



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

POSGRADO EN GEOLOGIA APLICADA

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y DIRECCIONES DE FLUJO DE
AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO DE SAN NICOLÁS TOLENTINO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN GEOLOGÍA APLICADA

PRESENTA

SONIA TORRES RIVERA

DIRECTOR DE TESIS

MC. LETICIA PADILLA SÁNCHEZ

CO-DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ RAMÓN TORRES HERNÁNDEZ

San Luis Potosí, S.L.P.

DEDICATORIA

A Dios por mostrarme día a día que con humildad, paciencia y sabiduría toda es posible.

A mi esposo David compañero y sobretodo amigo, que siempre ha creído en mí y me ha apoyado en todos los malos y buenos momentos. Ahora que me acostumbre a vivir contigo no podría imaginarme dar un paso sin tu mano cogida de la mía.

A mi madre Alejandrina sí algo soy en la vida es por tí, que me llevo en cariños andando por la vida, y sin mí corazón hoy siente mucho, es porque le imprimiste el sello de tu abrazo... Te amo, y bien lo sabes... estés donde te encuentres... de un lugar que en un futuro también visitaré.

A mis hermanos y padre: Fabíola, Miguel Ángel, Nora, Hugo y Miguel Torres.

A mis linda tías: Virgínia, Margarita y Fabíola que me ven como a una hija.

A mis amigos que siempre tuvieron palabras de aliento y que siempre han sido incentivos en mi vida.

“Y por último: en este momento tan importante e inolvidable, a mí misma, por no dejarme vencer, ya que en ocasiones el principal obstáculo se encuentra dentro de uno mismo”

AGRADECIMIENTOS

Gracias esposo mío, por aceptarme tal y como soy, por haber visto la belleza de mi corazón. Te amo.

Gracias Jadito porque mi corazón se estremece al recordarte. No fácil el no verte más, pero me consuela que estas en un maravilloso lugar. Sé que si en este mundo orabas por mí, tu amor me sigue tocando y tus oraciones escuchadas. Porque gracias a tu recuerdo renacen tus brazos y tus palabras de aliento, Te amo.

Mi más sincero agradecimiento a los Prof. M.C. Leticia Padilla Sánchez, Dr. José Ramón Torres Hernández y Dr. Margarito Tristán González... quien a demás de transmitirme su vocación investigadora, me orientaron, ayudaron y estimularon constantemente en todos los aspectos de la tesis durante estos años. Agradecerles la plena confianza que siempre me han demostrado, así como la dedicación y la atención que en todo momento me han ofrecido.

Al Ing. Salvador Martínez por su atención dedicada a este trabajo.

A mis queridos amigos y compañeros de maestría: Montoyita, Bichitos, Soto y Aza.

A mis amigos del laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de UASLP: M.C. María Elena por permitir que determinara los elementos traza, Rebeca, Miguelito, Vicky, Ross, Lilis, Karen y Chilo por la fraternidad, compañerismo y por todas las reuniones de la DEEG. Gracias.

A los profesores del área de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UASLP por dejar llevar materias de mucha ayuda para la elaboración de la presente tesis.

A los profesores del Instituto de Geología: Dr. José Rafael Barbosa Gudiño, Dr. Alfredo Aguillón, Dr. Ricardo Saucedo Girón, Ing. Erasmo Mata Martínez, a todos ellos por el apoyo y disposición con los alumnos.

Al Dr. José Alfredo Ramos Leal del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) y a todas las amistades que allí me acogieron.

También quiero dar mi agradecimiento a la Ing. María de los Ángeles Navarro, M.C. Ana María Guadalupe López Hernández y Q.F.B. Sandra Dinora Ramos Martínez del Laboratorio de Análisis de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería, por guiarme y apoyarme en los análisis de elementos mayores para el presente trabajo.

CONTENIDO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
CONTENIDO	III
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABLAS	VII
RESUMEN	VIII
INTRODUCCIÓN	1
Localización	1
Objetivo	3
Objetivo Especifico	4
Vías de Comunicación	4
Estudios Previos	5
Metodología	7
<i>Recopilación, analisis y depuración de información</i>	7
<i>Actividad de campo</i>	8
Censo de aprovechamientos	8
Piezometría	8
Medición de parámetros de campo	9
Toma de muestras de agua subterráneas	15
<i>Actividad de gabinete</i>	16
<i>Actividad de laboratorio</i>	18
I.- MARCO GEOLÓGICO	26
I.1- Marco Geológico Regional	26
I.2- Estratigrafía	29
II.- HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA	44
II.1- Unidades hidroestratigráficas	44
II.2- Unidades permeables	49

II.3- Unidades de escasa permeabilidad y no permeables	50
II.4.- Sistemas de Flujo	50
II.4.1- Introducción a los sistemas de flujo	50
II.5 - Piezometría	54
II.5.1- Profundidad del nivel estático (N.E.) para el año 2010	54
II.6.- Red de Flujo	59
II.6.1.- Configuración de cargas hidráulicas y dirección de flujo del agua subterránea	59
III.- HIDROGEOQUIMICA	64
III.1.- Antecedentes	64
III.2.- Muestreo	65
III.3.- Validación de datos	67
III.4.- Calidad de agua	70
III.5.- Clasificación del agua por subcuencas	73
III.6.- Grupos presentes	76
III.7.- Clasificación de agua para riego	81
III.8.- Mapas de isovalores por ion dominante (elementos mayores)	85
III.9.- Elementos traza interacción agua-roca	89
III.10.- Índices de saturación de los minerales	89
III.11.- Geoquímica de carbonatos	92
III.12.- Geoquímica de sulfatos	94
III.13.- Proceso de dolomitización	95
DISCUSION, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
APENDICE	103
Tabla de datos fisicoquímicos de campo, laboratorio y elementos traza	103
Tabla a exportar para hacer hidrogeoquímica en AquaChem	104
BIBLIOGRAFIA	105

LISTA DE FIGURAS

1- Localización del acuífero de San Nicolás Tolentino	3
2- Vías de acceso al área del ASNT	5
3- Ejemplo de la sonda eléctrica Geosistema SA, modelo GS-SLP8	9
4-Celda de aislamiento y equipo utilizado para la medición de los parámetros de campo	10
5- Toma de muestras de agua y medición de parámetros de campo en aprovechamientos	16
6- Plano geológico del Acuífero de San Nicolás Tolentino	30
7- Columna Estratigráfica del Acuífero de San Nicolás Tolentino, S.L.P	43
8- Sistema de flujo. Efectos y manifestaciones de flujo gobernado por gravedad en una cuenca regional (Tóth, 2000)	53
9- Plano de configuración de la profundidad del nivel estático 2010 para cada una de las subcuencas	58
10- Dirección de flujo del agua subterránea área I (San Nicolás Tolentino)	61
11- Dirección de flujo del agua subterránea área II (Ocampo Paraiso)	62
12- Dirección de flujo del agua subterránea área III (Santa Catarina)	63
13- Aprovechamientos muestreados que cubren las tres subcuencas de estudio: San Nicolás Tolentino (SNT área I), Ocampo Paraíso (OP área II) y Santa Catarina (SC área III)	65
14- Ejemplo de la hoja de campo que se uso para el muestreo de agua subterránea (CONAGUA, 2011)	66
15- Balance de Electroneutralidad	68
16- Clasificación de agua por medio de los diagramas de Piper y Durov según Custodio, (1976) que muestran parámetros químicos predominantes	71
17- Distribución geográfica de las diferentes familias de agua, y la interacción del agua subterránea con la litología	75
18- a) Relación Temperatura (°C)-C.E ($\mu\text{s}/\text{cm}$), b) Temperatura (°C) –Na (mg/l), c) Temperatura (°C)-STD (mg/l) y d) Temperatura (°C)-Cl (mg/l)	78
19- Ubicación geográfica de los diferentes grupos de agua	80

20- Diagrama de Scholler, (1962)	79
21- Relación de Temperatura Vs Fluoruro (mg/l)	81
22-Diagrama de Wilcox, (1967) clasificación de agua para riego	82
23- Mapa de isovalores de Sulfatos (SO_4^-) en (mg/L)	85
24- Mapa de isovalores de Potasio (K^+) en (mg/L)	86
25- Mapa de isovalores de Sodio (Na^+) en (mg/L)	87
26- Mapa de isovalores de Bicarbonato (HCO_3^-) en (mg/L)	88
27- Índice de Saturación (IS) respecto a la Calcita (CaCO_3)	92
28- - Índice de Saturación (IS) respecto a la Dolomita (CaCO_3)	93
29- - Índice de Saturación (IS) respecto a la Estroncionita (SrCO_3)	93
30- - Índice de Saturación (IS) respecto a la Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	94
31- - Índice de Saturación (IS) respecto a la Barita (BaSO_4)	95

LISTA DE TABLAS

1- Vértices del polígono administrativo del acuífero de San Nicolás Tolentino	2
2- Principales tipos de conservadores de muestras de agua subterránea	16
3- Datos para la configuración del NE, San Nicolás Tolentino, 2010	55
4- Datos para la configuración del NE, Ocampo Paraiso, 2010	56
5- Datos para la configuración del NE, Santa Catarina, 2010	57
6- Resumen de los resultados de parámetros de campo	67
7- Resumen estadístico de las principales características fisicoquímicas de agua subterránea	67
8- Resultados de laboratorio y balance de Electroneutralidad del ASNT reportado en porciento de error para cada una de las muestras	69
9- Clasificación de familias de agua mostradas en porcentaje	72
10- Clasificación de las familias de agua en el (Área I)	73
11- Clasificación de las familias de agua en el (Área II)	74
12- Clasificación de las familias de agua en el (Área III)	74
13- Clasificación de grupos de agua subterránea	77
14- Variables para la clasificación del agua para riego en base a su salinidad y riesgo por adsorción de sodio	84
15- Índices de Saturación (IS) respecto a varios minerales para las muestras usadas en la modelación de interacción agua/roca	91
16- Familias químicas de agua y formaciones geológicas para cada aprovechamiento de cada subcuenca	99

RESUMEN

El acuífero de San Nicolás Tolentino, S.L.P., se encuentra situado en la porción central del estado del mismo nombre, está formado por tres subcuencas con características geohidrológicas contrastantes: La de San Nicolás Tolentino (SNT) al norte, capta las aguas subterráneas por medio de norias y manantiales, de un acuífero somero en materiales granulares de origen aluvial y fluviolacustre; La de Ocampo Paraíso (OP), al este, donde el acuífero se aloja en material granular, tiene gran influencia del Río San Nicolás, y el agua se capta por medio de pozos y norias y la de Santa Catarina (SC), donde la mayoría de los aprovechamientos son pozos, algunas norias y manantiales. En la cual se manifiesta la presencia de dos acuíferos, uno de tipo libre alojado en un medio granular, y otro profundo, alojado en el contacto de rocas calcáreas del Cretácico, con rocas volcánicas (ignimbrita) que le sobreyacen y constituye la capa sello.

En el presente trabajo se reportan los resultados de un censo de aprovechamientos hídricos en las tres subcuencas, en los que se midió el nivel estático, y se realizó el muestreo de las aguas para determinar las características físicas y químicas de estas. Ambos tipos de datos (piezométricos y físico químicos) permitieron conocer la dirección del movimiento de las aguas subterráneas en las subcuencas, las diferentes familias de aguas en el acuífero, la dinámica del flujo subterráneo y la interacción agua/roca y además, determinar la calidad y usos de estas aguas para los diferentes usos que le dan los habitantes de esta región.

Las configuraciones de elevaciones sobre el nivel del mar de los niveles estáticos permitieron establecer las direcciones del flujo de las aguas subterráneas, y estas resultaron coherentes con las direcciones de flujo obtenidas mediante las configuraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) y de cada uno de los cationes y aniones por separado. En general, la dirección de movimiento de las aguas subterráneas es reflejada por el sistema de drenaje principal que circula por las planicies de cada una de las subcuencas.

Las familias de aguas captadas (por su ubicación en los diagramas de Piper-Palmer y de Stiff) en cada uno de los acuíferos es como sigue: Para la subcuenca de SNT se determinaron las familias bicarbonatada mixta 20% y bicarbonatada cálcica en 80%. Para la de OP, bicarbonatada magnésica en 12.5%, bicarbonatada mixta en 37.5% y bicarbonatada cálcica en un 50%. Para la de SC, en el acuífero libre se tienen las familias; bicarbonatada sódica en un 6.25%; bicarbonatada mixta en un 31.25% y bicarbonatada cálcica en un 56.25%. Para el acuífero profundo, la familia sulfatada cálcica en un 6.25%.

La distribución de estas familias de aguas en el subsuelo, resulta coherente con el marco geológico del acuífero y sugiere que, la recarga ocurre por infiltración en las márgenes de las subcuencas por aguas que drenan las rocas que delimitan el acuífero (calizas de plataforma, yesos y/o anhidritas, además de rocas volcánicas).

INTRODUCCIÓN

El agua superficial total que se encuentra contenida en ríos, corrientes de agua y lagos es solo alrededor del 1.5% del volumen del agua total que se encuentra debajo de la superficie terrestre. Generalmente el agua subterránea permanece fuera de nuestra vista. Sin embargo, en algunas ocasiones se presenta de manera natural a la superficie en forma de manantial. (González-Grijalva, *et. al.*, 2009). La importancia de los acuíferos en regiones donde la precipitación es muy escasa es mucho más relevante que en regiones más húmedas donde ríos y manantiales satisfacen las necesidades de abastecimiento en las poblaciones y propician el desarrollo socioeconómico. De los acuíferos, es importante conocer su morfología y naturaleza así como sus dimensiones y propiedades químicas de sus aguas para evaluar los recursos potencialmente explotables; así como la investigación de la localización de las áreas de recarga y descarga, y los procesos que pueden modificar sus condiciones naturales.

En general se documentan los factores geológicos generales que influyen en la recarga y direcciones de flujo del agua subterránea, sobre su composición química, su uso para consumo humano y agrícola. Esta información es útil para obtener una imagen de cómo ha ido impactando el acuífero a las modificaciones en su balance hídrico, tanto de manera natural como al inducido por el hombre.

Este trabajo es producto de los convenios de colaboración con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011) y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Localización

El acuífero de San Nicolás Tolentino (ASNT) se encuentra situado en la porción centro del estado de San Luis Potosí, entre las coordenadas geográficas 21°53' y 22°20' de latitud norte y 100°11' y 100°44' de longitud oeste. Administrativamente comprende el municipio de San Nicolás Tolentino, y parte de los municipios de Armadillo de los Infante, Villa de Zaragoza, Ciudad Fernández y Río Verde, S.L.P., los límites del polígono del acuífero administrativo se presentan en la Tabla 1 y tiene

un área de 1, 696 km² de acuerdo con el Diario de la Federación publicado en diciembre del 2011.

Tabla 1- Vértices del polígono del acuífero de San Nicolás Tolentino, CCCXLVI. – REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA IX "GOLFO NORTE" ACUÍFERO 2416. Datum (WGS-1984-Zone_14N) (Diario Oficial, Diciembre 2011)

ID	UTM X	UTM Y	LONGITUD	LATITUD
1	364737.84	2424824.1	100°18' 34.638"	21°55' 20.937"
2	363477.47	2419734.86	100°19' 17.035"	21°52' 35.103"
3	355358.31	2423649.54	100°24' 1.121"	21°54' 40.052"
4	349901.86	2421973.86	100°27' 10.694"	21°53' 43.920"
5	337289.7	2423679	100°34' 30.697"	21°54' 35.317"
6	332658.82	2433648.05	100°37' 15.716"	21°59' 57.859"
7	327612.42	2436437.61	100°40' 12.706"	22°1' 26.783"
8	322522.26	2457053.79	100°43' 18.321"	22°12' 35.164"
9	322450.3	2459938.42	100°43' 21.979"	22°14' 8.913"
10	327168.84	2461421.45	100°40' 37.784"	22°14' 58.848"
11	344673.24	2464277.09	100°30' 27.441"	22°16' 37.681"
12	347858.24	2466047.78	100°28' 36.784"	22°17' 36.273"
13	349944.88	2469066.56	100°27' 24.900"	22°19' 15.081"
14	352196.28	2469277.93	100°26' 6.296"	22°19' 22.654"
15	353095.59	2465365.45	100°25' 33.577"	22°17' 15.725"
16	357778.19	2462255.48	100°22' 48.988"	22°15' 36.022"
17	363297.6	2449371.07	100°19' 32.255"	22°8' 38.694"
18	372249.2	2443569.12	100°14' 18.165"	22°5' 32.491"
19	375993.4	2441735.14	100°12' 7.020"	22°4' 33.831"
20	375215.52	2430097.13	100°12' 30.946"	21°58' 15.197"
21	377667.97	2426414.17	100°11' 4.457"	21°56' 16.059"
22	373116.81	2420078.07	100°13' 41.315"	21°52' 48.862"

El ASNT, limita al norte con los acuíferos de Villa Hidalgo y Cerritos-Villa Juárez, al sur con el acuífero de Santa María del Río, al poniente con los acuíferos de San Luis Potosí y Villa de Reyes-Jaral de Berrios y al oriente con el acuífero de río ver Figura 1.

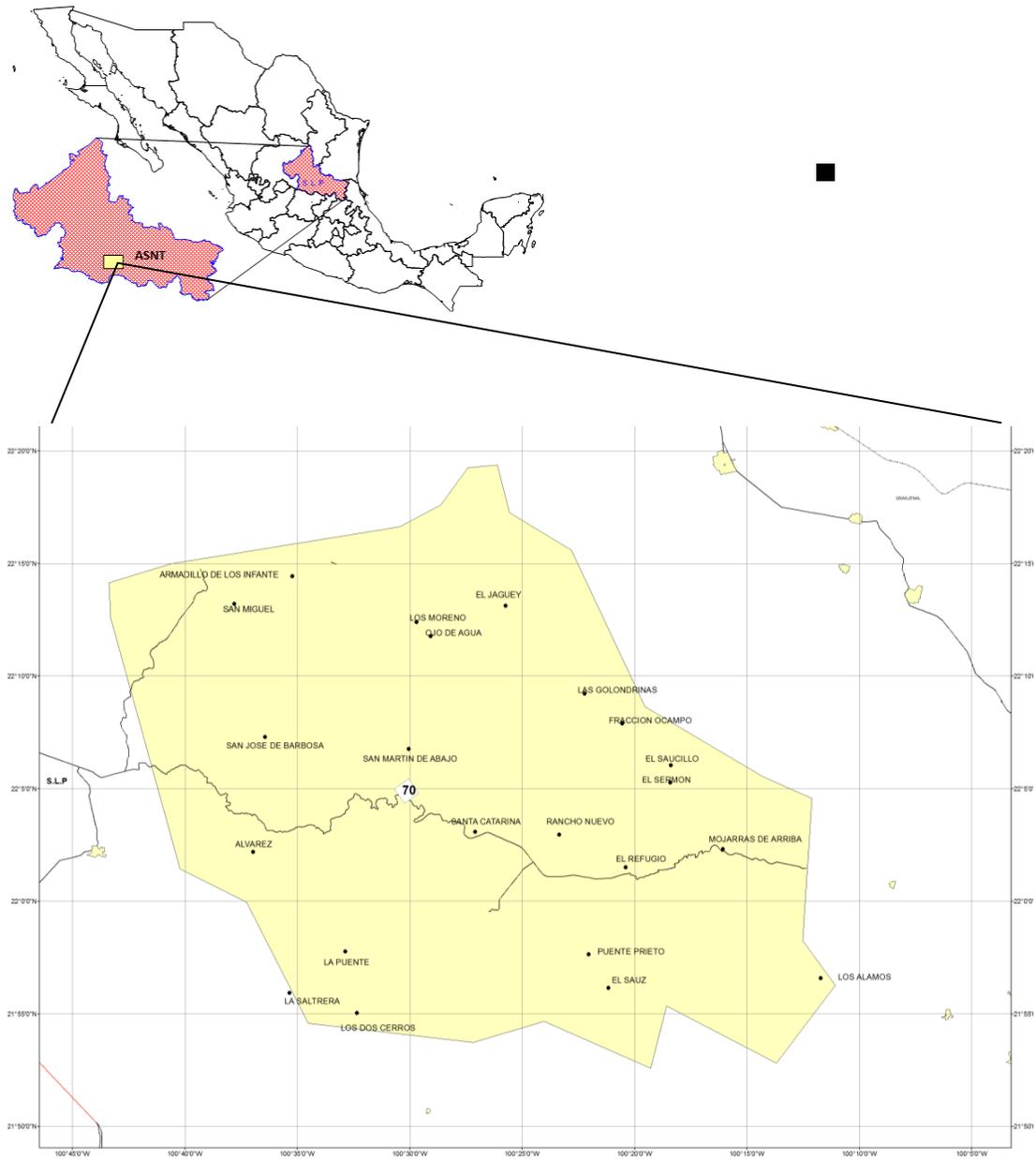


Figura 1- Localización del acuífero de San Nicolás Tolentino (Modificado CONAGUA, 2011)

Objetivo

Determinar las direcciones de flujo, la química del agua subterránea y la posible interacción agua/roca en el acuífero de San Nicolás Tolentino.

