth (1999) menciona que existen tres tipos principales de interacciones entre aguas subterráneas y medio ambiente, con ciertos procesos particulares para cada tipo: (1) Interacción Química (disolución, hidratación hidrolisis, oxidación y reducción, ataque químico, precipitación, intercambio iónico, reducción de sulfatos, concentración,

ultrafiltración y ósmosis); (2) Interacción física (lubricación y modificación de presiones y (3) Interacción Cinética (transporte de agua, materia acuosa y no acuosa y calor).

V.1.- Muestreo y análisis del agua subterránea

El agua que se encuentra en los acuíferos, provienen principalmente de la lluvia, la cual al precipitarse sobre la superficie terrestre, parte de ella se infiltra a través de las fracturas o intersticios de la roca. Al circular en el subsuelo entra en contacto con diferentes tipos de rocas, disolviendo los minerales y sales que la componen, cambiando con esto su composición (Lesser y Asociados, 2004). Es por eso, la importancia de la interpretación de la química del agua subterránea.

Las características hidrgeoquímicas del agua se obtuvieron a partir de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos de muestras de aguas que se tomaron en 8 pozos, que fueron seleccionados de tal forma que representaran al área de estudio. El muestreo se realizó en un solo periodo en el mes de mayo del 2010, consiguiendo muestrear 6 pozos en la zona de caliza y 2 pozos en la zona del valle. (Figura V.10). Para el muestreo de los pozos, se contó con la asistencia técnica de personal de la Compañía COMIMSA.

En cada pozo muestreado, se dejaba bombear una determinada cantidad de agua para asegurar que la muestra fuera la del agua subterránea. Antes de llenarse, los envases de vidrio se enjuagaban tres veces con la misma agua subterránea. Posteriormente se obtuvieron 2 muestras de agua en envase de vidrio de un litro y 4 bolsitas de plástico de 100 ml., también se midieron in situ la temperatura y el pH. Las muestras obtenidas se guardaron en una hielera, y al finalizar el muestreo se llevaron al laboratorio de COMIMSA, ubicado en Saltillo Coah., y el de CINVESTAV, localizado en Ramos Arizpe, Coah. (Figura V.2).



Figura V.2.- Muestreo del agua del pozo Santa Fe 3, personal de COMIMSA.

Las muestras para sus análisis físico-químico y bacteriológico se enviaron al laboratorio de COMIMSA S.A. de C.V., y para los análisis de metales pesados se enviaron al laboratorio de CINVESTAV. Estos laboratorios cumplen con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (2000) (Figura V.3).



Figura V.3.- Preparación de las muestras para los análisis geoquímicos. Laboratorio de geoquímica COMIMSA S.A. de C.V.

La metodología usada para los análisis químicos se define en la siguiente Tabla V.1.

Tabla V.1.- Método empleado en el laboratorio para el análisis hidrogeoquímico de las muestras.

| Determinación | Método | Norma Oficial Mexicana |
|--|------------------------|------------------------|
| Conductividad eléctrica ($\mu\text{mhos/cm}$) | Conductivímetro | NOM-AA-093-SCFI-2000 |
| Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Termómetro de mercurio | NOM-AA-007-SCFI-2000 |
| pH | pHímetro | NOM-AA-008-SCFI-2000 |
| Dureza Magnesio como CaCO_3 | Método volumétrico | NOM-AA-072-SCFI-2000 |
| Dureza del Calcio como CaCO_3 | | |
| Dureza total como CaCO_3 | | |
| Alcalinidad total como CaCO_3 | Método volumétrico | NOM-AA-036-SCFI-2001 |
| Cloruros (Cl^-) | Método volumétrico | NOM-AA-073-SCFI-2000 |
| Sulfatos (SO_4^{2-}) | Método gravimétrico | NMX-AA-074-1981 |
| Sólidos Totales | Método gravimétrico | NOM-AA-034-SCFI-2001 |
| Sólidos Suspendidos Totales | | |
| Sólidos disueltos | | |
| Nitratos (como nitrógeno) | Absorción Atómica | NMX-AA-051-SCFI-2001 |
| Fosfato | | |
| Nitrógeno Amoniacal | | |
| Zinc | | |
| Sodio | | |
| Potasio | | |
| Plata | | |
| Cromo | | |
| Cobre | | |
| Aluminio | | |
| Cadmio | | |
| Magnesio | | |
| Plomo | | |
| Fierro | | |

Los resultados de los análisis físicos químicos, bacteriológicos y minerales pesados se muestran en las Tablas V.2 y V.4.

Tabla V.2.- Resultados del análisis fisicoquímico del muestreo.

| RESULTADOS FISICOQUÍMICOS DEL MUESTREO DE POZOS DEL ÁREA DE ESTUDIO (valores en mg/L, excepto el pH). | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|------|-------------|------|-----|----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|
| POZO | CLAVE | T °C | ALCALINIDAD | STD | PH | K ⁺ | Na ⁺ | Mg ⁺² | Cl ⁻ | Ca ⁺² | SO ₄ | NO ₃ ⁻ | HCO ₃ ⁻ | CO ₃ | D. Ca | D.Mg | D.T |
| SANTA FE-2 * | SFE-2 | 22.1 | 319.61 | 536 | 7.8 | | | 25.37 | 24 | 96 | 12 | 8.53 | 387.5 | 1.205 | | | 0 |
| SANTA FE-3 ** | SFE-3 | 23.1 | 288 | 434 | 7.3 | 0.88 | 11.21 | 26.91 | 19.2 | 86.72 | 31.6 | 8.13 | 350.7 | 3.38 | 216.8 | 110.6 | 327.4 |
| LOMAS DEL PINO -1 ** | LPI-1 | 21.5 | 237.6 | 366 | 7.3 | 0.8 | 6.76 | 29.13 | 2.9 | 63.72 | 144 | 1.26 | 289.3 | 0.284 | 159.3 | 123.9 | 283.2 |
| JAGUEY-2 ** | JAG-2 | 19 | 244.4 | 376 | 7.4 | 0.86 | 7.56 | 26.99 | 7.4 | 69.04 | 50.6 | 2.93 | 297.4 | 0.368 | 172.7 | 110.6 | 283.3 |
| JAGUEY-3 ** | JAG-3 | 21 | 230.4 | 582 | 7.2 | 0.92 | 8.15 | 30.23 | 47.3 | 63.72 | 26.34 | 6.81 | 280.6 | 0.219 | 159.3 | 119.4 | 278.7 |
| PUNTAS-1 * | PUN-1 | 21.5 | 313.42 | 493 | 7.8 | | | 22.44 | 20 | 92.8 | 7.6 | 3.99 | 380 | 1.81 | | | 0 |
| PUNTAS-2 ** | PUN-2 | 22.7 | 244.8 | 348 | 7.5 | 0.81 | 6.98 | 45.33 | 10.3 | 40.72 | 55.5 | 3.93 | 297.8 | 0.464 | 101.8 | 185.8 | 287.6 |
| DIVISADERO-1 ** | DIV-1 | 23.6 | 180 | 666 | 7.3 | 1.28 | 13.12 | 24.79 | 13.2 | 111.6 | 60 | 4.66 | 219.2 | 0.216 | 278.9 | 101.6 | 380.5 |
| AG-13 ** | AG-13 | 21 | 230.4 | 582 | 7.2 | 0.92 | 8.15 | 43.19 | 47.3 | 74.32 | 26.34 | 26.81 | 280.6 | 0.219 | 185.8 | 177 | 362.8 |
| AG-20 ** | AG-20 | 19 | 223.2 | 380 | 8.3 | 0.77 | 135.3 | 5.394 | 16.2 | 7.08 | 58.8 | 1.793 | 267 | 2.625 | 17.7 | 22.11 | 39.81 |
| Limite Máximo permitido (LMP)-NOM-127-SSA1 | | | | 1000 | | | 200 | | 250 | | 400 | 10 | | | | | |
| LMP,WHO 1994(Organización Mundial de la salud) | | | | | | | 200 | 150 | | 200 | 400 | | | | | | |

STD= Solidos Totales Disueltos

D.Ca= Dureza de Calcio como CaCO₃

D.Mg= Dureza de Magnesio como CaCO₃

D:T= Dureza total como CaCO₃

* Análisis de AGSAL

** Análisis COMIMSA Y CINVESTAV

La tabla de resultados fisicoquímicos nos muestra la distribución de los contenidos máximos y mínimos de los siguientes parámetros:

Temperatura.- Se presenta valores de contenido de 19 °C a 23.6 °C., los valores máximos se obtuvieron en los pozos Divisadero 1 y Santa Fe 3 y el mínimo en los pozos AG-20 y Jaguey 2.

PH.- Se registra valores de 7.2 a 8.3., el máximo lo registro el pozo AG-20. En promedio el valor es de 7.1

Calcio.- Los valores de Contenido son 7.08 mg/l a 111.6 mg/l, este último reportado en el pozo Divisadero 1, la presencia de este elemento se debe a la interacción del agua con la caliza en la cual se diluye a la calcita.

Magnesio.- El contenido es de 5.39 mg/l a 45.33mg/l, los pozos con más contenido de magnesio son: el AG-13 y Puntas 2, la fuente de este ión está en la caliza y la dolomita de las formaciones sedimentarias. Las sales de calcio y magnesio son las que se deben principalmente a la dureza del agua.

Sodio.- El máximo contenido, con 135.3 mg/l de sodio, lo registró el pozo AG-20, localizado en la zona del Valle, y el valor mínimo de 6.76 mg/l se registró en el pozo Loma del pino 1. Una fuente principal de este elemento es la dilución de horizontes evaporíticos.

Sulfatos.- El valor máximo reportado de 144 mg/l de este anión, corresponde al pozo Lomas del Pino 1, ubicado en la zona de caliza, y el mínimo de 7.6 mg/l, registrado en el pozo Puntas 1. Se origina de las evaporitas (yeso), actividades urbanas y agrícolas Werner, (1996).

Nitratos.- La mayor concentración se presentó en el Pozo AG-13, con un valor de 26.81 mg/l, que obviamente sobrepasa a los (LMP), y en el pozo AG-20 se registró el mínimo de 7.08 mg/l. Estos pozos se localizan en la zona del Valle, cercanos a la zona urbana y

centros agrícolas. La mayor parte de los nitratos de las aguas subterráneas naturales tiene un origen orgánico Werner, (1996).

Sólidos totales disueltos.- Los sólidos totales disueltos (STD) es una medida representativa de la salinidad total del agua subterránea y consiste en el residuo seco después de evaporación a 110° C (Lesser y Asociados, 2004; Werner 1996).

La calidad del agua se define por la concentración de sus constituyentes químicos, los que a su vez determinan una gama de usos potenciales, como se puede ver en la Tabla V.3

Tabla V.3.- Calidad del agua con base a la concentración de solidos totales disueltos. (Arizabalo y Díaz, 1997).

| Calidad del agua por concentración de constituyentes químicos | |
|---|----------------------------------|
| Categoría | Sólidos totales disueltos (mg/1) |
| Agua fresca | 0 - 1000 |
| Agua fresca | 1,000-10,000 |
| Agua oceanica | 10,000-100,000 |
| Agua de Salmuera | más de 100,000 |

Normalmente el Total de Sólidos Disueltos no debe sobrepasar a 1000mg/l en agua potable y a 3000mg/l en agua de riego Werner, (1996).

Los valores de (STD) reportadas para las muestras obtenidas en la zona de caliza, varían de 348 a 666 mg/l, y para las muestras tomadas en la zona del valle presentan un rango de 380 a 582 mg/l. Los valores más altos están en los pozos ubicados en la caliza, sobre todo en el pozo del Divisadero1 con 666 mg/l, Jaguey con 582 mg/l y Santa Fe 2 con 536 mg/l. Los valores bajos están representados por el pozo AG-20, ubicado en la zona del valle, Sin embargo, también se tiene valores bajos en los pozo puntas 2, con 348 mg/l y Lomas del Pino 1 con 366 mg/l.

Con el plano de configuración (Figura V.4). Se puede ver que en general, los valores bajos de sólidos totales disueltos se ubican hacia el sur de la zona del Valle y al sureste de la zona de caliza, indicando con esto, que estas áreas son las zonas de recarga de agua al acuífero. Los valores de concentración se incrementan en dirección al centro del Valle y también hacia el noreste.

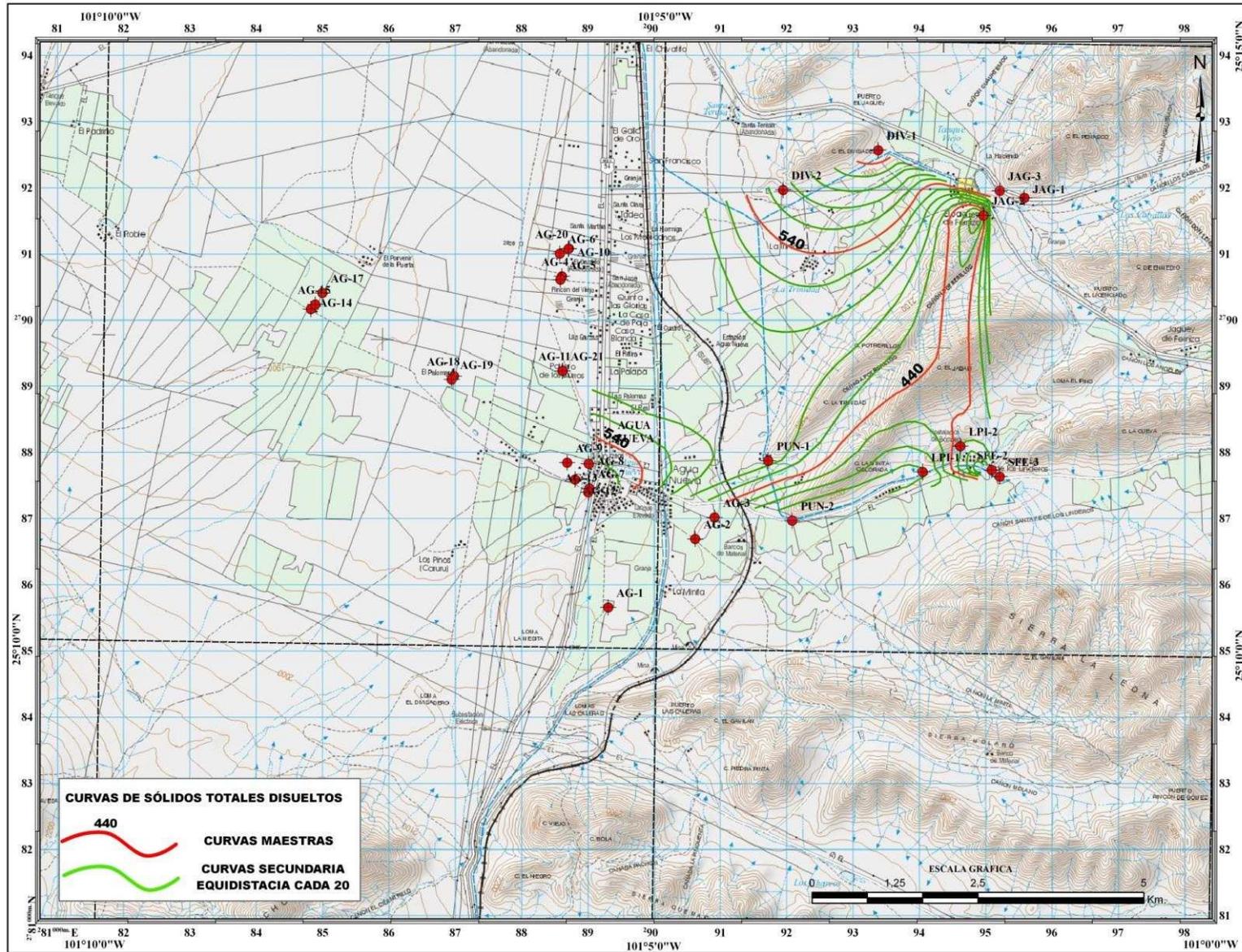


Figura V.4.- Plano de configuración de los contenidos de sólidos totales disueltos para el año 2010.

Conductividad eléctrica (CE).- Se midió la conductividad eléctrica del agua de los pozos, la cual es una medida indirecta de su salinidad. Tabla V.4.

Tabla V.4.- Resultados de los análisis bacteriológicos y minerales pesados

| | | UMHOS/cm | mg/l | mg/l | NMP/100m | NMP/100m | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
|--|--------------|---------------|-----------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| NOMBRE | CLAVE | Conductividad | Solidos suspendidos totales | Solidos disueltos | Coliformes Totales | Coliformes Fecales | Zn | Ag | Cr | Cu | Al | Cd | Fe | Pb |
| SANTA FE - 3 | SFE-3 | 681 | 2 | 432 | Ausencia | Ausencia | 0.006 | 0.01 | 0.02 | 0 | 0.15 | 0 | 0.02 | 0.01 |
| LOMA DEL PINO 1 | LPI-1 | 579 | 2 | 364 | 2 | Ausencia | 0.006 | 0.01 | 0.02 | 0 | 0.15 | 0 | 0.02 | 0.01 |
| JAGUEY-2 | JAG-2 | 504 | 4 | 372 | Ausencia | Ausencia | 0.007 | 0.01 | 0.02 | 0 | 0.15 | 0 | 0.02 | 0.01 |
| JAGUEY-3 | JAG-3 | 608 | 16 | 374 | Ausencia | Ausencia | 0.007 | 0.01 | 0.02 | 0 | 0.15 | 0 | 0.02 | 0.01 |
| PUNTAS -2 | PUN-2 | 591 | 2 | 346 | Ausencia | Ausencia | 0.009 | 0.01 | 0.02 | 0 | 0.15 | 0 | 0.02 | 0.01 |
| DIVISADERO 1 | DIV-1 | 881 | 1 | 665 | Ausencia | Ausencia | 0.018 | 0.01 | 0.02 | 0 | 0.15 | 0 | 0.02 | 0.01 |
| AG-13 | AG-13 | 803 | 6 | 576 | 4 | Ausencia | 0.559 | 0.01 | 0.02 | 0 | 0.15 | 0 | 0.02 | 0.01 |
| AG-20 | AG-20 | 571 | 6 | 374 | Ausencia | Ausencia | 0.005 | 0.01 | 0.02 | 0 | 0.15 | 0 | 0.02 | 0.01 |
| Limite Máximo permitido (LMP)-NOM-127-SSA1 1994(2000) | | | | 1000 | 0 | 0 | 5 | | 0.05 | 2 | 0.2 | 0.01 | 0.3 | 0.01 |
| LMP,WHO 1994 (Organización Mundial de la salud) | | | | | 0 | 0 | 3 | | 0.05 | | | | | 0.01 |

Se realizó una configuración con los valores obtenidos del laboratorio de la conductividad eléctrica del muestreo de agua realizado en el año 2010 (Figura V.5).