Objetivos Específicos

- Medición de parámetros de campo (temperatura, pH, conductividad eléctrica, Eh, oxígeno disuelto y alcalinidad) y toma de muestras de agua subterránea para identificar elementos mayores y elementos traza.
- Determinar la calidad química de las aguas, elementos mayores y traza del acuífero, las familias de las aguas subterráneas, su dirección de flujo y la posible interacción agua-roca.
- Configurar planos de Isovalores para cada uno de los distintos cationes y aniones, conocer la variación química del agua subterránea desde las zonas de recarga hasta donde son captadas por los pozos y las distintas mezclas entre ellas.

Vías de Comunicación

De la ciudad de San Luis Potosí el acceso al ASNT es por tres rutas: 1) por la Carretera Federal No.70, la cual prácticamente atraviesa la porción sur del acuífero; en su tramo San Luis Potosí-Río Verde, se recorren 33 km hasta donde inicia el acuífero; 2) por la misma Carretera Federal No 70, tramo San Luis Potosí-Río Verde se recorren 26 km hasta el poblado El Xoconostle, de donde se continúa por un tramo pavimentado de 22 km que comunica a la cabecera municipal de Armadillo de Los Infante, que se localiza cerca de la esquina noroeste del acuífero y 3) por la Carretera Federal No 57, tramo San Luis Potosí-Matehuala, se recorren 40 km, hasta el entronque de la carretera que comunica con la cabecera municipal de San Nicolás Tolentino, recorriéndose 29 km hasta este poblado localizado en la porción norponiente de la carta Santa Catarina. La comunicación con los diferentes poblados y rancherías ubicadas dentro del área que ocupa el ASNT. Es por medio de terracerías que conectan con las carreteras antes mencionadas Figura 2.

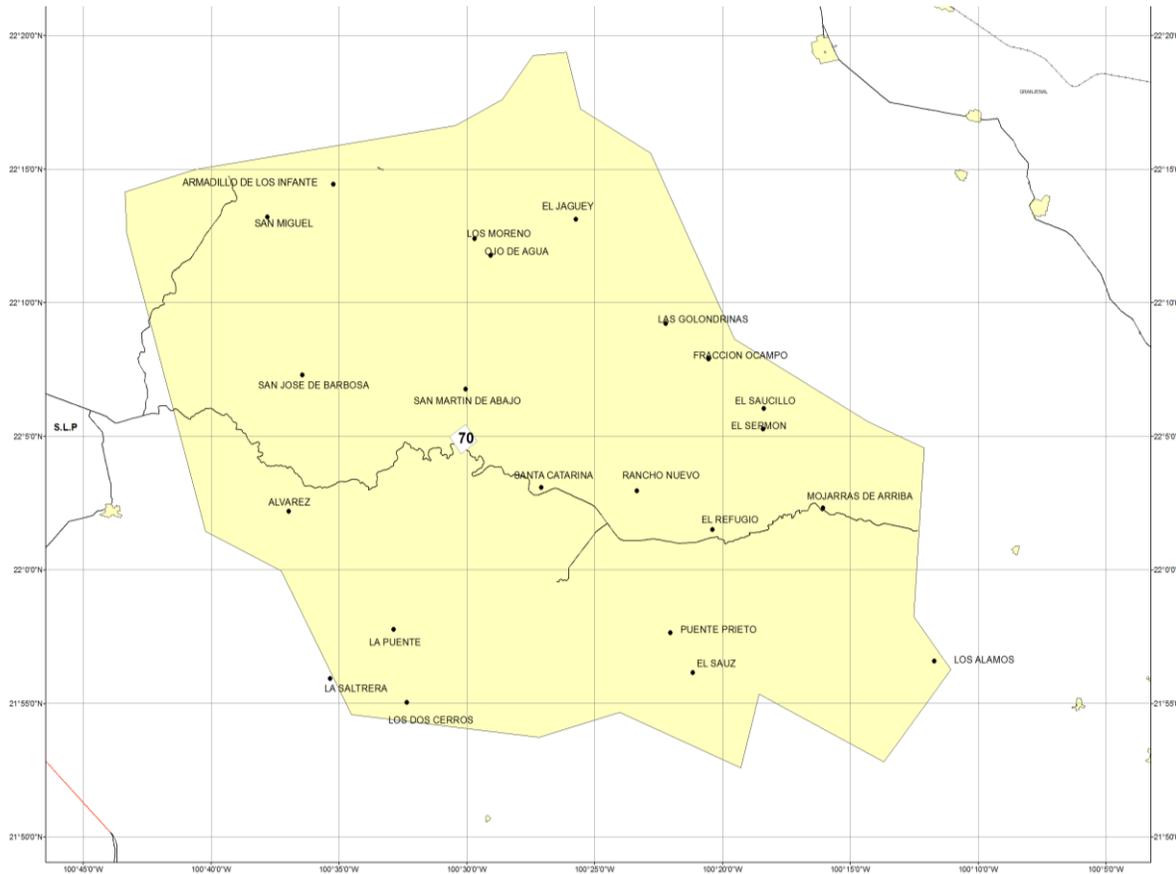


Figura 2- Vías de acceso al área del ASNT (Modificado CONAGUA, 2011)

Estudios Previos

El trabajo de síntesis geológica de la parte este central de México realizado por (Carrillo-Bravo, 1971), pone de manifiesto que la secuencia de rocas calcáreas y siliciclásticas marinas de edad Mesozoica que aflora en el área de estudio, corresponden a unidades depositadas sobre una plataforma carbonatada que estuvo activa desde el Aptiano hasta el Maastrichtiano. La revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Altiplano realizada por Labarthe-Hernández *et. al.*, (1982) documenta la distribución y características litológicas de las unidades clásticas continentales terciarias y las unidades volcánicas (lavas e ignimbritas) presentes en el área que ocupa el ASNT, y las estructuras formadas por

plegamientos durante la orogenia Laramide de fines del cretácico y principios del terciario y por el evento de fallamiento extensional del Terciario Medio (Oligoceno) en la región. Este mismo trabajo reporta la presencia de un vulcanismo Cuaternario basanítico en el oeste del área aquí considerada. Nuevos trabajos cartográficos a escala 1:50,000 realizado por el SGM reafirman la cartografía que ya había sido reportada con anterioridad, aportan nuevos datos y documentan la ubicación de los recursos minerales y/o de posible interés económico (Barbosa-Gudiño *et. al.*, 2008).

Labarthe-Hernández y Tristán-González, (1984) durante la cartografía de la Hoja Salitrera documenta la geología de la parte sur del área que ocupa el ASNT, destacándose en este trabajo, el reporte de un estratovolcán formado en el Oligoceno denominado San Martín. Este volcán tiene una importancia especial sobre todo para la Geohidrología de la subcuenca Santa Catarina, porque en su evolución generó el colapso de un sector de su estructura, una avalancha que se emplazó hacia el valle de Santa Catarina (Labarthe-Hernández y Sánchez-Pérez, 1999).

La mayor parte del área que ocupa el ASNT ha sido estudiada a semidetalle tiene una geología por diversos autores Garza-Blanc, (1978); Zapata-Zapata y Pérez-Venzor, (1979); Labarthe-Hernández y Tristán-González, (1984); y su geología general sintetizada y revisada por Labarthe-Hernández *et. al.*, (1982). Aportes importantes a cuanto estratigrafía de las secuencias sedimentarias marinas de plataforma fueron documentados por Torres-Hernández, (1994); Alencaster-Ibarra *et. al.*, (1999) y López-Doncel (2003), trabajo de cartografía geológico-minera realizado por el Servicio Geológico Mexicano.

Trabajos de cartografía geológica realizado por el SGM apporto nuevos datos, sobre todo en lo referente a los recursos mineros y posibilidades económicas en la región (Alarcón-López, 2006; Carrizales-Águilar, 2006); (Sánchez-González, 2007; Maldonado-Lee, 2006).

Con todos estos trabajos se considera cubierto adecuadamente la parte geológica del área que ocupa el ASNT.

En lo geohidrológico aunque son pocos los estudios se documentan a continuación.

El estudio geohidrológico de la región norte de San Nicolás Tolentino realizado por (Medina-Rivero, 1965), demuestra la existencia de agua para usos ganaderos y para la agricultura a pequeña escala, así como composición química de la agua y la existencia local de buen número de manantiales y afloramientos geológicos. Con un acuífero libre, sobreexplotado no afectado por ningún tipo de veda (INEGI, 2001) documenta un total de 120 aprovechamientos con profundidades a nivel estático de 6 a 20 m., predominando la familia cálcico-bicarbonatada, con una calidad de dulce a salada y su recarga principal viene de los escurrimientos de las partes altas que la rodean. El conocimiento de la condición geohidrológica del acuífero mediante el diagnóstico y el análisis de los niveles de agua subterránea (CONAGUA, 2011) proporciona la información necesaria que permite calcular la recarga así como la disponibilidad media anual del agua subterránea, mediante actividades de campo como censos de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, conocimiento geológico y un balance de aguas subterráneas.

Metodología

- *Recopilación, análisis y depuración de la información:* para llevar a cabo la realización de este estudio se efectuó una búsqueda de toda la información geológica, hidrológica, topográfica, y toda aquella de interés hidrogeológico relacionada con el área y sus alrededores inmediatos. Se ordenó la información necesaria (informes, fotografías, mapas, secciones, esquemas, gráficas, planos, etc.).

La información general de piezometría que se analiza en el presente trabajo, fue tomado del informe “Estudio para determinar la disponibilidad del acuífero: San Nicolás Tolentino en el Estado de San Luis Potosí” (CONAGUA, 2011). Se contó además con los resultados de 26 análisis físicoquímicos y iones principales de aguas reportadas en dicho informe, además se obtuvo el

análisis de elementos traza. Se muestreo nuevamente el aprovechamiento IG-101, un pozo que se tenía duda sobre los resultados que se reportan en el estudio previo mencionado, por contrastar mucho en Sólidos Totales Disuelto (STD), Sulfatos (SO_4), Conductividad Eléctrica (CE) alta, etc. respecto de las otras muestras. Se obtuvieron 8 muestras nuevas de agua en obras y sitios seleccionados, para complementar el estudio de hidrogeoquímica de las aguas subterráneas. Para estas muestras se obtuvo en el laboratorio los iones mayores y elementos traza.

Las direcciones de flujo del agua subterránea se establecieron por dos métodos: 1) La medición de niveles estáticos de las norias y pozos. 2) Los resultados del análisis fisicoquímicos de las aguas subterráneas (sólidos totales disueltos, cationes y aniones) e inferirla mediante los cambios químicos de las mismas.

- *Actividades de campo:* a continuación se describen las actividades realizadas, así como el procedimiento utilizado en cada sitio para la obtención de información, estas actividades consideraron: censo de aprovechamientos, piezometría, medición de parámetros de campo del agua subterránea, toma de muestras del agua subterránea.
- Censo de Aprovechamientos: la información obtenida incluye un censo de los aprovechamientos hídricos (CONAGUA, 2011), para seleccionar los 7 pozos y 1 noria a los que se les realizó mediciones de parámetros de campo y la toma de muestras de agua subterránea.
- Piezometría: se contó con 8 aprovechamientos con nivel estático distribuidos en toda la zona. Se realizó mediante el uso de una sonda eléctrica de Geosistemas, S.A., modelo GS-SPL8, constaba de un carrete y un cable

eléctrico del número 18 el cual fue calibrado diariamente al inicio de los trabajos para obtener la mayor precisión posible en las mediciones Figura 3.



Figura 3- Ejemplo de sonda eléctrica Geosistemas SA, modelo GS-SPL8

- Medición de parámetros de campo: el registro de los parámetros de campo durante la realización de un muestro de agua ayuda a tener datos precisos de temperatura, pH y conductividad eléctrica, estas mediciones son necesarias debido a que varios de los parámetros que tienen que medirse se ven alterados pasando un tiempo relativamente corto, por lo que su medición en laboratorio tendrá cierta deficiencia, por lo tanto deben hacerse directamente en el lugar de la toma de la muestra. Parámetros como cambios en las condiciones redox provocan precipitación de óxidos.

La medición de los parámetros ya mencionados, así como el potencial *redox* (Eh) del agua subterránea, se llevó a cabo en una celda de aislamiento en la que tiene una interacción limitada con la atmósfera, previniendo cambios en su composición original Figura 4. La medición de la temperatura, pH y conductividad eléctrica se realizó con un aparato digital portátil modelo PC18, serie 3971, marca *Conductronic* (medidor de pH- μ S- $^{\circ}$ C, calibrado por *Conductronic*, S. A.). A continuación se presenta una breve descripción de las

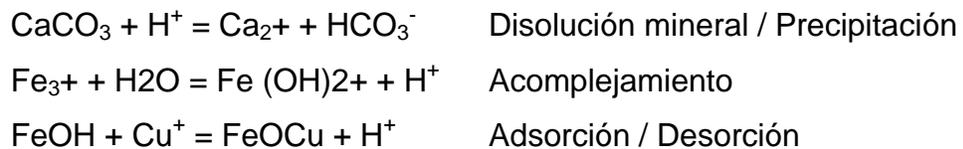
características de cada parámetro, así como las especificaciones del equipo utilizado.



Figura 4- Celda de aislamiento y equipo utilizado para la medición de los parámetros de campo.

a).- pH

El pH de una solución es el logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno en moles por litro. Cuando el agua subterránea es removida del acuífero, los controles físicos que limitan la actividad del ión hidrógeno cambian, y así, el pH cambia también. La actividad del ion hidrógeno es una variable clave en los sistemas de agua subterránea, ya que este ion participa en la mayoría de las reacciones químicas que afectan la composición del agua. Por ejemplo en las siguientes reacciones se puede observar la actividad del ion H^+ .



La calibración de las mediciones de pH se realizó en cada aprovechamiento utilizando la celda de aislamiento misma que cuenta con dos depósitos que contienen solución buffer del 4.0 y 7.0 respectivamente, las cuales toman la temperatura del agua en circulación proveniente del aprovechamiento en el

cual se lleva a cabo la toma de lecturas de los parámetros de campo. La solución buffer utilizada tiene las siguientes características: pH 7.00 y 4.01 a 25° C, marca *MLLKT-J. T. Baker*, lote no. Y32C14, A18C04, fecha de caducidad 04/12, certificación NIST SRM186le SRM185g.

Ya que existe dependencia del pH con la temperatura, debe especificarse el valor de la misma al efectuar la medición.

b).- Temperatura °C.

Las reacciones químicas de interacción agua-roca en el acuífero son función de la temperatura, por lo tanto, la medición en campo de este parámetro durante la toma de muestra es de vital importancia en los cálculos relacionados con interpretaciones hidrogeoquímicas y para los cálculos termodinámicos relacionados con la química del agua. La temperatura del agua subterránea generalmente varía muy poco, por lo que cuando su incremento es notable, permite diferenciar diferentes profundidades de circulación. Su medición puede realizarse con un termómetro estándar de mercurio, pero es más recomendable utilizar termómetros digitales con una aproximación de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. La Temperatura se midió con un termómetro marca *Alla France*, rango -8° a 32° C, precisión 0.1° C, certificación ASTM E1 595.063EU.

c).- Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica de una solución es su capacidad para transportar la corriente eléctrica. Debido a que la electricidad se transporta por la migración de los iones en solución, la conductividad se relaciona con la concentración iónica total. Como la actividad iónica es afectada por la temperatura, la conductividad eléctrica incrementa con la temperatura. Se incrementa aproximadamente 2% por cada grado centígrado de incremento de la temperatura (Lloyd y Heathcote, 1985). Esto se debe a que la viscosidad del agua disminuye con el incremento de la temperatura y por lo tanto se reduce

la resistencia al movimiento de los iones en solución. La determinación de este parámetro se efectúa por medio de un conductivímetro. La unidad de medida utilizada es el recíproco de la resistencia en *ohms* y se expresa como *microsiemen* por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Para la calibración de las mediciones de conductividad eléctrica se utilizó una solución de NaCl, 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25° C marca *Termo Orion*, lote no. HS1, fecha de caducidad 08/12, certificación NIST SRM2202 y se realizó en cada muestra durante la etapa de trabajo de campo.

d).- Oxígeno Disuelto (O_2)

La presencia de oxígeno disuelto en el agua subterránea normalmente indica reciente exposición del agua a influencia atmosférica. Una vez que la muestra es tomada, la entrada de oxígeno a partir de la atmósfera puede ocurrir rápidamente por el cambio de un sistema cerrado como lo es el acuífero al ambiente atmosférico; por lo tanto, el uso de la celda de aislamiento para esta determinación es sumamente importante.

El electrodo que se utiliza para la medición del oxígeno disuelto consiste de un ánodo de plomo cubierto por polietileno, rodeado de cátodo de plata coaxial que a su vez está cubierto con una membrana de polietileno permeable al oxígeno. El espacio anular entre los electrodos contiene una solución de un electrolito alcalino. El funcionamiento del electrodo se basa en que el oxígeno se difunde en la membrana y posteriormente se reduce en el cátodo, lo que produce una diferencia de potencial proporcional a la presión parcial del oxígeno disuelto en el agua.

Las mediciones de oxígeno disuelto se realizaron con un aparato digital portátil marca Conductronic modelo Ox25, serie 213, medidor de Oxígeno Disuelto [mg/l (ppm) y porcentaje (%)]. La calibración de las mediciones de oxígeno disuelto se realizó mediante una corrección por cambio de presión barométrica y se llevó a cabo en cada sitio donde se tomó la lectura de parámetros de campo.

e).- Alcalinidad

El término alcalinidad total se define formalmente como la suma de equivalentes en forma de bases que reaccionan con un ácido fuerte, o bien, como la capacidad de una solución para aceptar protones. Estas bases comúnmente son: bicarbonatos, boratos, iones de ácido silícico, bisulfuros, aniones orgánicos e hidróxidos. Generalmente en las aguas naturales con pH entre 6-9, los boratos, iones de ácido salicílico, bisulfuros, aniones orgánicos e hidróxidos, están presentes en cantidades muy pequeñas comparadas con las concentraciones de carbonatos y bicarbonatos, por lo que, para fines prácticos, se considera como alcalinidad total a la suma de bicarbonatos y carbonatos ($\text{HCO}_3^- + 2\text{CO}_3^{2-}$).

Determinación de la alcalinidad por el método de Titulación de Gran

La alcalinidad es uno de los parámetros que sufren alteración fácilmente cuando el agua subterránea se pone en contacto con la atmósfera por lo que es una cuantificación que es conveniente realizar en campo. La determinación de la alcalinidad se llevo a cabo por medio de la titulación de la muestra por el método de Gran, cuyo principio consiste en que se rebasa el punto de equivalencia (pH = 4.3) en que se ha convertido el total de HCO_3^- a H_2CO_3 y la concentración de protones se incrementa linealmente por la cantidad de ácido fuerte añadido. Para esto se utilizó un titulador marca Hach mod. AL-DT con un rango de medición de alcalinidad de 10 a 4,000 mg/l. El equipo consiste en una pistola graduada y ampollitas de ácido sulfúrico a 0.16N.

El punto de equivalencia se obtiene a partir de las lecturas de pH para diferentes cantidades de ácido añadidas y registradas en campo. Posteriormente se obtuvo el valor de la alcalinidad para cada una de las muestras, al graficar los valores calculados de volumen de ácido añadido a

determinado volumen de muestra de agua subterránea, con la fórmula de la función de Gran, ambos factores y se puede determinar el punto aproximado en que el pH alcanza el punto de equivalencia de 4.3.

La fórmula de la función de Gran es la siguiente:

V = volumen de muestra

V_o = mililitros de ácido añadido

$N_{ácido}$ = normalidad del ácido que se añadió

La alcalinidad total se obtiene mediante la fórmula siguiente:

f).- Potencial de óxido-reducción (Eh)

Las lecturas de potencial REDOX se midieron con un aparato digital portátil Pc18 de la marca CONDUCTRONIC y se realizaron en cada una de las obras en las que se muestreó agua durante la etapa de campo, para las verificaciones del sensor se utilizó una solución *Redox*.

Aunque el Eh es una medida que se debe de considerar como cualitativa, sí se registra durante la etapa de campo además del pH. Con esto se tiene una herramienta adicional para caracterizar las condiciones físicas y químicas del agua subterránea. Algunas reacciones dependen del pH o del Eh por separado; sin embargo algunas otras son función de ambos parámetros. El Eh se mide con un electrodo combinado que consiste de filamento de platino y un electrodo de referencia. El elemento sensible es el filamento de platino, por lo que debe mantenerse limpio y pulido para evitar mediciones erróneas. Algunos elementos son muy sensibles a las reacciones redox, y algunos de estos forman especies fuertes en el agua; y como consecuencia, el Eh debería ser considerado para calcular las especies disueltas dominantes. Considerando que el electrodo de referencia usado fue de tipo $Ag/AgCl_2$: Es preciso realizar la conversión del valor mediante la siguiente fórmula:

$$Eh = Eo + 221.79 - 0.9286 \times \text{Temp.}^{\circ}\text{C}.$$

Donde Eo es el valor medido en campo

- Toma de muestras de agua: se tomaron un total de 8 muestras adicionales en pozos, los cuales, en conjunto, constituyen una muestra representativa de la población analizada. Para la recolección de las muestras de agua se tomó como base el “Protocolo de Toma de Muestras de Agua Subterránea” Armienta *et al.*, (1987). Para que el muestreo sea correcto y evitar alteraciones en las muestras tanto en su recolección, como en su almacenamiento y transporte hasta su análisis en laboratorio se tuvieron que considerar los siguientes puntos:

Las muestras para elementos mayores (Ca, Na, K, Mg, Si, F, Cl, NO₃, SO₄).se tomaron en envases de polietileno de 500 ml.

Los envases utilizados fueron previamente lavados en laboratorio con jabón libre de fosfato, ácido clorhídrico al 10% y agua des-ionizada y enjuagados tres veces con agua de los aprovechamientos en el momento de la visita de campo. Todas las muestras se mantuvieron en refrigeración hasta su análisis en el laboratorio, no excediendo su almacenamiento en 5 días. Las muestras para analizar por elementos traza se conservaron con HNO₃.

La conservación de las muestras tiene por objeto retardar los cambios químicos y biológicos que pueden ocurrir en las muestras de agua como resultado del proceso natural de adaptación a condiciones ambientales diferentes a las que tiene el agua subterránea a profundidad. En la (Tabla 2) se realiza una descripción de los principales conservadores para las muestras de aguas subterráneas.

Ya en el campo, se enjuagó el recipiente con agua de la descarga del aprovechamiento antes de ser tomada la muestra. Se adaptó una manguera de diámetro pequeño a la válvula de descarga ubicada en la tubería del aprovechamiento y se dejó fluir el agua durante aproximadamente 5 minutos antes de la toma de la muestra.

Tabla 2- Principales tipos de conservadores de muestras de agua subterránea.

CONSERVADOR	FUNCIONES	ESPECIES PRESERVADAS
Refrigeración	Disminuye la precipitación de sales Funciona como inhibidor bacteriano Disminuye la oxidación de metales Disminuye la pérdida de gases	Alcalinidad, nitrógeno orgánico, fósforo, DOC, BOC, bacterias, coliformes. Recomendable en muestras para análisis químicos
Ácido Nítrico HNO_3	Previene la oxidación de metales iónicos reducidos Previene la precipitación de los iones metálicos como sulfuros, óxidos o carbonatos Previene la adsorción de los metales en las paredes de la botella de plástico	Metales pesados como hierro, manganeso, zinc, cobre. Recomendable para la determinación de metales disueltos
Ácido Sulfúrico H_2SO_4	Limita la acción bacteriana en el interior de la botella de muestreo	Nitratos

Posteriormente se procedió a llenar el recipiente hasta el tope eliminando la mayor cantidad de burbujas de aire dentro del frasco Figura 5.



Figura 5- Toma de muestras de agua y medición de parámetros de campo en aprovechamientos.

- *Actividades de Gabinete:*

a).- *Programas de computación utilizados*, es una práctica común en diferentes tipos de estudios hidrogeológicos que utilizan información de una propiedad medida en diferentes puntos, en este caso la profundidad (o elevación) del nivel estático, representan su distribución espacial por medio de la medición del nivel estático del agua subterránea en cada una de las obras muestreadas, expresando en altura sobre el nivel del mar, en el plano de la

ubicación de los pozos y norias, permite trazar curvas de igual valor, las cuales reflejan el gradiente, y por lo tanto permiten inferir la dirección del agua subterránea. Este tipo de configuraciones se realizan seleccionando un método de interpolación de acuerdo con diferentes criterios, sin embargo todas las configuraciones elaboradas representan en forma esquemática la distribución espacial de las aguas subterráneas. En el programa *AutoCAD* y *Surfer* 8.0 (Golden Software, 2002), se generaron los planos, dispuestos en diferentes *layers* para un mejor manejo de la información del área de estudio, y en el programa *ArcMap* se armó un sistema de información geográfica (SIG) donde se integran los resultados obtenidos de *AutoCad*. La metodología empleada para la depuración de la información consistió en generar una tabla de datos en *Excel* que contuviera sus coordenadas geográficas y la clave del pozo. Habiendo generado dicha tabla se procedió a su representación espacial por medio de puntos que representaban cada uno de los aprovechamientos, dicha representación permitió identificar aquellos que se encontraban dentro de la zona de estudio, así como los que por algún error en su captura pudieran estar ubicados fuera del área de estudio. Después de asegurarse que todos los pozos estaban distribuidos dentro de la zona de estudio, se elaboraron las tablas y los mapas necesarios para este proyecto.

El uso del programa *Aqua Chem* (*Waterloo Hydrogeologic*, 1997, versión 3.7.42). Por medio de este *software* se manejaron los resultados de laboratorio y algunos parámetros físicos, lo que permitió obtener balances de electro-neutralidad entre otros, además de la elaboración de diagramas de *Stiff (1951)*, *Piper*, y *Palmer (1944)* etc. Para identificar familias y grupos de aguas. Se elaboró por medio de este software un archivo de entrada para manejarlo en *PHREEQC*. Las primeras dos herramientas se utilizaron exclusivamente para la edición y generación de mapas; sin embargo, la tercera se utilizó también para la integración de la tabla de datos referida espacialmente y que puede ser utilizada como un sistema de consulta de la

información, en la que se pueden agregar nuevos datos, modificarlos y eliminarlos, teniendo como cualidad principal la referencia espacial para poder obtener un Sistema de Información Geográfica (SIG).

- *Actividades de laboratorio:* las técnicas analíticas utilizadas se aplicaron de acuerdo a las recomendaciones descritas por Armienta *et al.*, (1987). Para su análisis las muestras de agua colectada fueron enviadas a los Laboratorios de Análisis Químicos de la Facultad de Ingeniería de la UASLP, en la que se determinaron los parámetros considerados como mayores (aniones y cationes).

Para el análisis de Ca, Mg, Na, y K se utilizó el método de Espectrometría de Absorción Atómica por Flama (FAA) con un Espectrofotómetro *Perkin-Elmer AA-5100*. Los cloruros fueron analizados por el método Argentométrico y los Sulfatos con el método Turbidimétrico. Por último el análisis de nitratos se realizó con el método Colorimétrico.

Descripción detallada de las técnicas de laboratorio.

a).- pH

Representa el potencial de iones hidrogeno, o bien, se le llama exponente de hidrogeno. Por comodidad se ha adoptado la costumbre de expresar con un dígito este parámetro para evitar anotaciones extensas y complicadas, por ejemplo 1×10^{-8} es simplemente 8.

La escala natural del pH varía desde cero (ácida) hasta catorce (alcalina) con un valor intermedio de siete (neutro). Los términos de alcalinidad y acidez indican la reserva total o capacidad amortiguadora de una muestra.

Técnica potenciométrica: Este es un método exacto y se encuentra libre de interferencia. Se basa en la diferenciación de potenciales entre dos líquidos de flúor con concentraciones de iones H^+ ; uno se sume con un potencial constante (electrodo de referencia) en tanto que el electrodo de medición genera un potencial que depende del pH de la muestra. Esta diferencia de

potencial, es sensible al pH, es amplificada y medida sobre una escala preparada para medir el pH y la fuerza electromotriz en (expresada en milivolts) producida en la celda electroquímica respectiva.

La temperatura también es importante en la medición del pH, ya que puede variar el potencial de los electrodos. Otra interferencia son las (grasas y aceites), porque estos se pueden adherir a los electrodos; se eliminan lavando los electrodos con agua jabonosa y enjuagando bien con (HCl 1:9) (ácido clorhídrico).

Procedimiento: En la calibración del potenciómetro, primero se lavan perfectamente los electrodos con agua destilada, después secan y sumergen en la solución de pH 7; posteriormente se toma la temperatura y el pH; se enjuaga perfectamente y se hace lo mismo con la solución *Buffer* con pH de 4 y 10, tratando de que el agua de nuestra muestra quede dentro del rango de pH que se selecciona. Se debe tener cuidado de enjuagar perfectamente, ya que una sola gota de *Buffer* puede cambiar el pH de la muestra de cualquier solución. Una vez calibrado el aparato, se procede a medir el pH de la muestra lavando perfectamente el electrodo e introduciéndolo dentro de la celda de flujo. Se recomienda que se encuentre el electrodo en constante movimiento para que las burbujas no produzcan lecturas erróneas. Cook (1999).

b).- Conductividad Eléctrica (CE)

Proporciona un medio rápido y conveniente para estimar la concentración de electrolitos. Esta propiedad depende de la fuerza iónica del agua, relacionada con diversas sustancias disueltas, sus concentraciones actuales y relativas, así como la temperatura a la cual se hace la medición.

Técnica eléctrica por medio del conductímetro: este método se basa en la teoría de la disociación electrolítica y establece que cuando se disuelve en agua un ácido, una base o una sal, una porción considerable de la misma se disocia espontáneamente en iones positivos y negativos.

Estos iones pueden moverse a electrodos de signo contrario aplicando un campo eléctrico.

La medida utilizada es la usada en la resistencia (ohm), el recíproco de la conductancia que mide la capacidad de conducir la corriente eléctrica y se representa en el recíproco (mhos), (micromhos) y (milimhos/cm). Generalmente la conductividad eléctrica se expresa en (microhoms/cm) a 25⁰ Método estándar (1988).

Procedimiento: la determinación de la conductividad se efectúa calibrando el aparato sumergiendo los electrodos en una solución de KCl a dar una lectura de 1413. Se calibra, y se enjuaga perfectamente secándolo con papel.

Para esto se coloca la muestra en vasos de precipitado de manera que cubra los aros del electrodo, sin que toque las paredes del mismo y se toma la lectura directamente. Enjuagar electrodos con agua destilada, se secan y se procede a tomar las lecturas.

c).- Alcalinidad

La capacidad cuantitativa del agua para neutralizar un ácido o la cantidad que se requiere por litro para disminuir el pH a un valor aproximado a 4.3, se debe a la presencia de CO₃, HCO₃, OH (hidróxidos) y contenido de otras sales como boratos, fosfatos, silicatos que pueden estar disueltos en el agua.

Existen tres tipos de de alcalinidad: a la fenolftaleína, al anaranjado de metilo, y la alcalinidad total.

Cuando un agua presenta alcalinidad a la fenolftaleína indica que el agua está contaminada, ya que un agua natural no tiene presencia de OH⁻. López-Hernández (2005)

Técnica: a la fenolftaleína.

Se toma una alícuota de 25 ml de muestra y se le añaden unas gotas de fenolftaleína, si se tiene un ligero color rosado se titula con ácido incoloro. Se anotan los mililitros gastados y se sustituyen en la siguiente fórmula:

Para pasar a mg/L de CO_3 se multiplican los mg/L

De donde:

1000= factor de conversión

Alícuota= volumen tomado de la muestra en mililitros

N = normalidad del ácido que se esté usando

2= factor para obtener el total de los CO_3

30= peso equivalente del CO_3 (peso molecular/2)

Alcalinidad al anaranjado de metilo (HCO_3): se toma una alícuota de 25 ml de muestra y se le añaden unas gotas del indicador anaranjado de metilo, se tiene un ligero color anaranjado se titula con el ácido hasta que toma una coloración canela. (En caso de usar como indicador el azul de bromofenol, la muestra se teñirá de azul y cambiara a color amarillo paja).

De donde:

1000= factor de conversión

Alícuota= volumen tomado de la muestra en mililitros

N = normalidad del ácido que se esté usando

2= factor para obtener el total de los HCO_3

61= peso equivalente del HCO_3 (peso molecular/2)

Para pasar a mg/L de HCO_3 se multiplican los mg/L

De donde:

$\frac{V_1}{50}$ de CO_3 + $\frac{V_2}{50}$ de HCO_3 = suma de ml gastados en la titulación de la alcalinidad

50= equivalente químico del CaCO_3

Alícuota = volumen tomado de la muestra en mililitros.

d).- *Dureza*

El calcio (Ca) y el magnesio (Mg) se encuentran en abundancia en la corteza terrestre y generalmente disueltos en el agua en concentraciones de hasta varios cientos de mg/l APHA (1975). La dureza del agua se debe principalmente a la presencia de estos iones y algunos cationes como el estroncio (Sr), hierro (Fe), y manganeso (Mn) en menor grado. Algunos aniones que causan también dureza son los bicarbonatos (HCO_3), sulfatos (SO_4), cloruros (Cl^-), nitratos (NO_3) y el silicio (SiO_2).

La dureza se adquiere por la disolución de minerales que son afectados por el agua a su paso por las diferentes rocas. El poder solvente del agua lo adquiere por las condiciones ácidas que se desarrollan a su paso por la capa del suelo donde la acción de las bacterias generan CO_2 el cual existe en equilibrio con el ácido carbónico. Si el pH es bajo, el agua llega a atacar las rocas principalmente a las calcitas.

La clasificación de aguas de acuerdo a su dureza es como sigue:

Agua blanda	0-75 mg/l CaCO_3
Agua semidura	75-150 mg/l CaCO_3
Agua dura	150-300 mg/l CaCO_3
Agua muy dura	más de 300 mg/l CaCO_3

Técnica para medir dureza total como CaCO_3 : medir una alícuota de la muestra y ponerla en un matraz “*erlenmeyer*”, al agregar una gota de *Buffer* pH 10 e indicador de eriocromo, la muestra toma un color morado, después de la titulación con EDTA se obtiene color azul.

Donde:

1000= factor de conversión

Alícuota= volumen de la muestra tomada en mililitros

N= normalidad del EDTA

Técnica para medir dureza del Ca como CaCO_3 : medir una alícuota de muestra y ponerla en un matraz “*erlenmeyer*”, y luego agregar una gota de hidróxido de sodio (NaOH) 5N e indicador murexida, la muestra toma color rosa; después de la titulación con EDTA se obtiene coloración lila.

Donde:

1000= factor de conversión

Alícuota= volumen de la muestra tomada en mililitros

N= normalidad del EDTA

Dureza del Magnesio como CaCO_3 :

Los cálculos se efectúan de la siguiente manera

Dureza del Mg como $\frac{\text{Dureza del Mg}}{2}$ de CaCO_3 = dureza total- dureza del Ca

e).- *Cloruros*

El cloruro se forma del ion Cl^- , el cual es uno de los aniones inorgánicos más comúnmente presente en aguas naturales y aguas de desecho. El agua potable da un sabor salado, producida por la concentración de cloruros de

sodio disueltos en el agua. La concentración de cloruros en aguas de desecho es mayor, debido a que los cloruros de sodio son una parte común de la dieta humana y pasa inalterado a través del sistema digestivo. Un alto contenido de cloruros puede ser nocivo, porque cuando su concentración mayor de 250 mg/Lt, daña las tuberías y las estructuras metálicas, y en la agricultura daña a algunos vegetales.

La determinación de cloruros se realiza en un medio neutro o ligeramente alcalino. El método aceptado por la norma oficial es el Argentométrico por titulación con solución valorada de nitrato de plata, usando cromato de potasio como indicador; este método fue impuesto por Mohr (1836). El precipitado de cloruro de plata puede medirse antes que sea formado el cromato de plata (rojo ladrillo).

Precipitado blanco

precipitado rojo ladrillo

Técnica: se toma una alícuota de 25 ml de muestra y un blanco de agua destilada; se agregan dos gotas de del indicador de cromato de potasio, y se titula con solución de nitrato de plata hasta la aparición de un ligero color rojizo, pasando a un color blanco debido al cloruro de plata.

De donde:

35.5 = peso equivalente del ion cloruro Cl^-

1000= factor de conversión

V1= volumen de la solución de AgNO_3 gastados para la titulación de la muestra en mililitros.

V2= volumen de la solución de AgNO_3 gastados para la titulación del blanco muestra en mililitros.

Alícuota= volumen tomado de la muestra en mililitros.

Sulfatos: los sulfatos contenidos en las aguas provienen de la disolución de suelo y rocas, principalmente yesos, aunque también es posible que sean el resultado de la oxidación completa de sulfuros y sulfitos o de los residuos de explotación minera.

Existen límites permisibles en actividades industriales para ellos, ya que al acentuarse con la dureza al formar sulfato de calcio (CaSO_4) se pueden producir incrustaciones en las tuberías. Los sulfatos en alta concentración en el agua pueden producir un olor desagradable y provocar la corrosión.

Puede atribuirse a los SO_4 los problemas de olor y corrosión debido a la reducción de sulfatos a sulfuros de hidrogeno en condiciones anaerobias como se muestra en las siguientes reacciones.

El oxígeno disuelto tiene la capacidad de oxidar los sulfitos a sulfatos en un ámbito de pH superior a 8. Para evitar que las muestras se ajusten a un pH inferior a 8 es recomendable tenerla a bajas temperaturas o preservarlas con formaldehído con el fin de evitar la presencia de materia orgánica.

Técnica: introduzca el número del programa en el aparato DR 2000 HACH para sulfatos, presione 680 READ/ENTER.