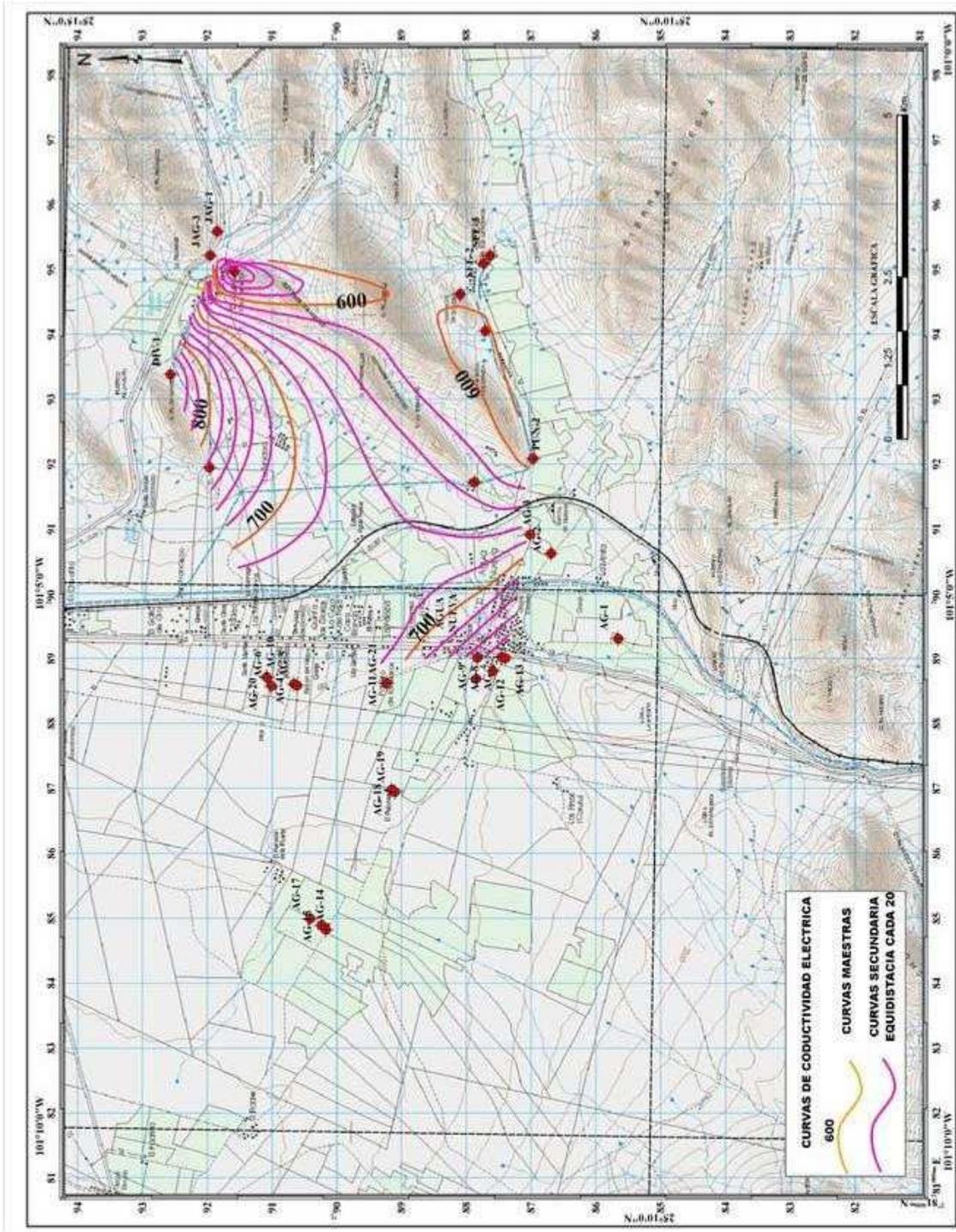


Figura V.5.- Plano de configuración de los valores de conductividad eléctrica (CE).

La configuración de la Conductividad Eléctrica, manifiesta una similitud con respecto a la configuración realizada para los sólidos totales disueltos; ya que, los valores bajos de la conductividad también se localizan al sur del Valle y en la zona de caliza. De igual manera el incremento de valores se hace con dirección al centro del Valle y al norte de la misma. La similitud de la configuración de estos dos parámetros también se asemeja o coinciden con el flujo subterráneo marcado en la carta hidrogeológica.

De tal forma que la conductividad eléctrica máxima se registra en los Pozos: Divisadero 1 (881 mhos/cm), AG-3 (803 mhos/cm) y Santa Fe 3 (681 mhos/cm). Probablemente el valor máximo de conductividad registrada en el Pozo Divisadero 1 sea por los horizontes interstratificados de yeso contenidos en la secuencia de caliza de la formación Zuloaga.

Metales Pesados.- Los elementos que se analizaron fueron: zinc, plata, cromo, cadmio, fierro y plomo. Los valores reportados por el laboratorio de estos elementos, son concentraciones muy bajas, por lo que no rebasan los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y la World Health Organization (WHO-2000), que son las que regulan los límites máximos permitidos para la calidad del agua para uso doméstico y agrícola Tabla V.4.

V.2.- Familias de agua

Para la clasificación de las familias de agua subterránea, se consideraron los resultados obtenidos de los análisis químicos y su balance iónico Tabla V. 5. y el diagrama de Piper (Figura V.6).

La utilidad del diagrama de Piper, es que se puede representar muchos análisis en un mismo gráfico, facilitando la comparación y clasificación de las aguas, sin dar origen a confusiones. Las aguas químicamente semejantes se encontrarán agrupadas, y pueden clasificarse por su ubicación en el diagrama y establecer sus relaciones genéticas.

Tabla V.5.- Resultados del análisis químico y balance iónico del muestreo.

| Resultados de los análisis químicos en meq/l y balance ionico | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-----------------------------|-----------------------------|------------|----------------------------|-----------------|--|------------|---|-----------------------------|----------------------------|-----------------|
| POZO | CLAVE | Ca ²⁺ (meq/l) | Mg ²⁺ (meq/l) | K+ (meq/l) | Na ⁺ (meq/l) | Na+K (meq/l) | HCO ₃ ⁻ (meq/l) | Cl (meq/l) | SO ₄ ⁼ (meq/l) | SUMA CATIONES (meq/l) | SUMA ANIONES (meq/l) | ERROR % mg/l |
| SANTA FE-2 | SFE-2 | 4.79 | 2.08 | | | | 6.35 | 0.393 | 0.125 | 6.8700 | 6.8680 | 0.01 |
| SANTA FE-3 | SFE-3 | 4.327 | 2.22 | 0.225 | 0.487 | 0.712 | 5.7483 | 1.579 | 0.66 | 7.2590 | 7.9873 | -4.78 |
| LOMAS DEL PINO | LPI-1 | 3.67 | 2.39 | 0.02 | 0.293 | 0.313 | 4.74 | 0.081 | 3 | 6.3730 | 7.8210 | -10.20 |
| JAGUEY-2 | JAG-2 | 3.44 | 2.21 | 0.021 | 0.32 | 0.341 | 4.87 | 0.208 | 1.05 | 5.9910 | 6.1280 | -1.13 |
| JAGUEY-3 | JAG-3 | 3.179 | 2.487 | 0.021 | 0.319 | 0.34 | 4.6 | 0.608 | 0.925 | 6.0060 | 6.1330 | -1.05 |
| PUNTAS-1 | PUN-1 | 4.63 | 1.84 | | | | 6.22 | 0.158 | 0.563 | 6.4700 | 6.9410 | -3.51 |
| PUNTAS-2 | PUN-2 | 2.03 | 3.729 | 0.0207 | 0.303 | 0.3237 | 4.88 | 0.29 | 1.156 | 6.0827 | 6.3260 | -1.96 |
| DIVISADERO-1 | DIV-1 | 5.56 | 2.039 | 0.032 | 0.579 | 0.611 | 3.59 | 0.371 | 1.25 | 8.2100 | 5.2110 | 22.35 |
| AG-13 | AG-3 | 3.708 | 3.552 | 0.023 | 0.354 | 0.377 | 4.6 | 3.891 | 0.548 | 7.6370 | 9.0390 | -8.41 |
| AG-20 | AG-20 | 0.353 | 0.443 | 0.0196 | 5.88 | 5.8996 | 4.375 | 0.456 | 1.225 | 6.6956 | 6.0560 | 5.02 |

Para su construcción es necesario que los aniones y cationes estén reducidos a porcentaje de milequivalentes por litro (meq/l) para poder graficarlos.

El diagrama triangular de Piper está formado por dos triángulos equiláteros y un rombo. En el triángulo inferior izquierdo se grafica en meq/l a los cationes (Ca², Mg² y Na⁺ + K₊), cada uno de ellos incrementándose en el sentido de las manecillas del reloj; en el triángulo inferior derecho a los aniones (Cl⁻, SO₄⁼ y CO₃⁼ + HCO₃⁻) cada uno incrementándose en el sentido contrario a las manecillas del reloj, y en la figura del rombo se representa la suma de los cationes (Ca²⁺ + Mg²⁺) y (Na⁺ + K⁺) en un par de lados paralelos y complementarios, mientras en el otro par de lados se presenta la suma de aniones (CO₃⁼ + HCO₃⁻) y su complementario (SO₄⁼ + Cl⁻). A cada vértice de un triángulo le corresponde el 100% de un catión o un anión.

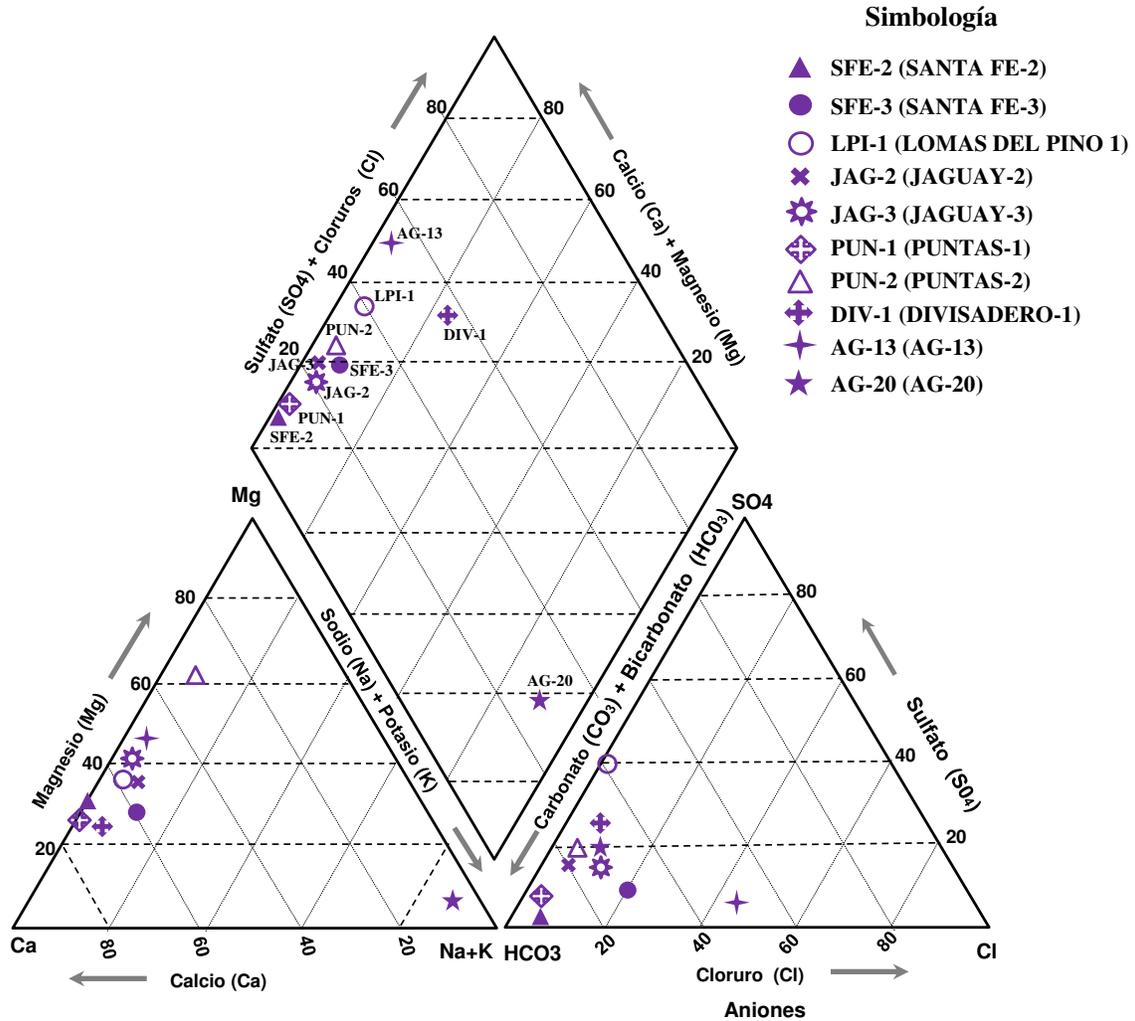


Figura V.6.- Diagrama de Piper para las aguas subterráneas de los pozos muestreados.