I.- MARCO GEOLOGICO

I.1 Marco Geológico Regional

Geológicamente el ASNT se ubica en la porción centro-occidental de la plataforma cretácica Valles-San Luis Potosí, definida por Carrillo-Bravo (1971). Dicha plataforma es un elemento paleogeográfico positivo, constituido por rocas precámbricas, paleozoicas y triásicas, plegadas y falladas, que fueron parcialmente cubiertas por el mar en el Jurásico temprano depositando secuencias siliciclásticas (por ejemplo al poniente del Rioverde, S. L. P.) Venegas R. *et al*, (2009). La plataforma fue totalmente cubierta para el Aptiano, y sobre ella se depositaron primero evaporitas y después calizas de mar somero, alcanzando su máximo desarrollo en el Cretácico medio, durante el Albiano-Cenomaniano Carrillo-Bravo (1971); Enos (1974).

El desarrollo que mostró esta plataforma aislada a partir del Aptiano y durante el Albiano-Cenomaniano en su margen occidental, fue el de una progradación del margen hacia el poniente, con un piso marino de baja pendiente tipo rampa (“*bypass*”).

En el Cretácico tardío el aporte de terrígenos finos provenientes del poniente modificó la sedimentación primeramente en la Cuenca Mesozoica del Centro de México (caliza margosa, marga, limolita y lutita) y posteriormente influenció el régimen sedimentario en la plataforma Valles-San Luis Potosí, provocando una retrogradación del margen de la plataforma y con ello un desplazamiento hacia el oriente de las facies de talud, margen y laguna interior, así como una variación gradual en los sedimentos depositados López-Doncel (2004).

En el área que donde se encuentra el ASNT se pudieron reconocer depósitos evaporíticos del Aptiano, así como caliza de laguna interna, arrecifal, peri-arrecifal, de talud y de cuenca profunda, de edad Albiano-Cenomaniano; los cuales son cubiertos por secuencias mixtas del talud del Cretácico Tardío López-Doncel (2000). Estos depósitos indican que la sedimentación cretácica inicialmente ocurrió dentro de la plataforma, pero al finalizar el Cretácico (Campaniano-Maastrichtiano), la

sedimentación ocurrió en el margen y talud de ésta, y estuvo dominada por el aporte de terrígenos. Este cambio se debió a que a finales del Cretácico, una secuencia de arco volcánico, desarrollado durante el Jurásico temprano-Cretácico tardío, fue acrecionada al occidente de la denominada Cuenca Mesozoica del Centro de México (Carrillo-Bravo, 1971), por efecto de las fuerzas compresivas de la orogenia Laramide; esto provocó que se diera un gran aporte de terrígenos y la sedimentación marina, inicialmente carbonática, se tornara predominantemente terrígena. El aporte masivo de terrígenos terminó por colmar la cuenca, y los terrígenos transgredieron sobre gran parte de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (Torres-Hernández *et al.*, 2009).

La deformación relacionada a la orogenia Laramide se manifestó progresivamente en el tiempo, primero en la parte poniente (durante el Turoniano), y paulatinamente hacia el oriente, alcanzando la plataforma a fines del Maastrichtiano o principios del Eoceno, generando pliegues, cabalgaduras y algunas fallas de desgarre (Torres-Hernández *et al.*, 2009).

Las estructuras laramídicas (anticlinales y sinclinales) principales en el área del ASNT son: Sierra de Álvarez; Sierra de Trejo; Anticlinal El Durazno y Anticlinal El Pinto. Las sierras de origen volcánico y formado por fallamiento extensional son: Sierra El Huirico–El Mezquite y Volcán de Atotonilco respectivamente.

Los primeros depósitos terciarios fueron sedimentos clásticos gruesos y finos de origen continental (conglomerados rojos pre-volcánicos) del Eoceno, así como secuencias clásticas continentales con intercalaciones de rocas volcánicas (Formación Cenicera), que subyacen a una serie volcánica de riolitas y andesitas basálticas. La secuencia volcánica inició con derrames de lavas andesítica basáltica, y continuó con la emisión de ignimbrita riolítica y dacita, todas de edad Oligoceno. Por su asociación con estructuras extensionales, se infiere que el vulcanismo ocurrió durante un evento tectónico extensivo en el Oligoceno (Aranda-Gómez y MacDowell, 1949), (Torres- Hernández *et al.*, 1998).

La tectónica extensional del Terciario medio a temprano en la porción central de México, está ligada al desarrollo de la provincia de Cuencas y Sierras “*Basin and Range*”, que abarca desde el sur de Canadá hasta la parte central de México Stewart, (1978) y acaso se extienda al sur de la faja neovolcánica Henry *et al.*, (1992). Regionalmente los sistemas de fallas generadas en ese tiempo, tienen orientación NW-SE y NE-SW, algunas estructuras representativas de estos sistemas son el Graben de Villa de Reyes de orientación NE-SW (localizado al surponiente de la carta), los de Bledos y Enramadas con orientación NW-SE, y el sistema de fallas tipo dominó de la sierra de San Miguelito Nieto-Samaniego *et al.* 1997); Xu *et al.*, (2004); Tristán González *et al.*(2009), ligado a la evolución de la provincia de Cuencas y sierras. Durante el Oligoceno se produjo un evento de vulcanismo bimodal a los ~27 Ma Rodríguez-R., (2004), y otro en el Mioceno, entre los 20 y 21 Ma Torres-Hernández (2000); Tristán-González *et al.*, (2009).

Los valles intermontanos donde se encuentran la mayoría de las obras (pozos, norias y manantiales) en los acuíferos San Nicolás–Ojo de Agua, Santa Catarina y Ocampo-Paraíso, que abastecen de agua para usos domésticos y agrícola, están rellenos de sedimentos lacustres oligomiocénicos y pliocuaternarios, separados unos de otros por una discordancia erosional. Un caso especial lo constituye el Valle de San Martín de Abajo, que ocupa una cuenca tectónica.

El último evento volcánico en la región (también representado en el área de estudio), ocurrió en el Pleistoceno y consistió en la emisión de basalto alcalino tipo basanita, que se generó como derrames de lava, conos de escoria y eventos hidrovulcánicos, los cuales regionalmente formaron cráteres de explosión (Joya Honda, La Joyuela) y conos de tobas (Laguna de Los Palau) durante el Plio-Pleistoceno (Torres-Hernández *et al.*, 2009). La erosión y denudación de las estructuras topográficamente elevadas está generando un volumen importante de sedimentos gruesos a finos, los cuales se están depositando en las márgenes de las sierras (coluviones) y relleno de depresiones tectónicas e intermontanas (aluviones).

I.2.-Estratigrafía

La estratigrafía aflorante en el área que ocupa el ASNT se presentan y comprende unidades sedimentarias y volcánicas. Las primeras corresponden a rocas sedimentarias marinas de edad mesozoica (Cretácico); y depósitos clásticos continentales terciarios y cuaternarios, intercalados con algunos depósitos piroclásticos. Las unidades volcánicas corresponden a andesita, ignimbrita y dacita de edad terciaria, así como a depósitos de avalancha derivados del colapso parcial del estratovolcán de Atotonilco. Las rocas volcánicas de edad pleistocénica están representadas por lavas, escorias basálticas y depósitos hidrovolcánicos asociados (Torres-Hernández *et al.*, 2009). Las rocas más antiguas corresponden a sedimentos evaporíticos del Cretácico inferior (Aptiano) y las más jóvenes, son derrames basálticos del Cuaternario. En ambos casos están cubiertas por sedimentos (aluviones y coluviones) gruesos a finos. A continuación se describen brevemente cada una de las unidades litoestratigráficas aflorantes Figura 6:

a).- Formación Guaxcamá (Kig)

Aflora solo en el sector nororiente de la carta Santa Catarina en el núcleo del anticlinal El Potrero en la litología de este anticlinal está compuesta por capas medias (de 0.30 a 0.60 m de espesor) a delgadas (0.05 a 0.10 m de espesor) y ocasionalmente gruesas, (más de 1 m), de yeso de color blanco lechoso, frecuentemente laminado y con intercalaciones de capas de anhidrita parcialmente hidratada. También presenta intercaladas capas medias de dolomía, de color gris oscuro, textura granular (sacaróide), sin macrofauna y finamente laminadas. La secuencia está deformada fuertemente, mostrando pliegues abundantes desde homoclinales hasta disarmónicos apretados. López-Doncel (2009) reportó para el área colindante al norte (Carta Peotillos) intercalaciones ocasionales de capas delgadas (de 0.10 m de espesor máximo) de lutita y limolita físil de color rojizo a marrón. El espesor de esta formación en la carta de Santa Catarina, no pudo ser

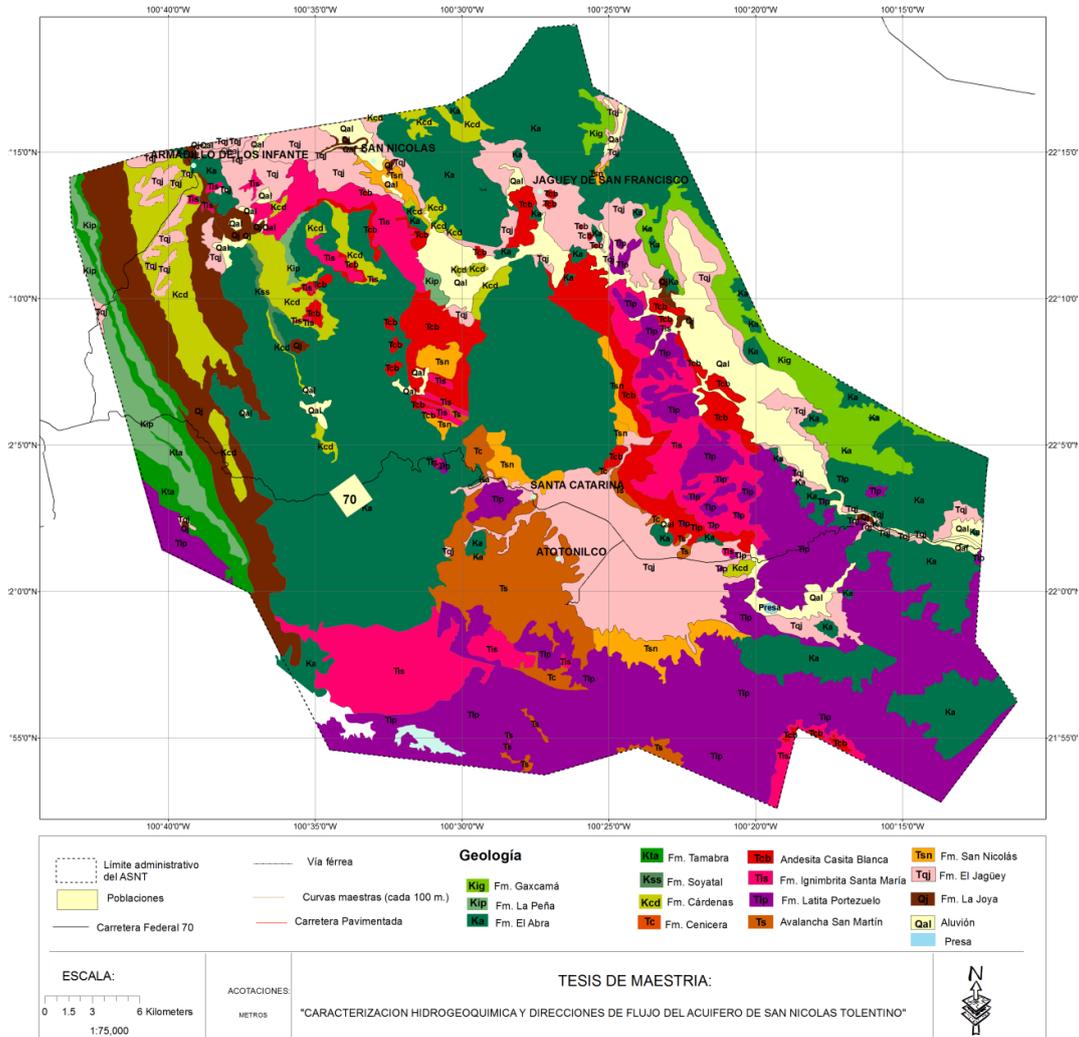


Figura. 6 - Plano geológico del Acuífero de San Nicolás Tolentino, S.L.P.

determinado, debido a que no aflora su base, no obstante, se estima que debe ser mucho mayor de lo que aflora (> 350 m). En el Pozo San Nicolás, ubicado al sur de la ranchería Valle de Los Fantasma, se cortó una secuencia de yesos de la Formación Guaxcamá de 3009 m de espesor (Carrillo-Bravo, 1971); este, se asume, es un espesor tectónico, y se interpreta que el pozo cortó una estructura de diapiro. Subyace concordante a la Formación El Abra.

La edad de esta formación, con base en su posición estratigráfica es Aptiano; sin embargo, Carrillo-Bravo, (1971), le asignó una edad probable Neocomiano-Aptiano. Es correlacionable lateralmente con las formaciones Tamaulipas Superior y Otates en el norte y oriente de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, dentro de la llamada Cuenca de Tamaulipas y con la Formación La Peña al occidente de la misma (López-Doncel, 2003).

b).- Formación La Peña (Kip)

Esta unidad aflora en la parte occidental del área que ocupa el acuífero, estando bien expuesta en el flanco poniente de la Sierra de Álvarez. Está constituida por capas de caliza criptocristalina a microcristalina de color gris claro a rojizo, de estratificación media a gruesa, con nódulos y lentes de pedernal negro y algunos cristales de sulfuros oxidados parcialmente. Los estratos más gruesos son de naturaleza turbidítica y aisladamente se llegan a observar algunas brechas calcáreas oligomícticas.

Alterna con lutita y lutita calcáreas de color rojizo, amarillento y violáceo, en capas delgadas a medias. Se presenta fuertemente plegada con pliegues apretados y recostados al NE. Su espesor es difícil de estimar porque está plegada intensamente, pero se estima que es superior a los 300 m.

Estratigráficamente subyace a la Formación Tamabra, a la cual pasa transicionalmente.

La probable edad de esta formación, de acuerdo a Ross, (1979), quien la estudió en Sierra de Catorce, S. L. P., es Aptiano temprano. En el área de estudio, al no aflorar su base, se puede determinar su edad como Aptiano (pre-Albiano). Labarthe-Hernández *et al.* (1982), la correlacionaron con la Formación Tamaulipas Superior de la Cuenca Mesozoica del Centro de México.

Sus características sugieren que su depósito ocurrió en un ambiente profundo de pie de talud que bordeaba la Plataforma Valles San Luis Potosí.

c).- *Formación El Abra (Ka)*

Aflora extensamente en las porciones centro y oriental representando la secuencia sedimentaria más importante en el área que cubre el ASNT. Litológicamente está formada por una secuencia de estratos de caliza, de espesor medio, grueso a masivo, de color gris claro a oscuro. Comúnmente presenta huellas de *kársticidad*. En algunas partes se presenta localmente dolomitizada, lo cual se distingue por su aspecto *sacaroide*, un tono de gris más oscuro que los estratos normales de la caliza, y porque despiden un olor fétido al golpe del martillo.

En el área que ocupa el ASNT, esta unidad muestra facies de pre-arrecife, arrecife y post-arrecife (lagunar), encontrándose capas con texturas que van desde “*mudstone*” más del 90% de matriz micrítica), “*packstone / grainstone*” (gran cantidad de componentes soportados entre ellos), hasta “*floatstone y rudstone*” (componentes grandes en forma de brecha calcárea). En general esta secuencia es rica en micro y macrofauna de aguas someras, destacándose en la primera, la presencia de foraminíferos bentónicos (*miliolidos y orbitolinas*). La macrofauna corresponde a *rudistas, equinodermos y gasterópodos*, aisladamente se llegan a observar *corales y algas*.

El espesor de esta secuencia es muy variable. En áreas cercanas se han reportado espesores contrastantes; por ejemplo, Zapata-Zapata y Pérez-Venzor (1979), mencionan hasta 1,800 m en la Carta Peotillos, en tanto que Pichardo-Barrón (2006),

reporta un espesor de 401 m, en un perfil medido en la porción central de la misma carta (López-Doncel, 2009). El espesor estimado en la carta Santa Catarina es de >1000 m, lo cual está basado solo en las secciones geológicas y por lo tanto es especulativo.

Sobreyace concordante a la Formación Guaxcamá y subyace concordante a la secuencia de caliza-lutita de la Formación Soyatal y/o a lutita-arenisca de la Formación Cárdenas.

De manera general, se ha considerado la edad de la Formación El Abra como Albiano-Cenomaniano (Carrillo Bravo, 1971), sin embargo, si se considera a esta formación como “el complejo calcáreo de tipo plataforma” (op cit), ésta tiene un rango de tiempo mayor, dado que recientes estudios paleontológicos realizados a la fauna arrecifal (rudistas preferentemente) en ésta zona, le asignan alcances hasta el Santoniano y aún quizás hasta el Campaniano Torres-Hernández (1994); Alencaster *et al.* (1999), Pichardo-Barrón, (2006). Es correlacionable estratigráficamente con la Formación Tamaulipas Superior de la Cuenca de Tamaulipas, ubicada al oriente de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. Se correlaciona también con la Formación Cuesta del Cura de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, ubicada esta al occidente de dicha plataforma.

d).- Formación Soyatal (Kss)

Aflora solo en la parte occidental del área que ocupa el ASNT, donde está ampliamente distribuida. En la base predomina la parte calcárea sobre la arcillosa y en la cima predomina la arcilla. En donde la secuencia es más gruesa (parte adyacente oriental de la Sierra de Álvarez) esta formación fue dividida por Garza-Blanc (1979), en dos miembros; el inferior formado por caliza arcillosa y carbonosa y limolita de color gris oscuro a negro, las cuales se presentan en estratos delgados a medianos, con algunas intercalaciones de lutita fósil. El superior consiste de una alternancia de lutita fósil de color gris verdoso que intemperiza en amarillo ocre, con caliza arcillosa de color gris oscuro a negro. Contiene aisladamente algunos estratos

de calcarenita de color gris oscuro a verdoso. Labarthe-Hernández *et al.* (1982); Cserna *et al.* (1963), estimaron un espesor de 224 m para esta secuencia, al oriente de la Sierra de Álvarez.

La parte delgada de la Formación Soyatal (<20 m de espesor) sobre la caliza de plataforma de facies lagunar, se puede observar al oriente del poblado San José de Álvarez y al poniente del poblado de El Alguacil. Se trata de una secuencia de estratos calcáreo arcillosos de 0.05 a 0.15 m de espesor, intercalados con lutita de estratificación delgada.

Sobreyace transicionalmente a las formaciones Tamabra y El Abra, y subyace de la misma manera a la Formación Cárdenas; lateralmente hacia la Cuenca Mesozóica del Centro de México pasa de manera transicional a la Formación Indidura, con la que comúnmente se le correlaciona (Labarthe-Hernández *et al.* 1982).

Por su posición estratigráfica la edad estimada para esta formación es Turoniano-Santoniano.

Por su litología se interpreta que se depositó en un medio marino de aguas poco profundas de transición cuenca-plataforma.

e).- Formación Cárdenas (Kcd)

Esta unidad aflora sobre todo en las porciones occidental y noroccidental, en el valle intermontano que se localiza entre las sierras de Álvarez y El Durazno, y en las inmediaciones del Picacho de Los Dolores. Otros afloramientos más restringidos se encuentran en el extremo norte de la Sierra de Trejo y en la parte poniente del Anticlinal El Pinto. La litología consta de capas delgadas y medias de arenisca rojiza a ocre y café oscuro, en horizontes medios a finos. La arenisca es impura, pobremente clasificada, cuyos granos se componen en un 90% de líticos y el resto de cuarzo y feldespato de formas angulosas a sub-redondeadas, los cuales están en una matriz calcáreo-arcillosa (“*grawacas*”). Las capas de arenisca gradúan a limolita y de estas a lutita y lutita calcárea. Cuando el porcentaje de micrita aumenta, se

reconocen algunas capas intercaladas de margas. En general aumenta el contenido arcilloso de la secuencia a la cima con lo que en la parte superior la litología se limita casi exclusivamente a lutita y limolita.

No fue posible medir su espesor en el área estudiada debido a que su techo está erosionado, sin embargo en la porción centro occidental de se estimó un espesor mínimo de 180 m.

Descansa concordantemente sobre la Formación Soyatal al oriente de la Sierra de Álvarez, y sobre la Formación El Abra al poniente de Sierra El Pinto, en las cercanías del poblado El Alguacil. La cima de ésta formación dentro del área de estudio no aflora, principalmente por encontrarse tectonizada, erosionada o cubierta discordantemente por depósitos continentales terciarios o plio-cuaternarios.

Por su contenido faunístico y por posición estratigráfica, se le asigna una edad Campaniano–Maastrichtiano Myers (1968). Torres-Hernández (1994) estimó una edad Campaniano tardío Maastrichtiano en la formación Sierra de Guadalcázar.

e).- Formación Cenicera (Tc)

De edad Paleoceno-Eoceno del Terciario temprano, originalmente descrita por Labarthe-Tristan (1978) en la cartografía de la hoja San Luis. Consiste en una secuencia de brechas, conglomerados, areniscas poco consolidadas, limos y arcillas presentando una variación lateral fuerte, cambiando de conglomerados a zonas arcillo-limosas. Localizándose principalmente en el Cerro de Chiquitillo en la hoja San Luis; en la parte norte-central de la hoja Ahualulco, en la zona central-poniente de la hoja Moctezuma; en las cerranías del poblado San Nicolas Tolentino y en la localidad tipo del Arroyo de la Cenicera. Esta formación subyace a la formación Ignimbrita Santa María.

g).- Rocas volcánicas del Terciario

Las rocas volcánicas que se reconocieron en el área del ASNT, son lavas de composición andesítica, dacítica y/o riolítica-dacítica (Tcb), intercaladas con una ignimbrita (Tsm). La unidad volcánica inferior es una riolita-dacita. Sobre la riolita-dacita se presenta una secuencia gruesa de lavas andesíticas afaníticas a porfídicas de color gris oscuro. La andesita está cubierta por un manto extenso de ignimbrita. En algunos lugares la ignimbrita cubre discordantemente a la secuencia marina mesozoica o a depósitos clásticos del Eoceno. Una serie de derrames de lavas traquíticas, riolíticas y dacíticas, que forman domos semi-planos (cerros Huirico, El Mesquite, Mesa Alta, Picacho Alto y Golondrinas) cubren a la ignimbrita y a la andesita. Depósitos de avalancha derivados del colapso de un sector del estratovolcán de Atotonilco (en la parte sur del acuífero) predominan en la parte sur del área aquí considerada.

h)- Andesita Casita Blanca (Tcb)

Esta secuencia de lavas no ha sido descrita formalmente, y representa, junto con la unidad anterior, las rocas volcánicas más antiguas que afloran en el área. Estas rocas afloran principalmente en las porciones centro y oriental, aunque también se llegan a observar en afloramientos pequeños dispersos, fuera de estas porciones. Los espesores mayores se observan entre las rancherías Potrerito de Los Castillo y Ojo de Agua de San Juan, donde tiene más de 140 m de espesor (Torres-Hernández *et al.* 2009). La base de esta unidad está bien expuesta al norte de Potrerillo de Los Castillo

Consiste de una secuencia de derrames de lava de color gris oscuro a verdoso, muy fluidal, densa, bien compacta, de textura porfirítica y pilotaxítica, contiene alrededor de 5 % de fenocristales de plagioclasa en una matriz afanítica. Localmente llega a ser vesicular. Otro paquete grueso de lava con 10% o más de cristales se presenta entre los poblados de San Martín de Abajo y Nogalitos. En algunos derrames la andesita-basalto tiene estructura escoriácea. Dentro de esta unidad, se identificaron

diques aislados, de 2 a 3 m de espesor, no cartografiados a la escala utilizada. Los derrames de lava fluyeron a partir de diques y centros puntuales de emisión sobre todo tipo de topografía, pero se acumularon de manera preferente en depresiones y valles intermontano.

Sobreyace discordantemente a las secuencias sedimentarias mesozoicas y a su vez subyace a la ignimbrita Santa María del Oligoceno temprano.

Por su posición estratigráfica se le asigna una edad Oligoceno medio y podría, como la unidad anterior, correlacionarse con la Andesita Salitrera que aflora en la carta adyacente al sur, del área de estudio.

i)- Ignimbrita Santa María (Tis)

Los afloramientos de esta unidad se localizan en las porciones centro-norte, central y oriental del área, formando extensos mantos. Consiste de una roca de color gris claro que por intemperismo adquiere color rosa. Su textura es porfirítica y eutaxítica, con presencia de fenocristales de cuarzo y feldespato (sanidino). Los clastos de pómez se presentan bien colapsados y llegan a medir hasta 20 cm de largo por solo 3 cm de ancho, aunque en general son de menos de 7 cm de diámetro. El porcentaje de fenocristales llega a ser hasta del 40%. Está en general bien soldada, la matriz es vítrea y está parcialmente devitrificada. La base presenta un vitrófido delgado de color negro a gris oscuro, que al alterarse se hace muy deleznable o adquiere tonalidades rojizas. La parte superior presenta estructura columnar.

El espesor de esta unidad en el Cerro El Picacho (al norte de la rancharía Ojo de Agua de San Juan), es de más de 120 m (Torres-Hernández *et al.* 2009).

Sobreyace discordante a las unidades marinas del Cretácico, a la andesita y a los clásticos continentales oligocénicos. La cubren también discordante, lavas de composición riolítica-dacítica de la unidad denominada informalmente latita Portezuelo y clásticos continentales.

Tristán-González *et al.* (2009) reportaron una edad K-Ar de 31.3 ± 0.7 Ma, lo que la ubica en el Oligoceno temprano.

Aflora en la porción sur del área del acuífero al poniente del poblado Santa Catarina.

Se trata de una roca color gris claro a rosáceo por intemperismo. Tiene 15 a 30 % de fenocristales de plagioclasa, sanidino, cuarzo, y óxidos de fierro. Su espesor es de más de 120 m en Cerro Las Agujas, que se localiza al poniente del poblado Santa Catarina (Torres-Hernández *et al.*, 2009).

Subyace a depósitos de avalancha oligocénicos y a sedimentos clásticos continentales terciarios y cuaternarios.

Por su posición estratigráfica se les asignó una edad Oligoceno temprano. Subyace a la Latita Portezuelo que fue reconocida en las cartas San Luis Potosí y Peotillos (Torres-Hernández *et al.*, 2009).

j).- Latita Portezuelo (Tlp)

Aflora principalmente en la parte oriente y surponiente del área que ocupa el acuífero, formando estructuras dómicas, como puede observarse en los cerros El Huirico, El Nogal y El Mesquite, entre otros.

En los afloramientos que se encuentran en la parte oriental, esta roca contiene un 10% de fenocristales pequeños y en general son más fluídas (los derrames generaron domos semiplanos), que las que afloran en la esquina surponiente del ASNT, donde presentan mayor contenido de fenocristales 15 a 30% grandes (hasta 4 mm), los cuales corresponden a plagioclasa, sanidino, cuarzo subordinado y ferromagnesianos. La oxidación de los ferromagnesianos le da una apariencia de color rojizo muy característico. Algunos de los cristales de plagioclasa presentan 2 y hasta 3 coronas de reacción. Su espesor es muy variable, siendo el máximo de 260 m, cerca de la esquina surponiente del polígono que delimita el ASNT.

Sobreyace a la Ignimbrita Santa María y a la Andesita Casita Blanca, antes descritas. No está cubierta por otra unidad volcánica.

Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), reportaron una edad de 31 ± 1.5 Ma para estas roca, lo que la ubica en el Oligoceno temprano. Esta unidad tiene una distribución regional muy amplia (al menos en 4 cartas 1:50 000), en donde las variaciones son solo texturales por diferencias en el contenido de cristales, pero muy semejante en apariencia.

Se emplazaron en una región sujeta a esfuerzos extensionales que generaron fracturas profundas de orientación NW-SE.

k).- Avalancha San Martín (Ts)

Se distribuyen en la parte central-sur de la carta, en las inmediaciones del poblado Santa Catarina, extendiéndose hacia las rancherías Paso de San Antonio y Ojo de Agua de San Juan (Labarthe–Hernández y Sánchez-Pérez, 1999).

Al sur del poblado Santa Catarina, estos depósitos de avalancha de escombros, presentan una morfología de montículos “*hummocks*” y fácies de bloques, mientras que los depósitos distales que se observan en las inmediaciones de la ranchería Ojo de Agua de San Juan, presentan facies de clastos en matriz, y forman lomeríos suaves.

Las facies proximales se caracterizan por bloques grandes (decenas a centenas de metros) que presentan estructura de rompecabezas. Los mayores bloques son de andesita y dacita, aunque en algunos depósitos también se incluyen bloques de caliza, estos últimos se interpretan como material incorporado durante el emplazamiento de la avalancha. El espesor de esta unidad es superior a 300 m, al sur del poblado Santa Catarina (Torres-Hernández *et al.*, 2009).

Sobreyace a la caliza de la Formación El Abra y a la unidad denominada riolita porfídica-dacita porfídica.

Por su posición estratigráfica se le asignó una edad Oligoceno medio Labarthe – Hernández y Sánchez-Pérez, (1999). Se le correlaciona con la latita Portezuelo.

Durante el colapso, se canalizó en los cauces de los arroyos mayores, labrados en el volcán y en las rocas marinas mesozoicas y se emplazo en las partes topográficamente bajas.

l).- Formación San Nicolás (Tsn)

Aflora en las porciones centro y centro-norte del área que ocupa el acuífero, inmediatamente al norte de la ranchería Agua Zarca, y posteriormente de manera discontinua, hasta el límite con la carta adyacente Peotillos, donde continúan; su mejor afloramiento está en las inmediaciones de la cabecera municipal de San Nicolás Tolentino. (Ferrusquia–Villafranca *et al.*, 2011).

m).- Formación El Jagüey (Tqj)

Esta unidad no ha sido descrita formalmente con anterioridad, pero ocupa un área muy extensa en esta área y áreas adyacentes (por ejemplo en la Carta Peotillos). Aflora ampliamente en las porciones centro-norte y norponiente del área. Comúnmente el conglomerado polimíctico (semiconsolidado e incipiente cementados por carbonato de calcio) rodea las estructuras topográficas positivas donde la litología de los clastos que los componen varían de sedimentarias carbonatadas (clastos de caliza), arcillosas (clastos de margas y lutita), a roca volcánica básica (clastos de basalto) y ácidas (clastos de riolita, ignimbrita); todos ellos descansando en una matriz arcillo-arenosa. El espesor es muy variable dependiendo de la morfología del terreno, es de algunas decenas de metros en las cercanías de las sierras, pero se adelgaza lateralmente hasta solo unos cuantos metros en las partes más planas. Sin embargo, los depósitos más espectaculares están al suroriente del poblado El Jagüey de San Francisco, donde cubren casi totalmente una loma de caliza de la Formación El Abra.

Subyace a conglomerados polimíctico y oligomíctico del Pleistoceno. Sobreyace prácticamente a todas las unidades antes mencionadas.

Se le asigna una edad Plioceno-Pleistoceno, porque en algunos lugares (norte del poblado Armadillo de los Infante) se han encontrado huesos de mamuts que se asume representan una edad pliocénica. Se correlaciona con depósitos conglomeráticos que rodean las sierras ubicadas alrededor del área estudiada.

El conglomerado que compone esta unidad se depositó preferentemente alrededor de las sierras principales justo donde los cauces de los arroyos cambian la pendiente al llegar al valle.

n).- Formación La Joya (Qj)

Aflora al suroriente de la cabecera municipal de Armadillo de los Infante, en el lugar conocido como Laguna de Los Palau y en las inmediaciones del poblado Laguna de Santo Domingo. Los depósitos de nube rasante están formados por material volcánico juvenil bien estratificado del tamaño de arena fina, media a gruesa. La brecha está formada por una mezcla caótica de fragmentos juveniles de rocas alcalino-basálticas, de caliza y de xenolitos de granulita félsica y nódulos de olivino ultramáfica. La matriz está formada de los mismos materiales pero finamente desmenuzados. El cementante es de carbonato de calcio. Ellos consideran a esta brecha como formada por depósitos de nubes eruptivas relacionadas con la formación del *maar*. La brecha tobácea cambia gradualmente hacia arriba a un depósito eterolitológico de *lapilli*, que ocupa la parte superior del cráter. La unidad está bien clasificada y estratificada. El material juvenil es basanita y abundantes xenolitos de lerzolita de espinela. (Aranda-Garza *et al.*, 1993), reportan xenolitos de *websterita* con granate, granulita de dos piroxenos y de granulita con granate y sillimanita, todos envueltos o cubiertos por lava basanítica. La parte pre-volcánica

está representada por un conglomerado formado por clastos de caliza, pedernal y rocas volcánicas félsicas (Aranda-Garza *et al.*, 1993).

Sobreyace a rocas marinas mesozoicas y a depósitos clásticos continentales del Plioceno al Pleistoceno. Subyace a sedimentos clásticos finos del Pleistoceno al Holoceno.

Se le asigna una edad Pleistoceno superior por estar encima del basalto que se han podido datar en 0.6 Ma (Ferrusquia-Vallafranca, 2011).

ñ).- Aluvión (Qal)

Se agrupa en esta unidad a depósitos aluviales que se localizan en los valles más extensos. Estos depósitos se presentan sobre todo en la parte oriental y centro-norte del área que ocupa el acuífero.

Están representados por depósitos mal consolidados de arena, arcilla y limo, así como por clastos redondeados a subarredondeados del tamaño de grava. Los clastos están compuestos por diferentes litologías, según las rocas aflorantes en las sierras y lomas que circundan a las depresiones o valles que los contienen. Estos sedimentos tienen por lo general una extensión limitada y su espesor no sobrepasa los 10 m. Por ser los sedimentos más jóvenes de la región, están sobreyaciendo prácticamente a todas las unidades anteriores. Se les asigna una edad Holoceno, y actualmente continúa su depósito. Se deposita en las partes topográficamente más bajas (en el piso de los valles) y en pequeñas cuencas intermontanas.

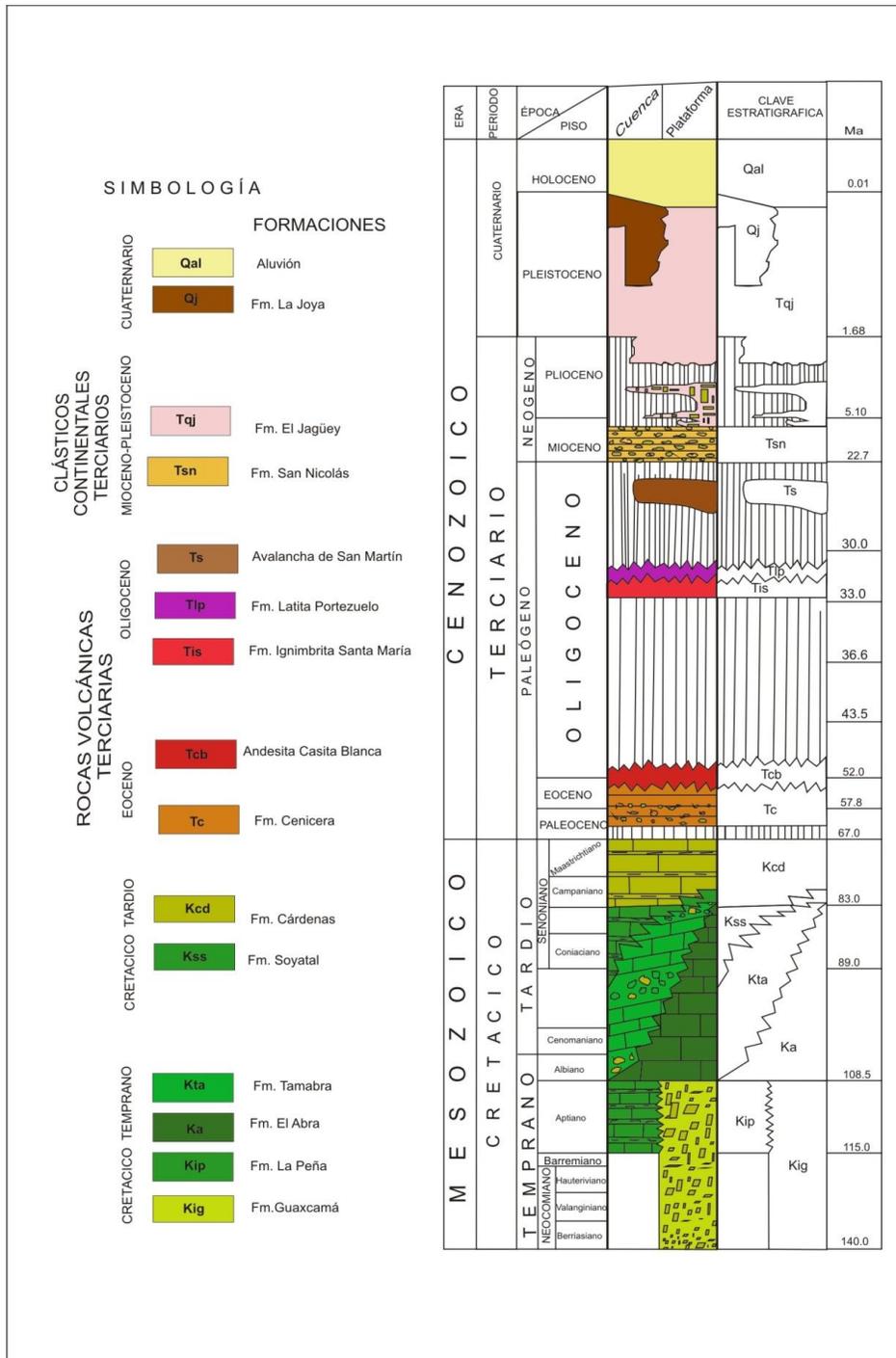


Figura 7- Columna Estratigráfica del Acuífero de San Nicolás Tolentino, S.L.P.