Con base al análisis del diagrama de Piper, se realizó una carta de familias de aguas para el año 2010. (Anexo 5), con el objeto de visualizar el comportamiento hidrogeoquímico de las aguas subterráneas en cada pozo.

Con la carta de familias 2010, se puede apreciar que en el área de estudio, se presenta 4 tipos de familias que son:

a).- Aguas Bicarbonatadas – Cálcida – Sulfatada. Este tipo de familia se hace presente en el pozo Divisadero 1 (DIV-1).

b).- Aguas Bicarbonatadas – Cálcidas – Magnésicas. Se manifiestan en los pozos LP-1, PUN-1, PUN-2, JAG-3, JAG-2, SFE-3 Y SFE-2.

c).- Aguas Sódicas – Bicarbonatadas. Detectadas en el pozo AG-20.

d).- Aguas Bicarbonatadas – Magnésicas - Cálcidas – Sódicas y Sulfatadas se registro en el pozo AG-13.

Como una referencia de comparación en la variabilidad hidrogeoquímica del agua subterránea, a través de los años en el área de estudio, se tomó el plano de Familias de aguas del año 2004. (Anexo 4), realizados por Lesser y asociados, (2004).

Para las dos cartas (2004 y 2010), se nota que los pozos que se analizaron, abarcan casi las mismas zonas del área de estudio, con diferencia en dos pozos únicamente en cuanto a posición.

En la carta del 2004, se observa que las familias Cálcidas –Bicarbonatadas predominaron y solamente un pozo registró una familia de tipo Sódica – Bicarbonatada. Para la carta del 2010, se aprecia unos cambio en el tipo de familia, que aunque se conserven el tipo Cálcido – Bicarbonatado, se nota un adhesión del Magnesio y del Sulfato, que más adelante se explicará su posible origen.

Analizando los tipos de familia de agua que resultaron de los análisis químicos en el presente estudio podemos mencionar lo siguiente:

Que en general las aguas Cálcidas - Magnésicas - Bicarbonatadas, predominan en el área de estudio, sobre todo en los pozos localizadas en la porción oriente, (zona de caliza), indicando con esto una relación muy estrecha del agua del acuífero con las rocas calcáreas marinas.

El magnesio contenido en el agua de los pozos probablemente provengan de los horizontes de dolomita interestratificada entre la caliza de las formaciones Cupido y Aurora.

El Sulfato que se presenta en las aguas de algunos pozos en el área, es debido a que el acuífero se localiza en rocas Jurásicas (Caliza Zuloaga). Por otro lado, también existe la posibilidad que el agua en su transcurso subterráneo diluya horizontes laminares de yesos intercalados con las lutitas de las formaciones cretácicas (Fm. Parras y Grupo Difunta).

El Pozo del Divisadero 1 (DIV-1) registra aguas Cálcidas- Bicarbonatadas y sulfatadas, este último anión SO_4 , probablemente su presencia es debido a que el acuífero se aloja en la caliza de la formación Zuloaga, que presentar horizontes de yesos entre sus estratos y en la base de su columna.

En el caso del pozo AG-13, localizada al oriente de la zona del Valle, registra también agua sulfatada, aquí, se puede inducir que este anión posiblemente provenga de la disolución de horizontes de yesos contenidos en los estratos de la lutita pertenecientes a la formación Parras.

V.3.- Calidad del agua

Los acuíferos son una fuente importante de agua para las ciudades, la industria y la agricultura. El incremento en la demanda de este vital líquido, ha ocasionado que varios acuíferos del país tengan problemas de sobre explotación. Sin embargo, este no es el único problema que presentan, ya que otro factor importante es la calidad del agua, que puede limitar el desarrollo y uso de este recurso. Por lo que el valor del agua subterránea depende de su disponibilidad y de su calidad CONAGUA (2000 b).

La calidad del agua subterránea va depender de sus concentraciones de constituyentes químicos y biológicos, contenido de sedimento y temperatura; características importantes para determinar su uso potencial.

La precipitación atmosférica, principal fuente abastecedora de los acuíferos, siempre trae consigo mínimas cantidades de elementos químicos, minerales disueltos, sólidos disueltos suspendidos, gases y otras impurezas.

El agua subterránea y el agua superficial se originan de la precipitación. Sin embargo, la primera contiene más minerales, esto es debido a que el agua está más tiempo en contacto con el subsuelo y es un ácido ligero que disuelve muchas sustancias. El agua de lluvia desde que se infiltra, va disolviendo los materiales del subsuelo durante su curso, llevándose consigo parte de las mismas. Este proceso es la más importante en la hidrogeoquímica, conocido también como la mineralización del agua subterránea Werner, (1996).

Los principales constituyentes disueltos en el agua subterránea son sodio, calcio y magnesio, los cuales se combinan químicamente con el cloruro, bicarbonato y sulfato para formar la mayoría de sus sales minerales CONAGUA (2000 b).

Para este estudio hidrogeológico, la química servirá de apoyo para determinar la calidad del agua con respecto a determinado uso y colaborará a la interpretación y definición del modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

Para determinar los posibles usos (potable o riego) del agua subterránea, se revisaron y acataron con las normas oficiales mexicanas que establecen los límites máximos permisibles (LMP). Criterios de calidad de agua establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA 1 - 1994 (2000), que indica que el agua debe tener menos de 200mg/l de sodio, menos de 250mg/l de cloruros, menos de 400mg/l de sulfatos, menos de 10mg/l de nitratos, menos de 1000mg/l de sólidos totales disueltos. Los límites máximos permitidos por la Organización Mundial de la Salud para el Calcio y Magnesio, que indica que para ser potable el agua, necesita menos de 200mg/l de calcio y 150mg/l de magnesio. Ver. Tabla V.2 y V.6.

Tabla V.6.- Límites máximos permisibles (LMP) establecidos por diversos organismos para la calidad del agua. (Tomado y modificado de Rodríguez, Rodríguez J. S. 2011).

| Parámetro | NOM-001 ^a | | NOM-127 ^b | USEP ^c | WHO ^d | EEC ^e | ÁREA DE ESTUDIO |
|--|----------------------|--------|----------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | Riego | Urbano | Agua Potable | | | | |
| Temperatura (°C) | | 40 | ----- | ----- | ----- | ----- | 21.45 |
| pH | | | 6.5-8.5 | | 6.5-8.5 | 6.5-8.5 | 7.51 |
| Sólidos totales (mg/L) | 150 | 75 | ----- | ----- | ----- | ----- | 476.3 |
| Sólidos disueltos | 1000 | 1000 | ----- | ----- | ----- | 25 | 437.87 |
| Sólidos Suspendidos Totales | ----- | ----- | 1 | ----- | 1 | ----- | 4.375 |
| Cloruros (Cl ⁻) | ----- | ----- | 250 | ----- | ----- | 200 | 20.7 |
| Sulfatos (SO ₄ ⁼) | ----- | ----- | 400 | ----- | ----- | 150 | 47.27 |
| Nitratos (como nitrógeno) | ----- | ----- | 10 | 10 | 10 | 25 | 6.88 |
| Coliformes totales (NMP/100M) | ----- | ----- | 0 | ----- | 0 | 50 | 14.28 |
| Coliformes fecales (NMP/100M) | ----- | ----- | 0 | ----- | 0 | 20 | ----- |
| Arsénico (mgAs ⁺³ /L) | 0.2 | 0.1 | 0.025 | 0.05 | 0.05 | 0.01 | ----- |
| Mercurio (mg ⁻² /L) | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.001 | 0.0005 | ----- |
| Selenio (mgSe ⁻² /L) | ----- | ----- | ----- | 0.05 | 0.01 | 0.01 | ----- |
| Bario (mgBa ⁺² /L) | ----- | ----- | 0.7 | 0 | ----- | ----- | ----- |

a: NOM-001ECOL-1996

b: NOM-127-SSA1-1994

c: United States Environmental Protection Agency (US EPA-2001)

d: World Health Organization (WHO-2000)

e: European Economic Community (EEC-2000)

Nota. Los valores del área de estudio es el resultado de la media de las diez muestras.

En cuanto a los minerales pesados, los resultados obtenidos del muestreo, reflejan valores bajos con respecto a los estándares establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, y la WHO-2000. Ver Tabla V.4.

Con base a los resultados obtenidos de los análisis químicos, y la comparación con los estándares establecidos en las normas de calidad y uso del agua subterránea se puede considerar que el agua subterránea que circula en los pozos del área de estudio, es apta para el consumo humano, uso doméstico y para riego agrícola y ganadero.

VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1.- Conclusiones

La columna estratigráfica integra rocas cuyas edades varían del Jurásico al reciente, conformadas por las formaciones Zuloaga, Casita, Taraises, Cupido, Peña, Aurora, Cuesta del Cura, Indidura, Parras, Coluvi3n y Aluvi3n. En la porci3n sur y oriente del 1rea de estudio, existen estructuras de: anticlinales, anticlinales recumbentes, sinclinales, cabalgaduras y fallas laterales producto de la Orogenia Laramide. Se identificaron 5 tipos de fracturas: 4 de cizallas (hk0 con 1ngulo agudo al eje “a”, hk0 con 1ngulo agudo al eje “b”, 0kl con 1ngulo agudo al eje “c” y h0l con 1ngulo agudo al eje “a” y fracturas de tensi3n tipo “ac” y “bc”. Las fracturas que predominan son las est1n orientadas de NW – SE, y en forma general coinciden sensiblemente con la direcci3n de los flujos superficiales y subterráneos.