II.- HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

II.1 Unidades Hidroestratigráficas

Se ha escrito muy poco acerca de la hidrogeología del ASNT, por lo que es gran importancia describir las formaciones geológicas que conforman este acuífero desde el punto de vista de su grado de permeabilidad, esto ayudará a conocer las unidades hidrogeológicas con mayor detalle.

a).- *Formación Guaxcamá (Kig)*

Formada por yeso y anhidrita, constituye la unidad más antigua de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (Neocomiano-Aptiano). La litología de esta unidad no tiene permeabilidad primaria, y su naturaleza le induce características dúctiles durante la deformación, por lo que no desarrolla permeabilidad secundaria. Sin embargo, su naturaleza química la hace relativamente más fácil de erosionar (por disolución) que la caliza de la unidad sobre-yacente (Formación El Abra).

b).- *Formación La Peña (Kip)*

Esta unidad aflora solo en Sierra de Álvarez en el núcleo de los anticlinales. Está formada por estratos de espesor grueso a medio con intercalaciones de lutitas delgadas y pedernal. No presenta características litológicas con permeabilidad primaria favorable, sin embargo, el desarrollo de fracturas resultado del proceso de deformación principalmente en las charnelas de los pliegues, permite desarrollar buena permeabilidad secundaria en la cima de los anticlinales. El fracturamiento ha facilitado la disolución de las capas calcáreas desarrollando un incipiente *karst*.

c).- *Formación El Abra (Ka)*

Esta unidad cubre la mayor parte del área del acuífero. En la mitad poniente de la área del ASNT, donde está encimada tectónicamente sobre la Formación Soyatal y/o Cárdenas, o en pliegues anticlinales y sinclinales muy amplios y con inclinación suave en sus flancos. Presenta permeabilidad asociada al desarrollo de estas

estructuras. El control de permeabilidad es por fracturas, ya sea asociada al proceso de plegamiento (fracturas longitudinales, transversales o perpendiculares a los ejes de los pliegues, por cataclasis (brechas de falla) asociadas a fallas inversas (cabalgaduras) o a fallas normales. Permeabilidad adicional puede desarrollarse por fricción entre los planos de los estratos de la parte superior de la secuencia durante el plegamiento por el proceso denominado “*flexural sleep*”. El mayor desarrollo de “*karst*” se expresa en la formación de depresiones cársticas o dolinas, cuya mayor concentración está en Valle de Los Fantasmas” y entre Corral de Piedras y Llanos del Carmen. Otras estructuras cársticas son las estructuras de esponja, las cuales son abundantes prácticamente toda la exposición de esta formación. En la Sierra de Álvarez, en facies de talud de esta formación, en los ejes de los anticlinales mayores, hay numerosas dolinas de pequeño tamaño. Esta formación se considera como unidad propicia para almacenar agua (acuífera) sobre todo en las estructuras anticlinales, especialmente donde tienen una capa impermeable encima que la confina.

d).- Formación Soyatal (Kss)

Esta unidad está constituida por una secuencia de caliza arcillosa y lutita. Presenta en la parte inferior predominio de caliza sobre la lutita, y en su cima, predominio de lutita. En general es poco permeable donde predomina el dominio calcáreo, donde llegan a desarrollarse cavernas de disolución “*dolinas*”, e impermeable en la parte con predominio arcilloso. Esta condición queda en evidencia en la manifestación de algunos manantiales en el frente de una cabalgadura, donde las formaciones La Peña se enciman tectónicamente sobre esta formación. Se asume que el agua infiltrada en las rocas calcáreas fracturadas, al llegar al plano de contacto con esta formación de características impermeables, se mueve lateralmente y brota donde aflora este contacto.

e).- Formación Cárdenas (Kcd)

Esta unidad constituida por capas de lutita y arenisca, es la unidad con características hidrogeológicas menos favorables. Su permeabilidad es mínima y solo asignable a fracturamiento en los estratos de arenisca. Sin embargo, su mayor valor podría asignarse si sirve como roca sello de la unidad subyacente con condiciones favorables para constituir un acuífero.

f).- Formación Cenicera (Tc)

Esta unidad aflora de manera muy esparcida y sus afloramientos son pequeños. En general no presentan buena permeabilidad, y por lo tanto, no tienen interés hidrogeológico.

g).- Conglomerados de edad Oligoceno-Mioceno

Esta secuencia está en la base e intercalada con rocas volcánicas (lavas de andesita y dacita, e ignimbritas riolíticas). Son principalmente arenas y gravas con pobre compactación y consolidación, y débilmente cementadas, por lo que presentan buena permeabilidad. Afloran en dos áreas principales: en la depresión tectónica de San Martín de Abajo, y en una franja angosta al oriente de Sierra de Trejo, entre Potrero de Los Castillo y Carrizal de Guadalupe. En ambas áreas están basculados 20° al NE. En especial, en el graben de San Martín, la secuencia volcánica y sedimentaria tiene gran espesor (>400m), y está cortada por cuatro fallas normales de orientación NW-SE. En dicho graben se considera que esta unidad puede representar buenas posibilidades acuíferas, así como las unidades volcánicas que se intercalan con las arenas y gravas. En la parte norte central del polígono que delimita el acuífero, esta unidad está constituida por una secuencia principalmente lacustre formada por arenas y conglomerados calcáreos y con escasos fragmentos de rocas volcánicas). Sobreyacen a las rocas marinas mesozoica. La secuencia también presenta basculamiento de 15° a 20° al NE, y le sobreyace en discordancia erosional y angular una secuencia similar con facies más conglomeráticas poco consolidadas y sin cementar. En esta parte, las posibilidades de interés como acuífero dependen de

la predominancia de facies principalmente arenosas o conglomeráticas, dado que donde predominan las arcillas sus posibilidades como acuífero son nulas o muy reducidas.

h).- Secuencia Volcánica del Oligoceno-Mioceno

Tres unidades constituyen este paquete de rocas volcánicas; de la base a la cima son: Andesita Casita Blanca, Ignimbrita Santa María y Latita Portezuelo. El Mayor espesor (>400 m) de esta secuencia está en la sierra al oriente de Sierra de Trejo, donde además está basculada 20° al NE. Fuera de esta sierra, solo están ampliamente dispersas la unidad de andesita y la ignimbrita, pero en menores espesores. Ambas unidades presentan nula permeabilidad primaria, por lo que solo se esperaría permeabilidad en asociación con las fallas normales que las cortan y en su contacto. La otra unidad, La latita Portezuelo, se presenta más dispersa en forma de domos en la parte sur del polígono que delimita el acuífero. Los domos principales están al poniente de Santa Catarina, al SE de Sierra de Álvarez, y al oriente de Paso de San Antonio. La permeabilidad en esta unidad es solo superficial, a través de diaclasas o juntas de enfriamiento, pero internamente no es permeable, por lo que solo en las zonas con fallamiento desarrolla permeabilidad a través de la parte con cataclasis cercano al plano de falla.

i).- Avalancha San Martín (Ts)

Esta unidad predomina en la parte SE del polígono que delimita el acuífero. Está formada por escombros derivados del colapso de un sector de un gran estratovolcán de edad Oligoceno (Volcán de Atotonilco), ubicado en el extremo sur del acuífero. Está formada por megabloques, bloques y material del tamaño de grava y arena derivados de la dinámica misma del colapso parcial del cono del volcán. Solo parte del material desplazado a “tumbos” bajo el efecto de gravedad fue llevado a condición de arcilla, por lo que en conjunto esta unidad tiene muy buena permeabilidad. De hecho, gran parte de esta unidad, distribuida en todo el valle de

Santa Catarina, está cubierta por un manto delgado de material aluvial. Esto hace que resulte la unidad granular más importante de esta parte del acuífero.

j).- Basaltos Cuaternarios

De manera muy esparcida se presentan algunos derrames de lava de basalto mediana a débilmente fracturado o con juntas de enfriamiento en su parte superior, y masivo en su parte inferior. Algunos derrames están intercalados con depósitos de escoria, lo cual les da una morfología de conos. Algunos derrames fluyeron ampliamente formando verdaderas mesas de basalto al poniente de San Nicolás Tolentino. Algunos de ellos están intercalados con sedimentos lacustres y solo afloran en las barrancas. En general tienen poca importancia hidrogeológica.

k).- Formación La Joya (Qj)

Otro tipo de estructuras volcánicas presentes dentro del polígono que delimita el acuífero son las producidas por hidrovulcanismo. La mayor de todas es la denominada Laguna de Los Palau, adyacente al poblado Llanos del Carmen. El cráter de esta estructura alberga de manera temporal una laguna, que parece representar un registro sensible del nivel estático del agua en el material conglomerático que subyace a la estructura volcánica.

l).- Aluvión (Qal)

Esta unidad está formada por material suelto o semiconsolidado en las laderas de las estructuras topográficas más prominentes. Se interdigitan hacia la parte más plana de los valles con material aluvial de granulometría más fina. El desarrollo de corrientes en este material es de carácter intermitente y desaparecen rápidamente al llegar a las partes planas. Pueden ocurrir brotes pequeños de corrientes en el contacto con la unidad subyacente si esta es impermeable. Por ejemplo, en su contacto con sedimentos lacustres, en las inmediaciones de San Nicolás Tolentino; con lutitas y areniscas en las inmediaciones de Armadillo de Los Infante, y con yesos en las inmediaciones de Potrero de Santa Gertrudis.

La descripción anterior de las unidades litológicas que forman el ASNT permite deducir que estrictamente no se tienen unidades no permeables, por lo que las unidades hidrogeológicas se agrupan en permeables y de escasa permeabilidad, sin embargo para efectos del presente estudio, se considera a algunas como no permeables.

II.2.- Unidades permeables.

Las calizas de la formación La Peña se consideran poco permeables en cuanto a sus características intrínsecas de la roca (además de los estratos de lutitas intercalados entre los estratos calcáreos), aunque en las zonas donde el plegamiento generó mayor fracturamiento la permeabilidad es alta y se manifiesta en el desarrollo de dolinas y cavernas.

La unidad más extendida, la caliza de la formación El Abra, se considera como permeable sobre todo por su condición fracturada *kárstica*. La permeabilidad primaria puede considerarse muy limitada, y es del tipo intergranular e intraclastos *biógenos*.

Por su naturaleza muy fracturada, se considera como unidad altamente permeable a los depósitos de avalancha. Esto, en la mayoría de su área expuesta, excepto en las facies más distales, donde su permeabilidad puede ser medianamente permeable por el desarrollo limitado de arcilla.

Los depósitos piroclásticos que forman las estructuras volcánicas de Laguna de Los Palau y los de inmediaciones de Laguna de Santo Domingo son de naturaleza muy permeable, pero no tienen ninguna incidencia en el sistema de aguas subterráneas.

El relleno del Valle de Santa Catarina, formado principalmente de depósitos de avalancha y material aluvial que lo cubre es de naturaleza muy permeable.

La unidad fluvio lacustre de naturaleza areno-limosa dentro del graben de San Martín de Abajo, es altamente permeable.

II.3.- Unidades de escasa permeabilidad y no permeables

La Formación Soyatal se considera como de escasa permeabilidad en su parte inferior donde alternan capas de marga y lutita, definitivamente impermeable en su parte superior donde predominan la lutita y la marga. La permeabilidad por fracturamiento es especialmente manifiesto en la cresta de los anticlinales, donde desarrollan algunas dolinas (por ejemplo, en inmediaciones de Llanos de Saldaña).

El paquete de rocas volcánicas formado por lavas andesíticas, dacíticas y riolíticas se considera intrínsecamente como de carácter impermeable, excepto en las zonas cortadas por las fallas, a las que se asocia permeabilidad secundaria.

Las unidades cartografiadas como conglomerados oligomícticos y polimícticos distribuidos sobre todo al pie de las sierras de la parte norte y oriente del área que ocupa el acuífero, por su naturaleza poco consolidada, su matriz areno limosa y poco cementadas, se consideran con permeabilidad media a escasa.

La unidad de depósitos lacustres de naturaleza arcillo-limosa aflorante en las inmediaciones de San Nicolás Tolentino, Paso del Águila y Arroyo Hondo es de naturaleza poco permeable.

II.4.- Sistemas de flujo

II.4.1.- Introducción a los sistemas de flujo

Según Tóth, (2000), el agua subterránea es la causa común de una gran variedad de procesos y fenómenos naturales, por lo tanto debe de ser considerada como un agente geológico.

A su vez, los parámetros de un régimen de agua subterránea están controlados por grandes componentes: topografía, geología y clima; la topografía determina la cantidad de energía y su distribución que dispone el agua para su movimiento en una cuenca determinada y conforma los sistemas de flujo, la geología proporciona las zonas en donde el agua puede circular controlando las magnitudes de flujo, específicamente la posición de la roca basamento de donde se obtiene el volumen y la distribución del agua almacenada, adicionalmente, determina la hidrogeoquímica

del agua, los factores climáticos determinan la magnitud y distribución espacial del agua suministrada a cada región.

El movimiento del agua subterránea depende principalmente de su energía potencial y del gradiente hidráulico que provoca su desplazamiento desde una zona topográficamente alta zona de recarga (área que reúne una serie de factores que propician la infiltración de agua hasta alcanzar el agua subterránea, el flujo es vertical descendente y nivel freático profundo) a una zona baja zona de descarga (zonas con movimiento vertical endenté del agua, emergido del subsuelo, contribuyendo junto con el agua de escorrentía – *exceso de lluvia*, a la formación de fuentes superficiales de agua).

Los sistemas de flujo subterráneo se diferencian por la profundidad del recorrido y por sus características hidrogeoquímicas. El contenido de elementos químicos en el agua subterránea es dependiendo del medio geológico y generalmente aumenta al ampliar la escala espacial y temporal; en especial, en el contenido de elementos traza.

Las características químicas del agua subterránea varían entre un sistema de acuífero somero y uno profundo. Además, la temperatura del agua es considerada un trazador natural que permite la identificación de flujos de agua subterránea, donde, en general, las temperaturas más frías se manifiestan comúnmente en flujos someros, y las temperaturas más altas en flujos profundos Edmunds *et al.*, (1992); Van-Lanen y Carrillo-Rivera, (1998). El flujo local es el más simple de la jerarquía de las redes de flujo en el plano vertical. Generalmente la topografía abrupta produce varios sistemas de este tipo, donde las zonas de recarga y descarga están situadas en colinas y depresiones adyacentes, es decir en mismo valle. Se encuentran a corta distancia de su zona de recarga y en una profundidad somera áreas de pocos kilómetros cuadrados, por lo que representa un sistema dinámico de corta duración; con respecto a la calidad fisicoquímica del agua subterránea, se caracteriza por un contenido bajo de sales disueltas, una temperatura baja, bajo pH, valor alto de Eh y un contenido alto de oxígeno disuelto. Mientras la presencia del flujo local es limitada a una cuenca y puede variar acorde cambia las estaciones del año, el flujo

intermedio en algunos casos, parte del agua de recarga puede descargarse en otro valle localizado a un nivel topográfico menor incluyendo dentro de su extensión la presencia de varios flujos locales, esto definirá el sistema intermedio. Desde el punto de vista fisicoquímico y comparativamente con el flujo local, el agua en la zona de descarga presenta una mayor temperatura, menor contenido de oxígeno disuelto, mayor contenido de sólidos totales disueltos (STD), pH más alcalino y más concentración de sales disueltas y el flujo regional circula a mayor profundidad, iniciando en los terrenos de mayor altitud y finalizando en las zonas más bajas donde descarga, donde se pueden encontrar varios sistemas de flujo local sobre este y al menos uno de flujo intermedio. Debido a su mayor recorrido y profundidad de circulación, adquiriendo el agua una mayor temperatura que los sistemas locales e intermedios, la concentración de sales es también mayor, presentando menos oxígeno disuelto y con un pH mucho más alcalino.

Como puede apreciarse la Figura 8 describe de manera esquemática los patrones de flujo presentando sus características fisicoquímicas específicas. Ese esquema simplificado de Toth, (2000) nos muestra los efectos y manifestaciones de los flujos de agua subterránea en una cuenca hidrológica regional.

Los flujos subterráneos pueden separarse por densidad, como consecuencia de su temperatura y contenido químico; pero los sistemas de flujos también pueden mezclarse en algunos casos, tal como por efecto de extracción de agua en los pozos perforados a una profundidad, donde el agua se capte en zonas de contacto entre dos sistemas de flujo diferentes o si existe una conexión hidráulica entre dos o más tipos de agua en un sistema acuífero.

De manera normal se espera un aumento en el contenido de STD en las aguas subterráneas en la dirección del flujo. Puede ocurrir también sin embargo otros cambios tales como cambios en las facies aniónicas (por ejemplo, de bicarbonatada a sulfatada y clorurada), una disminución de los contenidos oxígeno disuelto y un cambio en el potencial redox de positivo a negativo.

En términos generales, en la zona de recarga domina la disolución y en la zona de descarga la precipitación de las sales. La zona central actúa como zona de transporte de masa, energía o de intercambios de solutos.

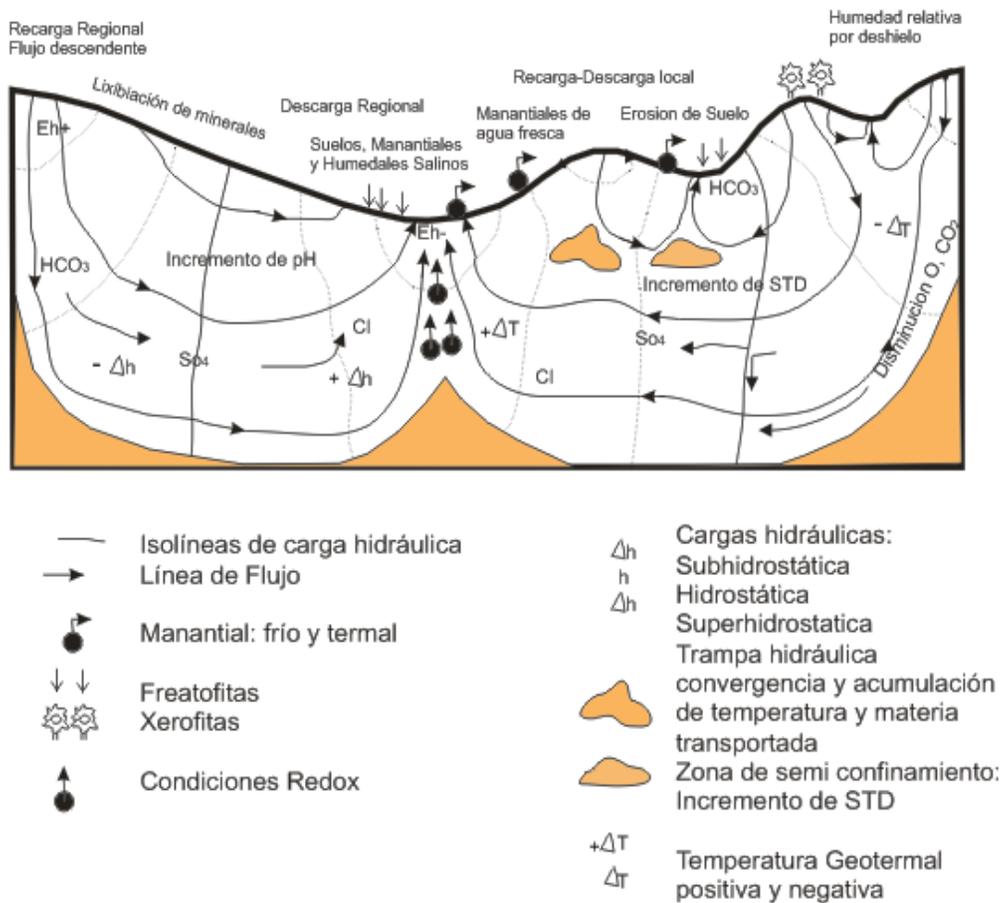


Figura 8- Sistemas de flujo. Efectos y manifestaciones de flujo gobernado por gravedad en una cuenca regional (Tóth, 2000)

En el presente estudio es importante la alternancia de regiones de recarga y descarga del agua subterránea, la superposición vertical de los diferentes tipos de

régimen de flujo ya que son primordiales en el funcionamiento de un sistema hídrico Tóth (1995, 2000), esto da una idea de la distribución espacial de las características físicas y químicas del agua subterránea así como la presencia de suelos salinos, entre otros que existen dentro del área de trabajo.

II.5- Piezometría

II.5.1- Profundidad del nivel estático (N.E.) para el año 2010.

Los datos del nivel estático o dinámico se obtuvieron del estudio de disponibilidad realizado para CONAGUA en el año 2011 y en los recorridos del muestreo de agua subterránea se obtuvieron algunos en los que no había sido posible tomar medidas. El análisis del ASNT, se realizó por subcuencas de estudio por lo que a continuación se describe un panorama general del acuífero y posteriormente la descripción de cada una de ellas.

El plano general del acuífero se presenta en la Figura 9, donde se puede apreciar que en toda el área del acuífero las profundidades de los niveles del agua son someros no mayores a 25 m considerando que la mayoría de los aprovechamientos son norias. Al nororiente y sur del acuífero las profundidades varían de 3 a 28 m, debido a la influencia que se tiene por el bombeo de pozos más profundos.

a).- Área I, San Nicolás Tolentino

En esta zona que pertenece al nororiente del acuífero las profundidades son muy someras, desde 1.0 m en Laguna de San Isidro, Armadillo de Los Infante, Barranca de San Joaquín, Morenos y Ojo de Agua, aumentando gradualmente hacia el norte hasta San Nicolás Tolentino, con profundidades de 14 m, y hacia el sur de Morenos, con 24 m en la zona de riego Figura 9. Es muy claro el cambio de profundidad que se manifiesta en las partes aledañas al Río San Nicolás y a los manantiales, pues las profundidades del nivel estático aumentan considerablemente conforme se alejan de

estos como, se puede observar en Ojo de Agua, donde las profundidades van desde 4 m hasta 21 m.