El acuífero localizado en la zona de caliza, es de tipo fracturado y cárstico y se encuentra confinado en rocas permeables de las formaciones: Zuloaga, Cupido y Aurora, y para la zona del valle, el acuífero est1 en un medio fracturado de las lutitas y areniscas de la formaci3n Parras. En la zona de caliza se manifiesta tres niveles de acuíferos confinados, ocupando el nivel inferior la formaci3n Zuloaga, el medio la caliza Cupido y el nivel superior la formaci3n Aurora. El gasto en zona de caliza oscila entre 27 y 67 l/s y en la zona del valle entre 1 y 9 l/s. La evoluci3n del nivel est1tico de 1998 a 2010, existe un descenso de 15.32 m en promedio en los pozos ubicados en zona de caliza, y para los pozos de la zona del valle, el descenso es de 10.88 m. La similitud de la configuraci3n de los par1metros STD Y CE, tambi3n se asemeja o coinciden con el flujo subterráneo marcado en la carta hidrogeol3gica.

Con los resultados de los an1lisis químicos y el diagrama de Piper, se determinaron 4 tipos de agua (Aguas bicarbonatadas - cálcicas – magnésicas, aguas bicarbonatadas – S3dica, Aguas Cálcica – Sulfatada- Bicarbonatada, Aguas Magnésica-Cálcica-S3dica-Bicarbonatada-Sulfatada). El origen de las aguas bicarbonatadas - cálcicas se debe a su relaci3n muy estrecha con las rocas calc1reas marinas. El magnesio contenido en el agua de

los pozos probablemente provengan de los horizontes de dolomita interestratificada entre la caliza de las formaciones Cupido y Aurora. El sulfato presente en el acuífero se debió a la presencia de rocas Jurásicas (Caliza y yesos de la Zuloaga) y también por la presencia de horizontes laminares de yesos intercalados en la secuencia de lutitas de las formaciones Parras y Grupo Difunta, que el agua subterránea diluye en su transcurso. En promedio el pH tiene 7.51, la temperatura registra 21.45 °C, Sólidos totales disueltos de 467.3 mg/l.

Con base a los resultados de los análisis químicos del muestreo, y su comparación con los estándares establecidos en las normas de calidad. El agua subterránea que fluye en el área es favorable para el consumo humano, uso doméstico y para riego.

Con base a las características litológicas, estructurales y el comportamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico del acuífero, se logró definir 3 zonas potenciales hidrogeológicas en la parte oriente y sureste del área de estudio, denominadas: Santa Fe, Los Ángeles y el Molano. Con una profundidad de perforación de 550 m.

VI.2.- Recomendaciones

Explorar en la zona de caliza porción oriente y sur del área de estudio, enfocando a las estructuras de anticlinal sobre todo en su parte periclinal, buscando los niveles estratigráficos favorables, como son las formaciones Jurásicas y Cretácicas.

Extracciones controladas en el acuífero, tanto en la zona de caliza como en la zona del valle, para evitar la sobre explotación y alargar la vida útil del acuífero.

Automatizar todos los pozos y papalotes, para obtener la base de datos para la central de Saltillo.

Un censo de monitoreo y permanente de los niveles piezométricos de los pozos.

VII.- BIBLIOGRAFÍA

Aarseth, E.S., Bourguine, B., Castaing, C., Chiles, J. P., Christensen, N. P., Eeles, M., Fillion, E., Genter, A., Gillespie, P. A., Hakansson, E., Zinck Jorgensen, K., Lindgaard, H. F., Madsen, L., Odling, N.E., Olsen, C., Reffstrup, J., Trice, R, Walsh, J. J., Watterson, J. (1997): Interim guide to fracture interpretation and flow modeling in fractured reservoirs.- European Commission. 203 p.

Alfonso, Zwanzinger J., (1976): Geología regional del Sistema Sedimentario Cupido, in: Simposio de Geología del Subsuelo, Zona Noreste, PEMEX, Reynosa, p. 134-159

American Geological Institute. (1976): Dictionary of Geological Terms. 472 p.

Anderson, R., (1951): The dynamics of faulting: Oliver & Boyd, Edimburg, 206 p.

Arizabalo R. D., y Díaz G. (1991): La contaminación del agua subterránea y su transporte en medios porosos. Cuaderno No. 6 del Instituto de Geofísica. Universidad Autónoma de México. 36 p.

Billings, M. P., (1972): Structural Geology: Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 606 p.

Bird, P. (1988): Formation of the Rocky Mountains western Unites States: A continuum computer model. Science, vol. 239, p. 1501-1507.

Bird, P. (1998): Kinematic history of the Laramide orogeny in latitudes 35°-49° N, western United States. Tectonics, vol. 17, p. 780-801.

Bird, P. (2002): Stress direction history of the western United States and México since 85 Ma. Tectonics, vol. 21, n. 3, p. 5-1, 5-12.

Blauser, W.H., (1981): The Stratigraphy of the Taraises Formation, Lower Cretaceous, México, Lower Cretaceous stratigraphy and structure, northern Mexico: West Texas Geological Society Publication 81-74, p. 37-42

Boyd, D. R. (1959): Stratigraphy of the Difunta Group in an area North Saltillo, Coah., Mexico- tesis, Austin University of Texas 107 p.

Bufet Geológico y Construcciones, S.A. de C.V. (1983-1984). Estudio Geohidrológico preliminar Zona Derramadero, Estado de Coahuila. Para la SARH

Burckhardt, C. (1930): Étude Synthetique sur le mesozoique mexicain.-Soc. paleontologique Suisse., Mém 49-50:280 p.

Burrows. R. H., (1910): Geology of northen Mexico: Boletin de la Sociedad Geológica Mexicana v. 7, 85-103

Carrillo-Chávez A. (2007): Geoquímica Ambiental de yacimientos Minerales. Notas del Curso-Taller INAGEG. 111 P. Centro de Geociencias-UNAM Campus Juriquilla, Querétaro

Campa U. M. F. (1985): The Mexican Thrust Belt. Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific region. Howell, D. G., Ed., Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Houston, Texas. Earth Sciences Series, vol. 1, p. 299-313.

Chávez-Cabello, G., Aranda-Gómez, J. J., Molina, Garza-Garza, R. S., Cossío-Torres, T., Arvizu-Gutiérrez, I. R., González-Naranjo, G. A. (2005): La falla San Marcos: una estructura jurásica de basamento multirreactivada del noreste de México. Bol. de la Soc. Geol. Mex., vol. 62, p. 27-52.

Clark, K. F., Foster, C. T., Damon, P. E. (1982): Cenozoic mineral deposits and subduction related magmatic arcs in Mexico. Geol. Soc.of Am. Bull., vol. 93, p. 533-544.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2000 a): Manual de Difusión y Divulgación sobre temas selectos de agua subterránea “Conceptos básicos de Hidrogeología” I parte, 39 p.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2000 b): Manual de Difusión y Divulgación sobre temas selectos de agua subterránea “Contaminación de Agua subterránea” II parte, 39 p.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010): Datos en archivo Excel de las temperaturas máximas y mínimas del periodo 2000-2009, de las estaciones climatológicas: Saltillo y Carneros

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010): Datos en archivo Excel de las precipitaciones del periodo 2000-2009, de las estaciones climatológicas: Saltillo y Carneros

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de Biodiversidad (CONABIO) (1998): “Climas” (Clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000,000 México.

Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento (CEAS), (2010): Datos de la entrevista realizada por el periódico El Zócalo con el director y gerente de CEAS, 6 p.

Custodio E. y Llamas M. R. (1983): Hidrología subterránea. Ed. Omega, S. A., Barcelona Tomo I y II, pp. 1393-1576.

De Cserna, Z., (1956): Tectónica de la Sierra Madre Oriental de México, entre Torreón y Monterrey: 20 Congr. Geol. Internacional, México, p. 1- 87.

Dickinson, W. R., Klute, M. A., Hayes, M. J., Janecke, S. U., Lundin, E. R., Mckittrick, M. A., Olivares, M. D. (1988): Paleogeographic and paleotectonic setting of Laramide sedimentary basins in the central Rocky Mountain region: Geol. Soc. Of Am. Bull., vol. 100, p. 1023-1039.

Domenico, P. A. 1972. Concepts and models in groundwater hydrology. 1a. Ed., McGraw-Hill. New York, 405 p.

Eguiluz-de Antuñano, S., Aranda-García, M., Marrett, R., 2000: Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53, 1-26.

Emil Bose (1906): Excursión dans les environs de Parras, México. Congreso geológico Internacional, 10, México D. F. Libro guía, Excursión 23, 16 p.

Estudios y Proyecto de Agua y Tierra Rubriselva, S.A. de C.V. (1998): Estudio de reactivación de redes de monitoreo de los acuíferos de los Valles de Monclova, Saltillo-Ramos Arizpe, Allende, Piedras Negras, Cuatrociénegas-Ocampo, La Paila y Derramadero, Coah.

Facultad de Ingeniería de la UNAM. (1973): Estudio geológico del Prospecto Parras-Viesca. 229 p. Inedito.

Freeze R.A., Cherry J.A. 1979: Groundwater: Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 603 p. USA.

Freeman T. (1992): Procedures in field geology. University of Missouri-Columbia. 98 P.

Garza Castillo A. M. (2006): Estudio hidrogeoquímico de aguas subterráneas en el área del Baño San Ignacio, NE de México. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, N. L. 96 p.

Goldhammer, R. K., Lehmann, P. J., Todd, R. G., Wilson, J. L., Ward, W. C. y Johnson, C. R. (1993): Estratigrafía secuencial y ciclostratigrafía del Mesozoico de la Sierra Madre Oriental, Noreste de México. AAPG Annual Convention, Houston, Tx. 1-101 p.

Goldhammer, R. K., Lehmann, P. J., Todd, R. G., Wilson, J. L., Ward, W. C. & Johnson, C. R. (1991): Sequence Stratigraphy and Cyclostratigraphy of the Mesozoic of the Sierra Madre Oriental, Northeast Mexico, a Field Guidebook. Gulf Coast Section. Soc. of Econ. Paleo. and Min., pp. 85

Goldhammer, R.K., (1999): Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northern Mexico, en, C. Bartolini, J.L. Wilson, T. F. Lawton Mesozoic Sedimentary and history of north-central Mexico: Geological Society of America Special, Paper 340, p. 1-58.

Gonzalez de Vallejo et al., (2002): Ingeniería Geológica. Pearson Educación, Madrid. 744 p.