En general las profundidades en esta zona varían desde 0 m hasta 25.18 m Tabla 3 en toda la cuenca.

Tabla 3- Datos para la configuración del NE, San Nicolás Tolentino, 2010

X	Y	CLAVE	ZONA	TIPO DE APROV	ELEVACION	PROFUNDIDAD AL N.E. (m)	ELEVACION AL NIVEL ESTATICO (msnm)
2461141	340100	IG-001	1	NORIA	1455	14.66	1440.34
2455008	343634	IG-002	1	POZO	1332	25.18	1306.82
2455404	343610	IG-003	1	NORIA	1325	17.2	1307.80
2456433	343633	IG-004	1	NORIA	1339	5.2	1333.80
2464032	336311	IG-005	1	MANANTIAL	1519	0	1519.00
2461892	333703	IG-006	1	NORIA	1634	3.55	1630.45
2461833	339648	IG-007	1	NORIA	1448	2.1	1445.90
2461813	339981	IG-008	1	NORIA	1441	4	1437.00
2461929	340164	IG-009	1	NORIA	1444	0.8	1443.20
2454813	345417	IG-010	1	MANANTIAL	1300	3.35	1296.65
2455295	345495	IG-011	1	POZO	1333	22.72	1310.28
2451032	352276	IG-012	1	POZO	1319	*	
2456929	339870	IG-020	1	POZO	1517	0.74	1516.26
2457030	340000	IG-021	1	NORIA	1507	2	1505.00
2457563	340090	IG-022	1	NORIA	1477	0.5	1476.50
2457686	340247	IG-023	1	NORIA	1467	0	1467.00
2458222	340218	IG-024	1	NORIA	1453	1.5	1451.50
2458985	339654	IG-025	1	POZO	1518	*	
2457897	333551	IG-052	1	NORIA	1779	*	
2457057	331894	IG-053	1	NORIA	1797	8	1789.00
2461303	329570	IG-054	1	NORIA	1619	2.03	1616.97
2458143	333245	IG-100	1	NORIA	1797	4.2	1792.80
2463342	333540	IG-106	1	NORIA	1560	3.65	1556.35
2466420	334807	IG-110	1	POZO	1547	0.8	1546.20
2459567	329885	IG-111	1	MANANTIAL	1687	0	1687.00

b).- Área II, Ocampo Paraíso

Del sur al norte, la configuración de las líneas piezométricas en la cuenca de Ocampo-Paraíso se presentan de menor a mayor profundidad desde Carrizal de Guadalupe 3 m, Agua Fría y Sermón de Santa Ana, aumentando hasta 8 y 9 m en el centro de la cuenca donde se pueden observar las mayores profundidades en las localidades de Paraíso, y Allende (Figura 9). En general las profundidades varían de 1.0 hasta 10 m Tabla 4.

Tabla 4- Datos para la configuración del NE, Ocampo Paraíso, 2010

X	Y	CLAVE	ZONA	TIPO DE APROVE	ELEVACION	PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO N.E. (m)	ELEVACION AL N.E. (msnm)
2451032	352276	IG-013	2	POZO	1358	3.58	1354.42
2451200	355278	IG-014	2	NORIA	1166	3.46	1162.54
2451317	355237	IG-015	2	NORIA	1179	2.12	1176.88
2450933	355474	IG-016	2	NORIA	1158	4.15	1153.85
2450982	355668	IG-017	2	NORIA	1157	2.16	1154.84
2451038	355802	IG-018	2	NORIA	1157	2.5	1154.50
2451136	356211	IG-019	2	NORIA	1158	2.9	1155.10
2449530	356876	IG-026	2	NORIA	1158	8.6	1149.40
2448667	356293	IG-027	2	NORIA	1180	2.3	1177.70
2449660	357049	IG-028	2	NORIA	1157	6.85	1150.15
2449662	357051	IG-029	2	NORIA	1157	7.7	1149.30
2449683	357017	IG-030	2	NORIA	1157	4	1153.00
2449732	356980	IG-031	2	NORIA	1157	6	1151.00
2449793	357046	IG-032	2	NORIA	1157	4	1153.00
2449790	357043	IG-033	2	NORIA	1157	3.5	1153.50
2449809	357088	IG-034	2	NORIA	1157	3	1154.00
2449807	357094	IG-035	2	NORIA	1157	1.5	1155.50
2449859	357070	IG-037	2	POZO	1157	3.3	1153.70
2450211	357425	IG-038	2	NORIA	1137	4.4	1132.60
2449910	357119	IG-039	2	NORIA	1158	3.5	1154.50
2450005	357158	IG-040	2	NORIA	1155	5	1150.00
2450007	357220	IG-041	2	NORIA	1161	4.8	1156.20
2450029	357243	IG-042	2	NORIA	1153	4.5	1148.50
2450150	357119	IG-043	2	NORIA	1145	6	1139.00
2450088	357043	IG-044	2	NORIA	1157	5	1152.00
2450148	357172	IG-045	2	POZO	1140	4	1136.00
2450129	357247	IG-046	2	NORIA	1139	3.5	1135.50
2450140	357249	IG-047	2	NORIA	1139	3	1136.00
2448877	358560	IG-048	2	NORIA	1117	6	1111.00
2448877	358560	IG-049	2	NORIA	1117	9	1108.00
2449265	338626	IG-050	2	NORIA	1119	10	1109.00
2449522	358191	IG-051	2	POZO	1136	8	1128.00
2448648	359675	IG-055	2	POZO	1117	7.45	1109.55
2447854	359379	IG-078	2	NORIA	1117	5.2	1111.80
2448197	358918	IG-079	2	POZO	1117	6.87	1110.13
2448080	358987	IG-080	2	NORIA	1117	8.2	1108.80
2448097	359766	IG-081	2	NORIA	1117	5.3	1111.70
2448105	359765	IG-082	2	NORIA	1117	*	
2448332	359942	IG-083	2	POZO	1117	6.6	1110.40
2446048	360565	IG-084	2	POZO	1097	2.7	1094.30
2445894	360708	IG-085	2	NORIA	1097	1.9	1095.10
2445422	361760	IG-086	2	NORIA	1097	*	
2445433	361769	IG-087	2	NORIA	1097	7.5	1089.50
2445441	361773	IG-088	2	NORIA	1097	7.8	1089.20
2445469	362193	IG-089	2	NORIA	1097	7.1	1089.90
2445431	362269	IG-090	2	NORIA	1097	6.4	1090.60
2445371	362346	IG-091	2	POZO	1097	*	
2445113	361484	IG-092	2	POZO	1097	6.22	1090.78
2445083	361488	IG-093	2	NORIA	1097	6	1091.00

c).- Área III, Santa Catarina

Las profundidades mayores del ASNT se tienen en esta zona, donde además se concentra la mayor cantidad de pozos y áreas agrícolas. En la (Figura 9) se pueden observar 3 zonas donde el nivel estático se profundiza a más de 20 m. En la parte sur específicamente en La Ventilla, el nivel estático se registro a 22.26 m de profundidad, al oriente en Santa Catarina se registra a 29 m y al centro en San José del Terremoto a 28 m. La Tabla 5 presenta los datos para esta configuración, y como se puede observar que los valores fluctúan desde 0.25 m hasta 300 m, donde la mayor profundidad se midió en el pozo IG-101 que está ubicado en la zona agrícola que se encuentra en Puente Prieto.

Tabla 5- Datos para la configuración del NE, Santa Catarina, 2010

X	Y	CLAVE	ZONA	TIPO DE APROV	ELEVACION	PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTATICO N.E. (m)	ELEVACION AL N.E. (msnm)
2437464	354244	IG-056	3	POZO	1190	8	1182
2436159	355114	IG-057	3	POZO	1200	25	1175
2437775	351573	IG-058	3	POZO	1205	30	1175
2438626	352506	IG-059	3	POZO	1182	*	
2430579	358295	IG-060	3	NORIA	1317	3.95	1313
2432323	354730	IG-061	3	NORIA	1244	1	1243
2439200	349493	IG-062	3	NORIA	1179	1.7	1177
2439369	349536	IG-063	3	NORIA	1180	0.25	1180
2438762	350200	IG-064	3	POZO	1200	26.1	1174
2439289	351123	IG-065	3	POZO	1180	*	
2439552	351706	IG-066	3	POZO	1174	*	
2440283	352668	IG-067	3	POZO	1160	4	1156
2439986	352094	IG-068	3	POZO	1163	*	
2439489	352176	IG-069	3	POZO	1172	10.3	1162
2437816	354012	IG-070	3	POZO	1184	75	1109
2435820	353188	IG-071	3	POZO	1220	*	
2434190	351793	IG-072	3	POZO	1260	3.2	1257
2434202	351827	IG-073	3	NORIA	1259	3	1256
2431928	354667	IG-074	3	NORIA	1252	5	1247
2432043	354688	IG-075	3	POZO	1248	22.6	1225
2432317	354735	IG-75A	3	NORIA	1244	*	
2432641	354711	IG-076	3	POZO	1238	*	
2432387	357988	IG-101	3	POZO	1270	*	
2432214	359996	IG-102	3	NORIA	1282	3.73	1278
2432992	359578	IG-103	3	POZO	1261	*	
2436269	353724	IG-104	3	POZO	1209	18.82	1190
2443004	364594	IG-105	3	POZO	1080	11.34	1069
2438608	354882	IG-108	3	POZO	1201	*	
2440096	353583	IG-109	3	POZO	1169	10	1159
2432715	351041	IG-200	3	NORIA	1506	3	1503
2435812	353190	IG-205	3	POZO	1298	15	1283
2436306	353635	IG-208	3	POZO	1282	15	1267
2425298	359991	IG-210	3	RIO	1525	*	
2440347	347969	IG-211	3	RIO	1293	*	
2435250	357753	IG-212	3	POZO	1230	12	1218
2434699	358659	IG-213	3	NORIA	1214	6	1208
2438625	352515	IG-214	3	POZO	2009	35	1974

II.6.- Red de Flujo

II.6.1.- Configuración de cargas hidráulicas y dirección de flujo del agua subterránea

La configuración de las curvas de igual elevación del nivel estático se realizó obteniendo la elevación de los brocales de los aprovechamientos censados por medio del uso del sistema de información geográfica, de tal forma que se pudiera tener una elevación confiable en el plano para poseer una idea cualitativa de las recargas en el acuífero así como de la dirección del flujo subterráneo.

Se calculó la carga hidráulica de los aprovechamientos, restando a la cota del brocal del pozo obtenida la profundidad del nivel estático. De esta manera se definió la dirección de flujo del agua subterránea a partir de configuraciones para isovalores de cargas hidráulicas en las tres subcuencas; suponiendo que estas líneas son perpendiculares a las equipotenciales. Los resultados en las mismas se analizan por separado.

Las configuraciones del nivel estático de las obras donde se pudo documentar en cada una de las subcuencas: Las direcciones de flujo que señalan los gradientes subterráneos en la subcuenca de San Nicolás Tolentino la dirección de las corrientes subterráneas son, en general, en el mismo sentido que el curso del río San Nicolás (de NW a SE), con aportes laterales de los afluentes que bajan del río Armadillo y del río San Isidro. El gradiente en el tramo analizado es muy semejante a la pendiente del río San Nicolás, desde un nivel de 1550 msnm a 1295 msnm (255 m de diferencia de altura), en 16 Km. Esto corresponde a una pendiente apenas de 1°.

En la subcuenca de Ocampo Paraíso, en el tramo analizado, los niveles piezométricos en las obras muestreadas cambian de 1162 msnm a 1090 msnm (60 m de diferencia de altura) en 9 Km de recorrido, lo cual da un gradiente menor a 1°. La dirección general de las corrientes subterráneas es de NW a SE.

La subcuenca Santa Catarina es la más compleja en cuanto a la piezometría porque aunque la cruza el río Santa Catarina, el que constituye la recarga principal para el

acuífero, recibe también aporte de otra corriente semiperene importante (Arroyo Grande) y dos más intermitentes (Arroyo El Hacha y Álamos). El aporte al acuífero de estas tres últimas fuentes de manera subterránea hacia el centro del valle. El menor nivel piezométrico se encuentra en el centro del valle, justo donde están la mayoría de los pozos de bombeo. Esto sugiere que se trata de un cono de abatimiento que se formó en el tiempo que se hizo el censo. Por las características del material que aloja el acuífero libre (arenas medias a gruesas) se asume que cuando el bombeo no es intenso se recuperan los niveles. A este respecto, solo otros censos darán información sobre la realidad de este comportamiento.

En términos generales se puede decir que las corrientes subterráneas siguen las mismas direcciones que las corrientes superficiales que alimentan al acuífero en cada una de las 3 subcuencas.

El acuífero subterráneo confinado captado por el pozo profundo IG-101, por constituir un solo dato no se incluye en el presente análisis.

Caracterización hidrogeoquímica y direcciones de flujo...

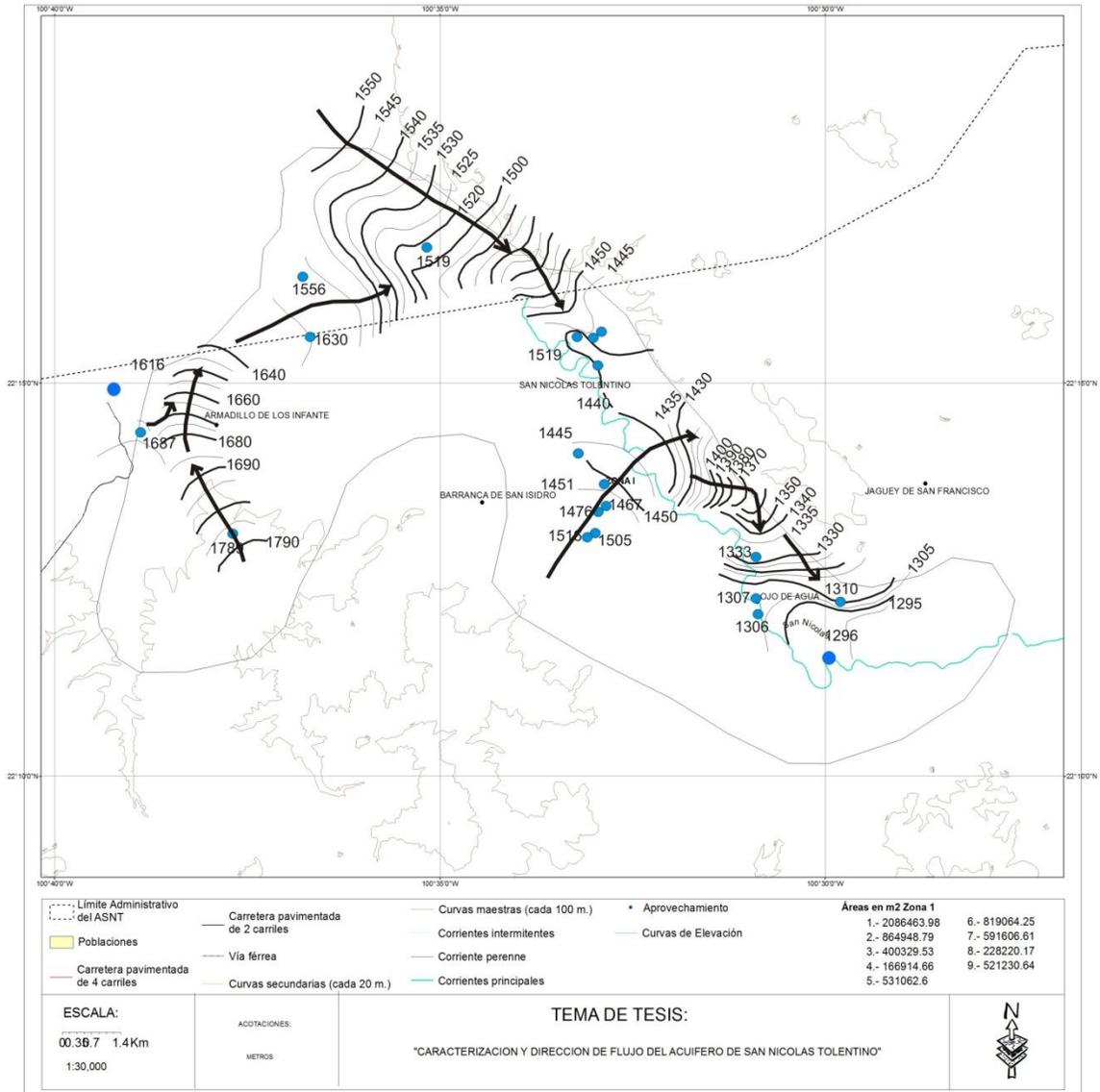


Figura 10- Dirección de flujo del agua subterránea área I (San Nicolás Tolentino)

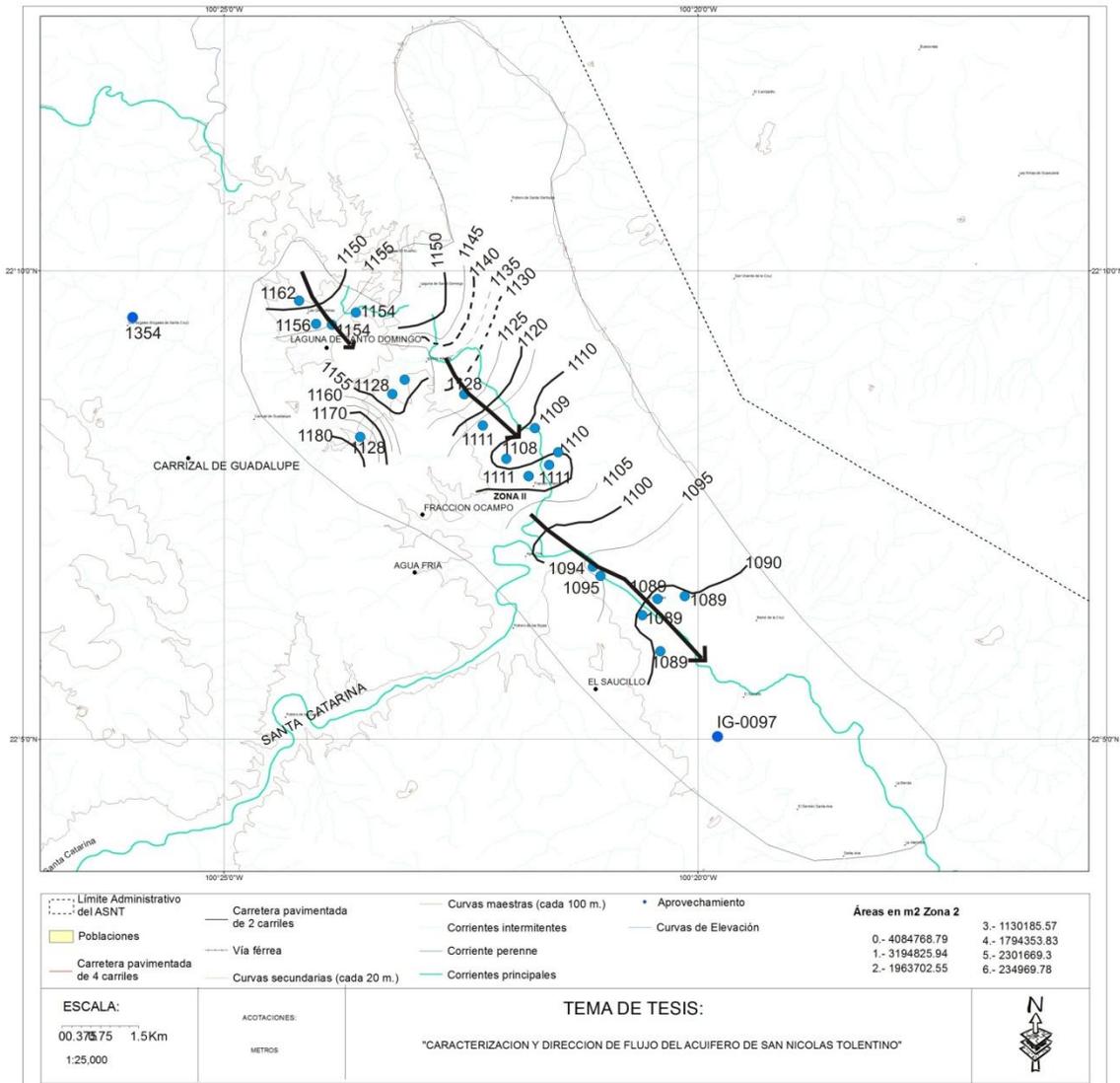


Figura 11.- Dirección de flujo del agua subterránea área II (Ocampo-Paraiso).