Hancock, P. L. (1985): Brittle microtectonics: principles and practice. J. Struc. Geol., Vol. 7: 431-457 p.

Humphrey, W. E., (1949): Geology of the Sierra de los muertos area and paleontology of the La Peña formation, Mexico: Geol. Soc. America Bull., v.60, 89-176

Imlay, R. W., (1938): Studies of the Mexican geosyncline: Geological Society of America Bulletin, v.49, 1651-1694

Imlay, R. W., (1937): Geology of the middle part of Sierra de Parras, Coahuila, Mexico: Geological Society of America Bulletin, v.48, 587-630

Imlay, R.W., (1936): Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico. Part IV, Geology of the western part of the Sierra de Parras: Geological Society of America Bulletin, 47, 1091–1152.

INEGI: Información estadística del Estado de Coahuila. www.inegi.gob.mx

INEGI: Carta Topográfica Agua Nueva G14-C43 Escala 1: 50 000

INEGI: Carta Topográfica Saltillo G14-C33 Escala 1: 50 000

INEGI 2010: Informe estadístico de Saltillo, Coahuila, México www.inegi.gob.mx

Johnson, C. A., Gray, G. G. y Goldhammer, R. K. (1991): Structure and tectonics of the Sierra Madre Oriental fold-thrust belt near Monterrey, northeastern Mexico (abstr.) Am. Assoc. of petroleum Geologists Bull., vol. 75 603 p.

Kelly, W. A., (1936): Evolution of the Coahuila Penninsula, Mexico. Part II, Geology of the Mountains bordering the valley of Acatita and Las Delicias, Geological Society of America Bulletin, v.47, p. 1009-1038.

Leser y asociados S.A. de C.V. (2004): Informe final. Actualización hidrogeológica del acuífero Cañón del Derramadero, Coah., desarrollado para CONAGUA. 170 p.

López, Ramos E. (1980): Geología de México. Tomo II, 2ª Edición, México, D. F., 454 pp.

Lowell J. D. (1985): Structural styles in petroleum exploration. Ed. Ogcí, Oklahoma 454 p.

Mckee, J. W., Jones, N. W., Long, L. E. (1990): Stratigraphy and provenance of strata along the San Marcos fault, central Coahuila, Mexico. Geol. Soc. of Am. Bull., vol. 102, p. 593-614.

Mc Dowell, F. W. y Clabaugh, S. E. (1981): The igneous history of the Sierra Madre Occidental and its relation to the tectonic evolution of western Mexico. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Revista, vol. 5:195-206 p.

Meiburg, P., Chapa-Guerrero, J. R, Groetehusmann, I, Kustus, T., Lentzy, P., De León-Gómez, H., Mansilla-Teran, M. A. (1987): El basamento pre-Cretácico de Aramberri estructura clave para la comprensión del decollement de la cubierta jurásica/cretácica de la Sierra Madre Oriental, México. Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, vol. 2, pp. 15-22.

Montemayor-Sánchez, I. (2003): Análisis de la deformación en el Valle de San Marcos, Coahuila. México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias de la Tierra/Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León, México.

Mijailov, L. (1985). Hidrogeología. Editorial Mir. Moscú, Rusia. 285 p.

Muir, J. M. (1936): Geology of the Tampico Region, Mexico. Am. Assoc. of Petro. Geol., p. 280.

Nelson, R. A. (1996): Fractured reservoirs: applied technique.-APPG Fractured Reservoir Analysis School. Great Falls. Montana: 114 p. (Inédito)

NOM-127 SSA1-1994 Norma que establece los límites máximos permisibles para la calidad del agua par uso potable. Secretaría de Salubridad y Asistencia, México. 7 p.

NOM-001-196 Norma que establece los límites máximos permisibles para la calidad del agua para uso urbano y agrícola. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 35 p.

Oivanki, S. M. (1974): Paleodepositional environments in the upper Jurassic Zuloaga Formation (Smackover), northeastern Mexico, Gulf Coast. Assoc. Geol. Trans., vol. 24 258-278 p.

Padilla y Sánchez, R. J. (1982): Geologic Evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, México.- Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, p. 217.

Padilla y Sánchez, R. J., (1985): Implicaciones estructurales de los arrecifes en el desarrollo de pliegues: Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol., v. 34 n° 2, p. 43-90.

Padilla y Sánchez, R. J. (1985): Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. U.N.A.M. Instituto de Geología, revista, vol. 6 núm. 1, p. 1-20.

Padilla y Sánchez, R.J., (1986): Post-Paleozoic tectonics México and its role in the evolution of the Gulf of México: Geofísica International, v. 25-1 p. 157-206.

Padilla y Sánchez, R.J., (1996): Elementos de Geología Estructural. Fac. Ing. UNAM México 110 p.

Peterson Rodríguez R. H. (1998): Estudio Geológico Estructural de una Porción del Anticlinorio de Parras, Coahuila, México. Tesis de Licenciatura, FCT/UANL, 108 pp.

Pirnie, Malcolm. Inc. (1994): Estudio de isótopos para las aguas subterráneas de la Ciudad de Saltillo. Fideicomiso Fidagua de la Ciudad de Saltillo.

Price. N. J. y Cosgrove J. W. (1990): Analysis of geological structures. Ed. Cambridge University Press, New York 502 p.

Quintero L. O. y Aranda G. M. (1985): Relaciones estructurales entre el anticlinorio de Arteaga (Sierra Madre Oriental) en la región de Agua Nueva, Coah. UNAM. Revista Instituto de Geología Vol. 6 No. 1.

Raiz E., (1964): Provincias fisiográficas mapa con texto, esc. 1:3000,000, segunda edición, Cambridge, mass.

Ramirez Peña C. F. (2011): Cartografía geológica y análisis estructural del intrusivo Santa Rosa Concepción del Oro, Zacatecas. Tesis de Licenciatura, FCT/UANL, 153 P.

Rodríguez, Rodríguez J. S. (2011): Análisis y evaluación del confinamiento de la Ciudad de Saltillo, Coahuila, México. Tesis de Maestría FCT/UANL, 94 p.

Rogers. C.L., Cserna, Z., Vloten, R.V., Talavera-Amescua, E., Ojeda-Rivera J., (1961): Reconocimiento geológico y depósitos de fosfato del norte de Zacatecas y áreas adyacentes en Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí: Consejo de Recursos Naturales no Renovables (México), Bol. 56, 322 p.

Santiago C. B., et al., (1999): Informe final de la cartografía geológico-minera Escala 1: 250,000. Carta Monterrey Clave G14-7, Estados De Coahuila, Nuevo León y Zacatecas. Consejo de Recursos Minerales.

Santiago C. B. y Escamilla de la R. J. E., (2007): Carta geológica minera Agua Nueva Clave C14-C43 Escala 1:50,000. Estado de Coahuila, México. Servicio Geológico Mexicano.

Silva R. G., Mendoza R. C. C., y Campos M. E. (2001): Elementos de cartografía geológica. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 292 p.

Sterns, D. W. (1996a): Natural Fractures Systems. AAPG Fractured Reservoir Analysis School Great Falls, Montana: 17 p. (Inédito).

Sterns, D. W. (1996b): Fractures Associated with Fold in Brittle Rocks.- AAPG Fractured Reservoir Analysis School Great Falls, Montana: 37 p. (Inédito).

Tardy M. (1972): Sobre estratigrafía de la Sierra Madre Oriental en el sector Parras, Coah., distinción de las series Coahuilenses y Parrenses. Soc. Geol. Mexicana. v. 33 p. 51-70

Tardy M. (1973): Sobre la tectónica de la Sierra Madre Oriental en el sector de parras, Coahuila: el cabalgamiento de la serie Parrense. Bol. Soc., Geológica Mexicana. V. 34, No. 1-2, p. 51-70.

Tardy M. y Martínez J., (1976): Estructura de la Sierra Madre Oriental (Sector transversal, Estado de Coahuila), Acapulco. Congreso Latinoamericano de Geología, 3, libro-guía de la excursión núm. 3, 28 p.

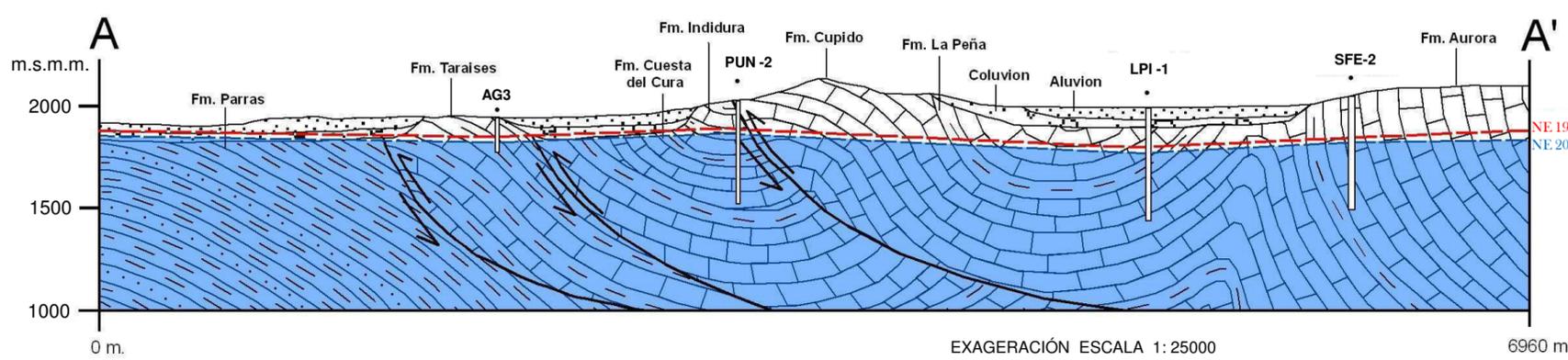
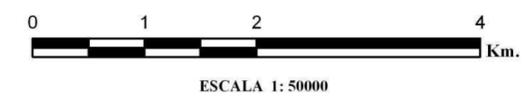
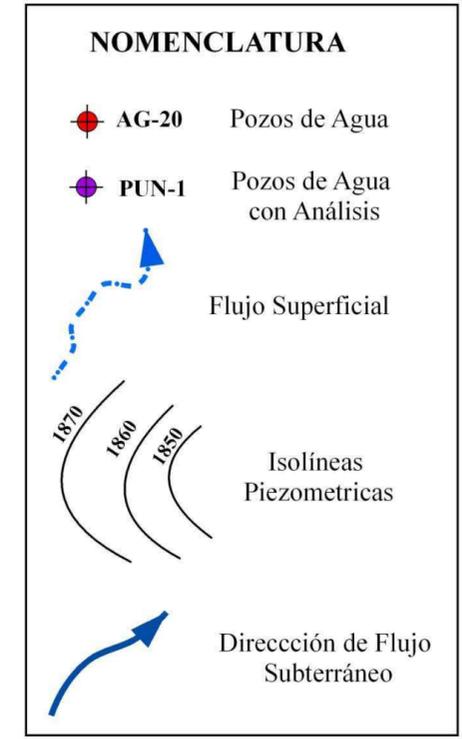
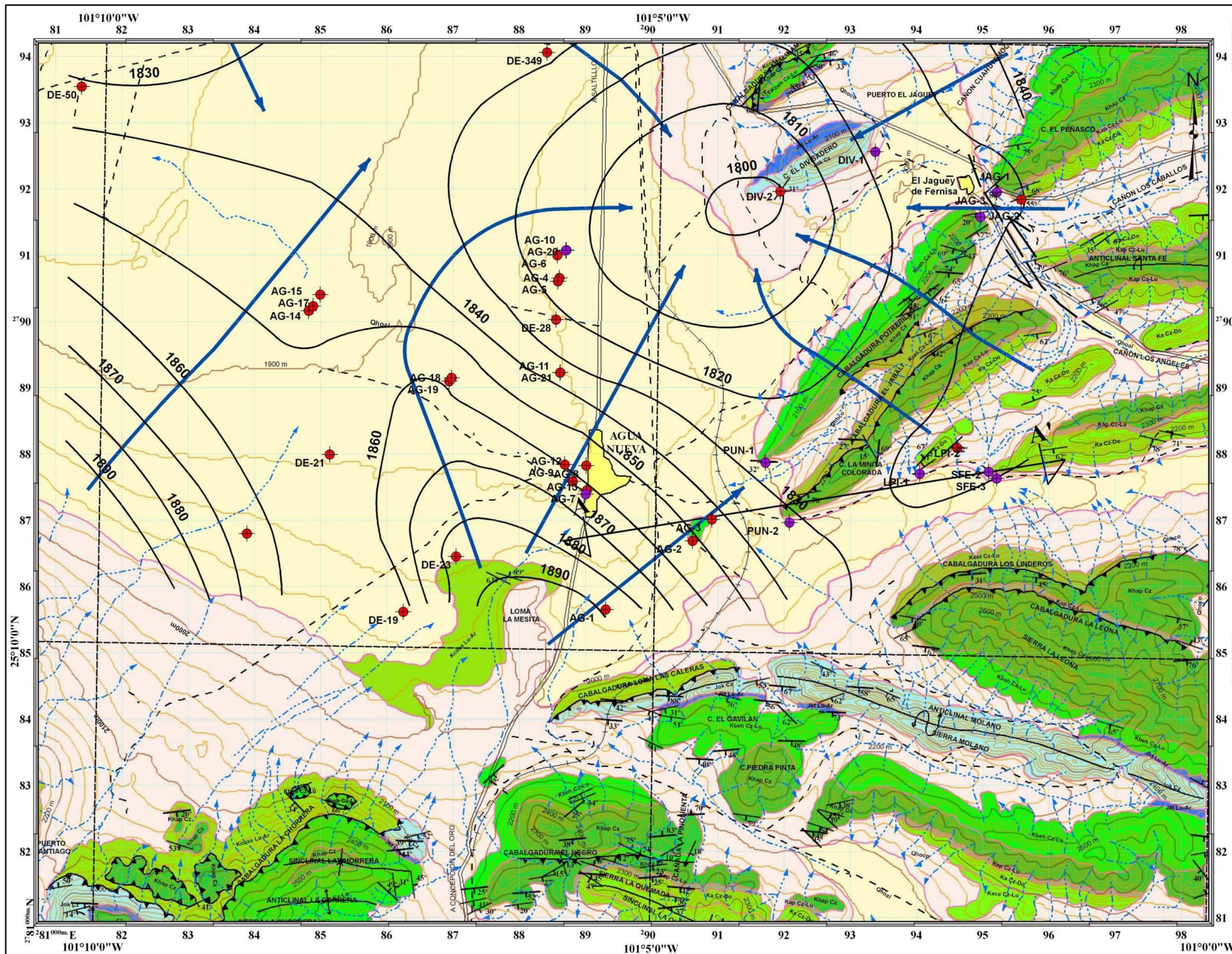
Tóth, J., (1963): A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basin. J. Geophys. Res. 68, 4795-4812 p.

Tóth, J., (1999): Groundwater as a geologic agente: an overview of the causes, processes, and manifestations. Hydrogeology. J. 7, 1-14 p.

Werner J. (1996): Introducción a la hidrogeología 1^a ed. Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., 174 pp.

Weidie, A.E., and Murray, G.E., (1967): Geology of Parras Basin and adjacent areas of Northeastern Mexico: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 51. No. 5, p. 678-695.

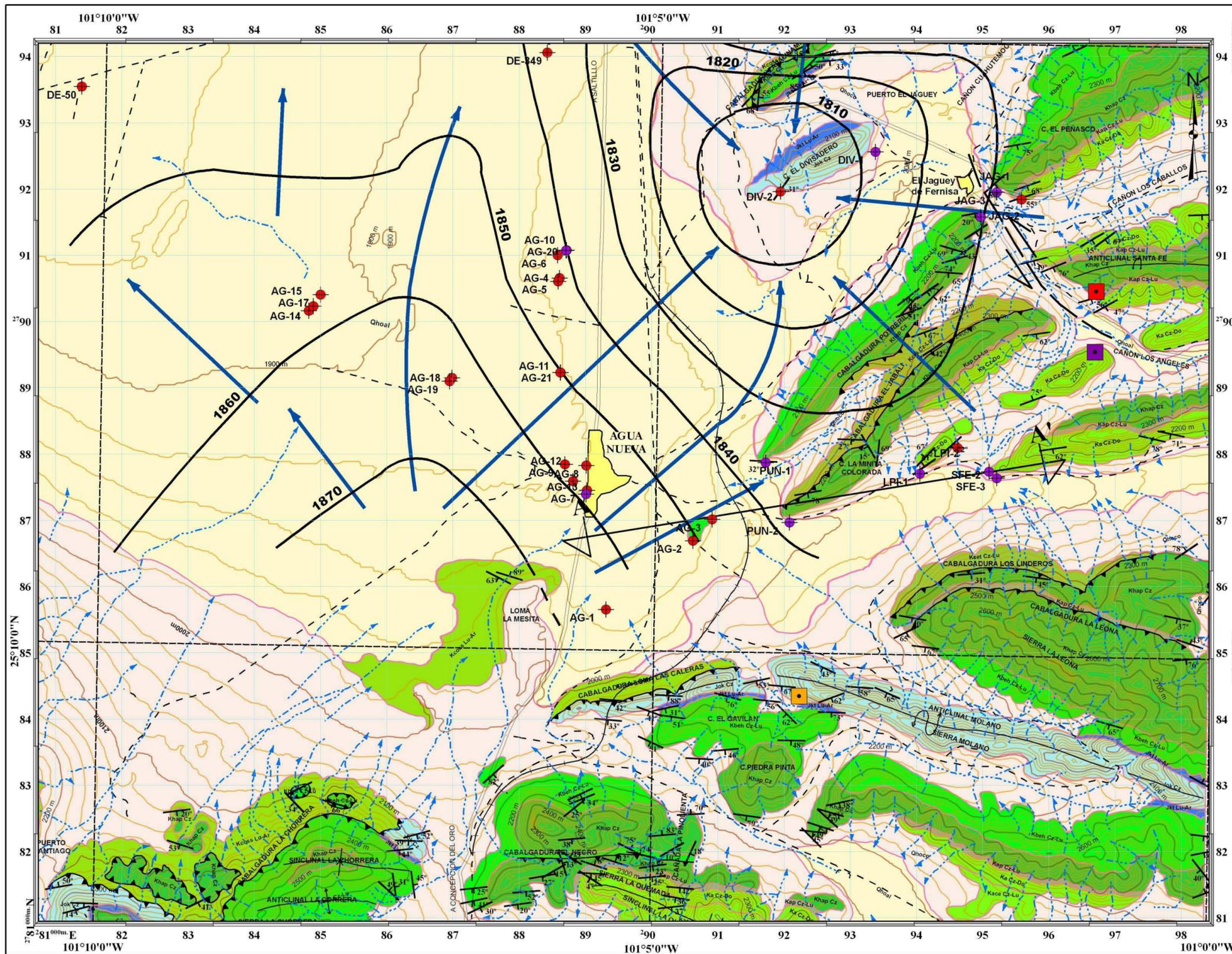
ANEXOS



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

CARTA HIDROGEOLÓGICA 2008, REGIÓN
AGUA NUEVA, ESTADO DE COAHUILA. 2012

BRÍGIDO SANTIAGO CARRASCO TESIS DE MAESTRIA ANEXO 2

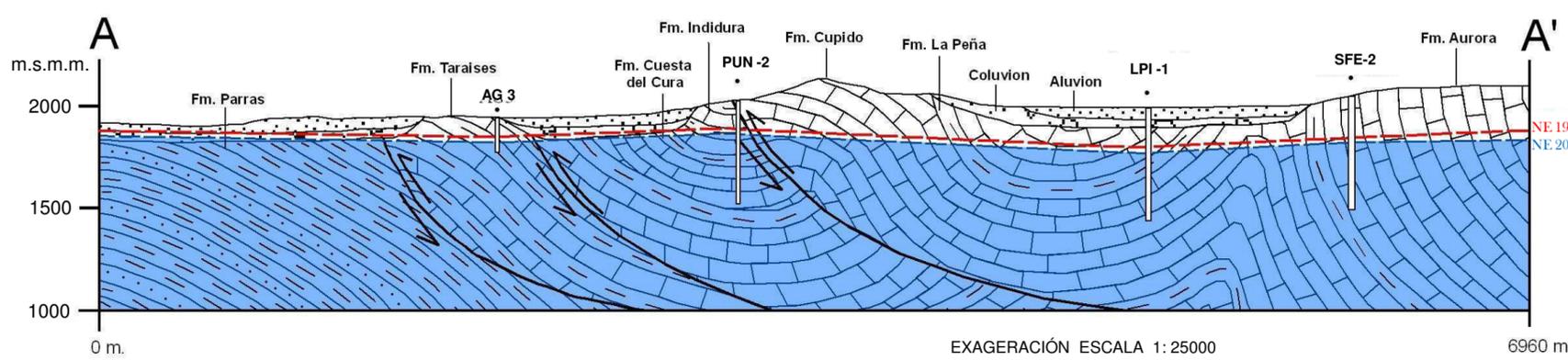


NOMENCLATURA

- AG-20 Pozos de Agua
- PUN-1 Pozos de Agua con Análisis
- Flujo Superficial
- (curved) Isolíneas Piezométricas
- (straight) Dirección de Flujo Subterráneo

ZONAS PONTENCIALES

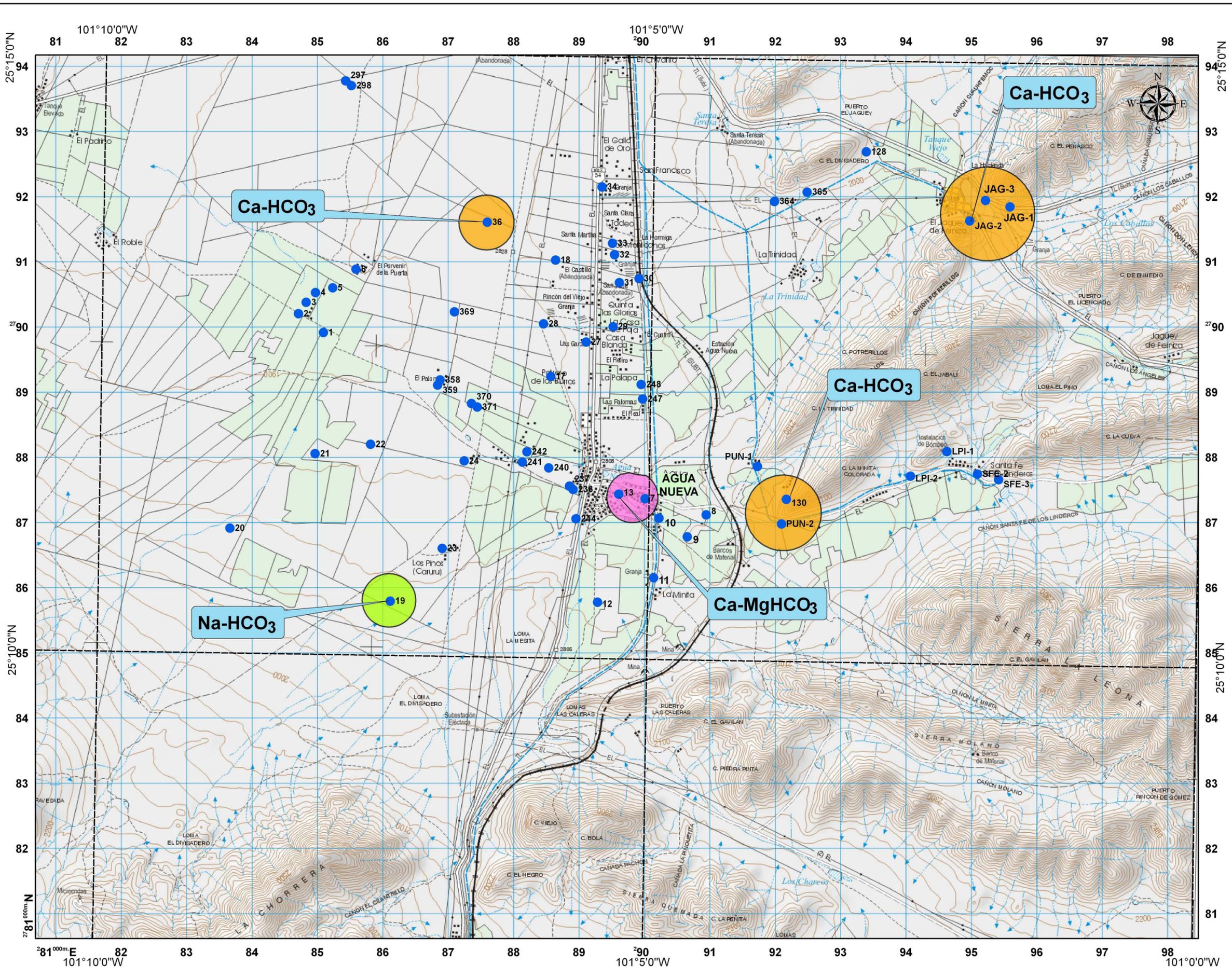
- Zona Santa Fé
- Zona Los Angeles
- Zona Molano



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

CARTA HIDROGEOLÓGICA 2009, REGIÓN
AGUA NUEVA, ESTADO DE COAHUILA. 2012

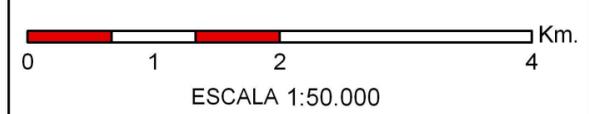
BRÍGIDO SANTIAGO CARRASCO TESIS DE MAESTRIA ANEXO 3



Explicación

Familias de Aguas

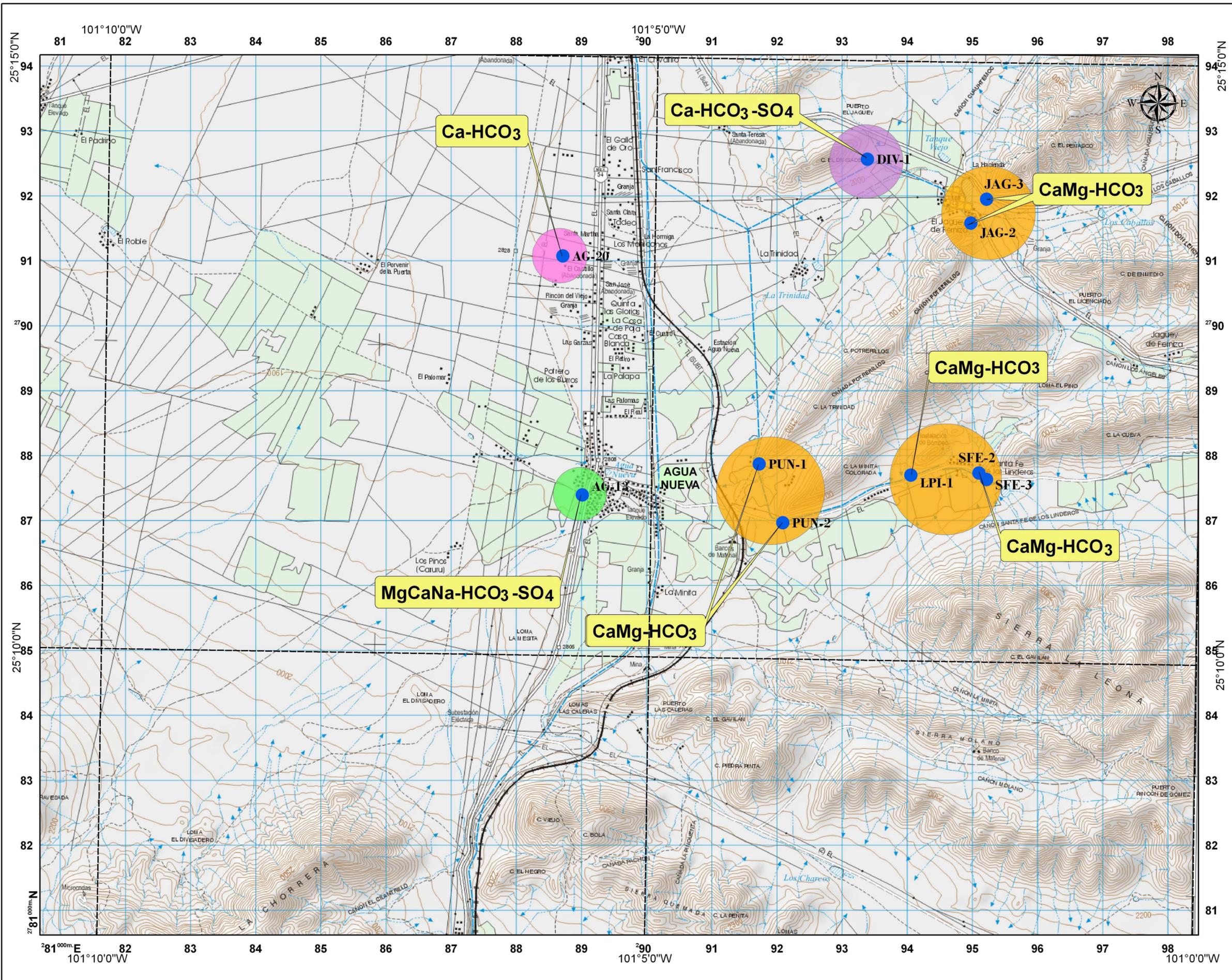
- Aguas Cálcidas y Bicarbonatadas Ca-HCO_3
- Aguas Cálcidas, Magnésicas y Bicarbonatadas Ca-Mg HCO_3
- Aguas Sódicas y Bicarbonatadas Na-HCO_3
- Pozos de Agua Análisis 2004
- Flujo Superficial



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

CARTA DE FAMILIAS DE AGUA 2004 DE LA REGIÓN AGUA NUEVA, ESTADO DE COAHUILA. 2012

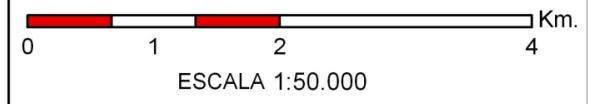
BRÍGIDO SANTIAGO CARRASCO TESIS DE MAESTRIA ANEXO 4



Explicación

Familias de Aguas

- 
 Aguas Cálcidas, Magnésicas y Bicarbonatadas CaMg-HCO_3
- 
 Aguas Cálcidas Bicarbonatadas y Sulfatadas $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$
- 
 Aguas Cálcidas Bicarbonatadas Ca-HCO_3
- 
 Aguas Magnésicas Cálcidas Sódicas Bicarbonatadas y Sulfatadas $\text{MgCaNa-HCO}_3\text{-SO}_4$
- 
 Pozos de Agua Análisis 2010
- 
 Flujo Superficial



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

CARTA DE FAMILIAS DE AGUA 2010 DE LA REGIÓN
AGUA NUEVA, ESTADO DE COAHUILA. 2012

BRÍGIDO SANTIAGO CARRASCO TESIS DE MAESTRIA ANEXO 5