Caracterización hidrogeoquímica y direcciones de flujo...

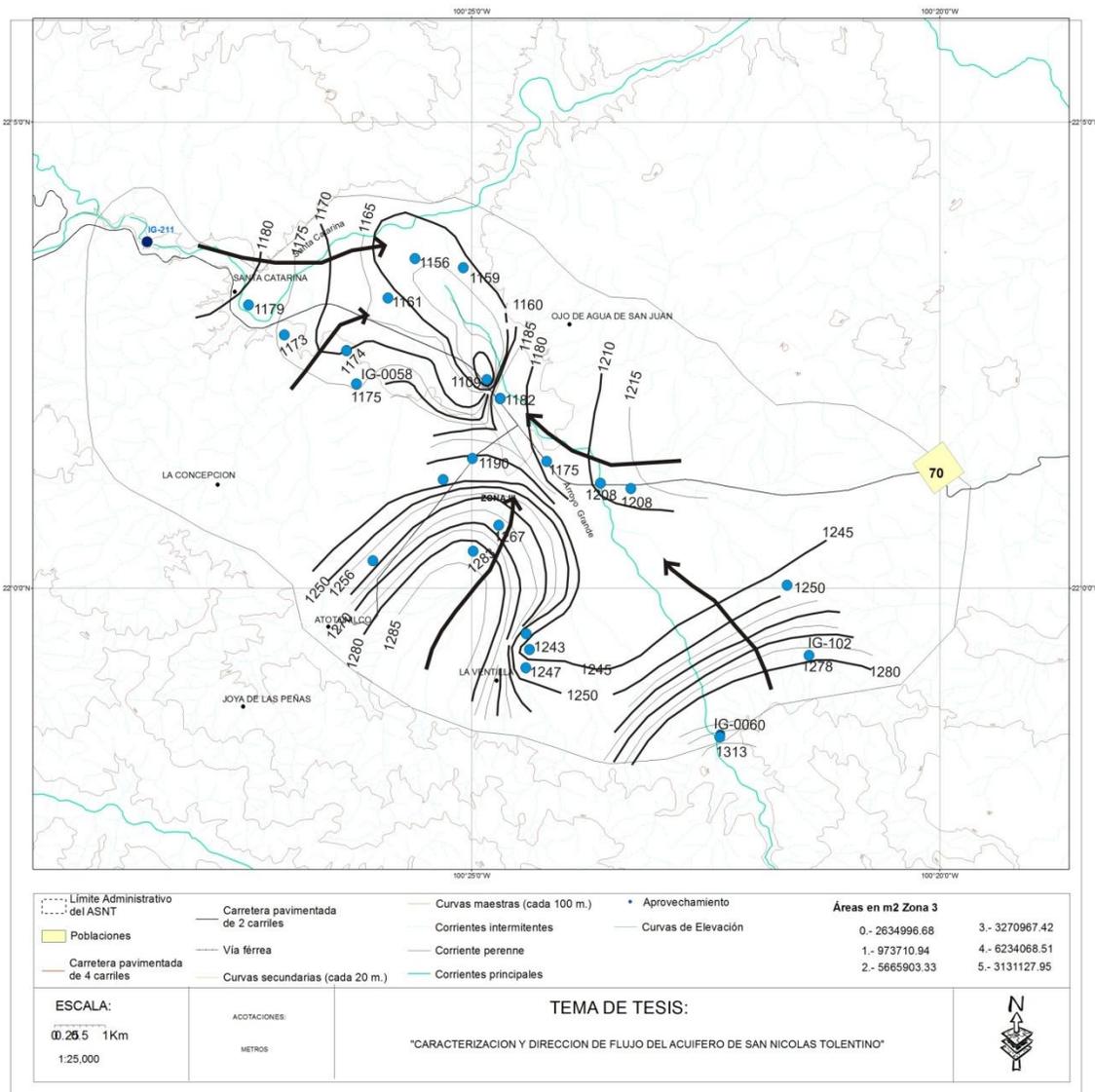


Figura 12- Dirección de flujo del agua subterránea área III (Santa Catarina).

III.- HIDROGEOQUÍMICA

III.1.- Antecedentes

En el capítulo uno se hace mención a los estudios efectuados dentro de la zona de estudio de estos el realizado por Medina-Rivero, en 1965 tiene como objetivo conocer las posibilidades acuíferas de la zona a fin de que el agua sea principalmente para fines ganaderos. Geológicamente presenta dos tipos de roca riolitas-basaltos y las sedimentarias constituidas por calizas, estas últimas afloran en la parte superior de los cerros más altos como el Pinto o el Picacho. Las formaciones yesosas se encuentran en laguna de Santo Domingo, puerto de Santa Gertrudis, Sotolar y Romerio en este último lugar se midió capas de yeso de 45 cm. En promedio. Hidrológicamente constituye la cuenca de alto Pánuco, constituyendo al río Armadillo o San Nicolás sus principales afluentes son los arroyos: Lirios, del Salto, Xoconoxtle, Barranca y El Jagüey, este a su vez se une al río Santa María en las cercanías de Santa Catarina, aguas abajo cambia el nombre a Tantoan. Del análisis de agua muestreada se reportan 96 aprovechamientos de los cuales 32 son manantiales, 30 norias subfluviales y 34 pozos. La calidad de esta agua es mala por poseer cantidades de nitratos y nitrógenos rebasando límites (Norma, NOM-011-CNA-2000) considerando esta agua como venenosa. En la formación calcárea se considera de origen local, solo norias subfluviales se alimentan con agua subterránea, situadas en las márgenes del río, los pozos se encuentran en material aluvial y fuera de las márgenes del río, abastecidas por drenajes subterráneos procedentes de las montañas y cerros con buena estructura para infiltración. Las temperaturas varían de 11.9 a 25 °C, la clasificación de aguas son muy frías a frías y profundidades de 0 a 31.5 m. Geoquímicamente existe tres tipos de familias, estos son: aguas calcomagnesianas dominan toda la región del cauce del río San Nicolás, aguas yesosas se encuentran al sur de Villa Juárez, Santa Gertrudis y laguna Santo Domingo y aguas en aluviones encontrándose en la Milpa estas familias demuestran un mismo drenaje común.

III.2.- Muestreo

Para complementar los datos obtenidos del estudio realizado por CONAGUA en 2011, se muestrearon 8 aprovechamientos y todos los resultados se tomaron para realizar el análisis por lo que la Figura 13 representa la localización

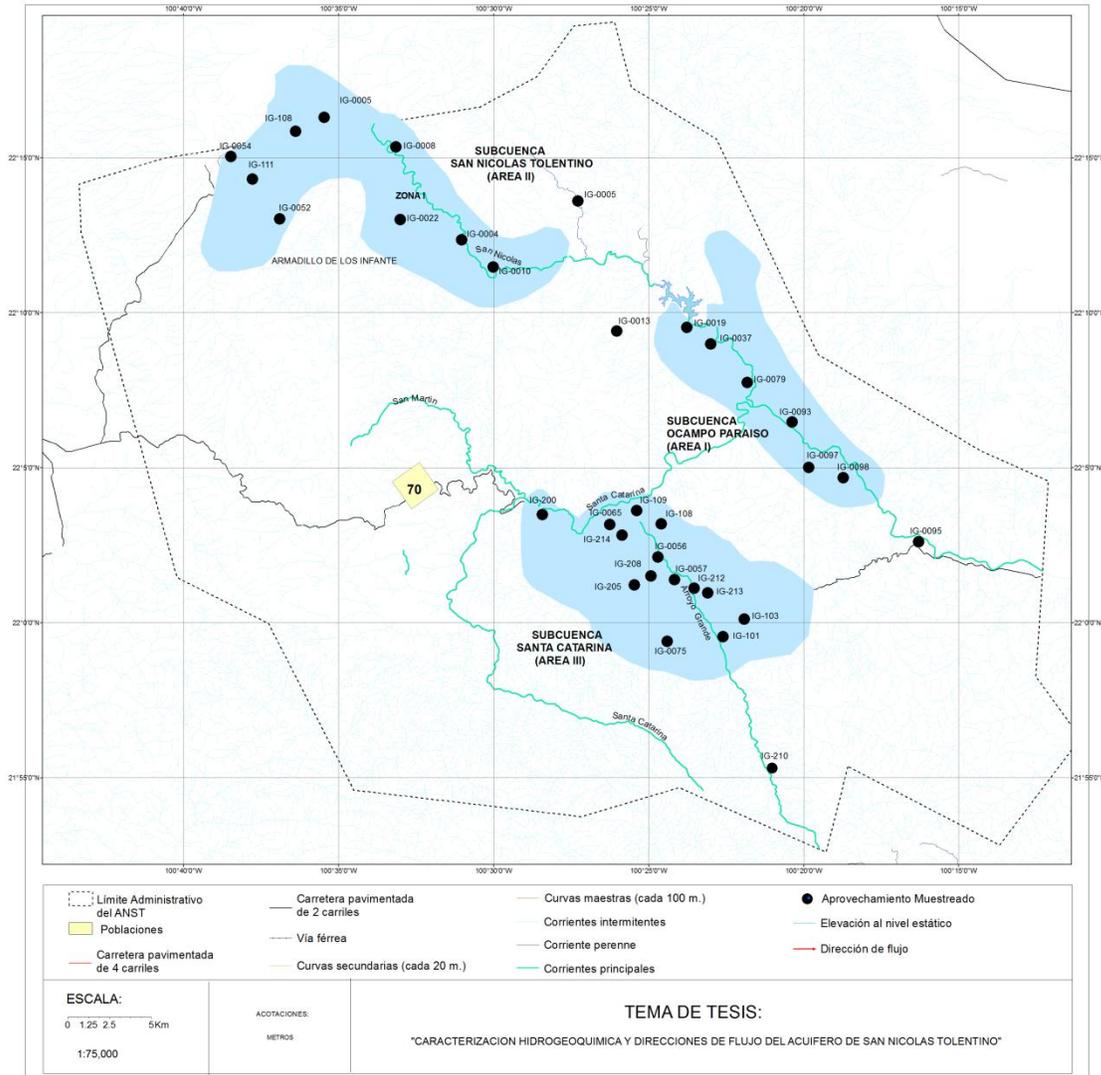


Figura 13- Aprovechamientos muestreados que cubren las tres subcuencas de estudio: San Nicolás Tolentino (SNT área I), Ocampo Paraíso (OP área II) y Santa Catarina (SC área III).

La Figura 14 es un ejemplo de la hoja de campo utilizada para recopilar la información en el sitio de muestreo. Este formato incluye todos los datos que permiten tener un conocimiento actual y confiable de la calidad del agua subterránea.

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA COLECTADAS EN LA REGIÓN DE SAN NICOLAS TOLENTINO, S. L. P.										
DATOS GENERALES										
Clave del Aprovechamiento	IG-019			Tipo de Aprovechamiento		Pozo	Noria	Manantial	Canal	
Coordenadas UTM(WGS84):	356211	X	2451136	Y	Uso del Agua	Estanque	Arroyo	Presa	Papalote	
						Potable	Agrícola	Pecuario	Doméstico	
						Agropec	Servicios	Industrial	Sin uso	
Elevación (msnm)	Altura del			Tipo de Bomba	Turbina Vertical	Sumergible		Centrífuga		
Municipio	San Nicolas Tolentino				Eléctrica	Combustión Int		Sin equipo		
Localidad	Golondrinas			No. de Muestra	71	Profundidad				
Fecha	09-dic-10			Hora de Inicio (hrs.)	13:55	ψ de Descarga		2'		
Litología Predominante				Temperatura Ambiente (°C)	35.5°C	Tiempo de Bombeo				
Prof. al Nivel del agua	NE	m	ND	m	Medidor CFE					
Lugar de Toma de	Llave en	Descarga	Canal	Estanque/	Duración del Muestreo	Gasto de Extracción		3 lps		
PARAMETROS MEDIDOS EN CAMPO										
Tiempo (min.)	1	3	5	7	9	11	13	15	17	
T (°C)	19.3	20	20.2	20.4	20.5	20.9	20.8	21	21	
pH	8.02	8.02	7.91	7.9	7.91	7.79	7.8	7.79	7.8	
E campo (mV)	318	308	301	298	297	294	293	292	292	
CE (µmhos/cm)	427	428	434	438	445	447	453	455	455	
O.D. (%)	005	004	004	004	004	004	004	003	003	
O.D. (mg/l)										
DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD DE CAMPO										
Nacido: <u>1.6 Normal</u> V muestra (alcal.): <u>50</u> ml										
H ₂ SO ₄	48	84	119							
pH	6.59	5.7	2.75							
ml										
								Alcalinidad Total = _____ mg/l CaCO ₃		
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA COLECTADA										
MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CANTIDAD	CAPACIDAD (ml)	CONSERVADOR:		FILTRADA?				
ANIONES MAYORES,	POLIETILENO	1	100	REFRIGERACIÓN		NO				
METALES (MAYORES Y	POLIETILENO	1	125	REFRIGERACIÓN, HNO ₃		SI				
NIITRATO	POLIETILENO	1		REFRIGERACIÓN, H ₂ SO ₄		SI				
Observaciones: _____										
Registrado por: _____										
IG-0019										
										

Figura 14- Ejemplo de la hoja de campo que se uso para muestreo de agua subterránea.
(Adaptada de CONAGUA, 2011)

Resultados

La Tabla 6 resume los resultados de los parámetros de campo y la Tabla 3.2 concentra los resultados de las principales especies químicas mayores. Los resultados de laboratorio se pueden consultar en el anexo de hidrogeoquímica.

Tabla 6- Resumen de los resultados de parámetros de campo

DATOS DE CAMPO				
	TEMPERAURA °C	pH	C.E. µmhos/CM	Eh (mV)
MEDIA	21.88	7.68	532.76	320
MINIMA	16.00	6.71	280	231
MAXIMA	31.9	8.73	826	801

Tabla 7- Resumen estadístico de las principales características fisicoquímicas de agua subterránea (n=34)

	ANIONES (mg/l)					CATIONES (mg/l)					ALCAL.TOT. (mg/l CaCO ₃)	DUREZA. (mg/l CaCO ₃)
	HCO ₃	CO ₃	Cl	SO ₄	N-NO ₃	Na	K	Ca	Mg	F		
MEDIA	273.35	3.5	13.16	76.16	4.91	30.41	6.55	72.23	16.16	0.55	234.838	227.94
MINIMO	134.2	0	6.8	2	0.07	5.53	2.33	16	1.94	0.03	110	60.89
MAXIMO	401.38	11.28	35.13	725	27.25	149	25	255	48.38	2.19	329	836

III.3. - Validación de los datos

Con la finalidad de conocer la confiabilidad de los resultados de laboratorio, se realizó un análisis de electro-neutralidad (Tabla 8) de cada una de las muestras para comprobar la exactitud del resultado con relación a los elementos mayores utilizando la siguiente fórmula:

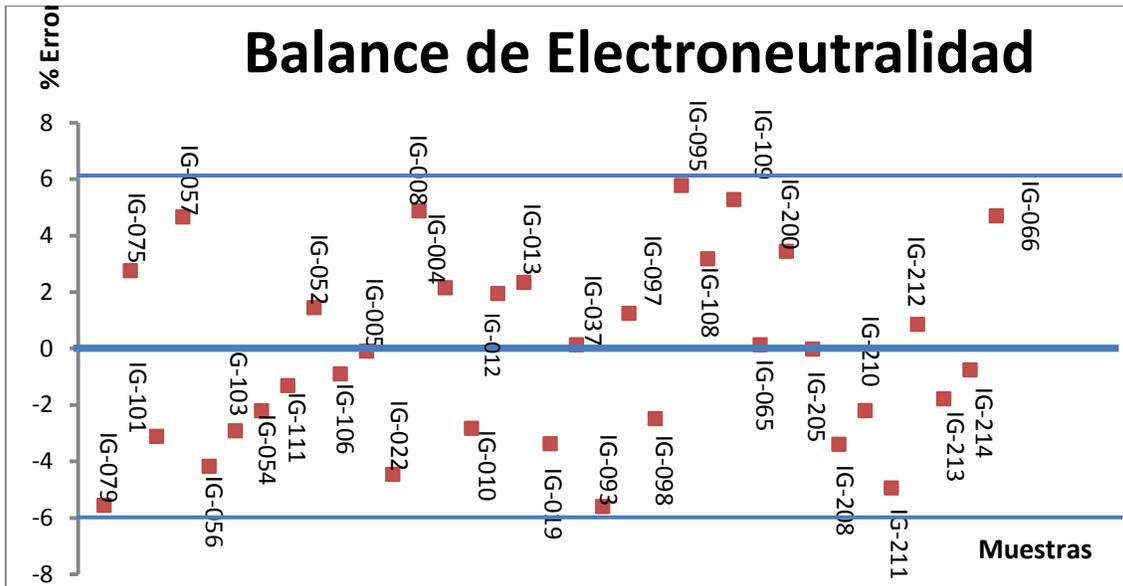


Figura 15- Balance de Electroneutralidad

La gráfica de la Figura 15 presenta con detalle la posición espacial de cada una de las muestras. Se puede observar en este balance iónico que todas las muestras cumplen con la ley de electro-neutralidad con valores no mayores al $\pm 10\%$, por lo tanto los resultados del laboratorio son confiables.

Tabla 8- Resultados de laboratorio y balance de Electroneutralidad del ASNT reportando en por ciento de error para cada una de las muestras

SAN NICOLAS TOLENTINO				COORDENADAS GEOGRAFICAS		PARAMETROS DE CAMPO					Resultados de Laboratorio														Electroneutralidad				
MTR	LOCALIDAD	lo APROV	APROV	LONG	LAT	T °C	PH	C.E μmho	O.D %	Eh mV	C.E μmho	STD mg/Lt	Alk. To mg/Lt	Dureza Total	Unidades mg/l										sum ca	sum an	cat - an	cat + an	% error
															Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	N-NO ₃	F					
7	OCAMPO	IG-079	POZO	-100.408	22.987	24.4	7.53	585		81	749	524	269	203.9	54	5	47	21	0	328.2	29.8	42	2.9	0.41	6.553	7.324	-0.770	13.877	-5.552
49	LA VENTILLA	IG-075	POZO	-100.376	21.990	28	8.15	608	14	234	629	435	329	60.9	149	5.9	16	5.08	0	401.4	11.6	21	0.9	0.34	7.847	7.426	0.421	15.273	2.759
50	PUENTE PRIETO	IG-101	POZO	-100.487	22.024	31.2	8.21	1848	17	1816	789	1290	206.5	836.5	39	5.7	255	48.4	0	251.9	10.9	725	1.5	2.19	18.571	19.764	-1.192	38.335	-3.110
51	SEMINARIO	IG-057	POZO	-100.412	22.036	23.9	8.82	487	28	244	279	200	110	103.0	25	7.7	35	3.76	0	134.2	6.8	17	3.9	0.39	3.343	3.045	0.298	6.388	4.663
52	GASOLINERA	IG-056	POZO	-100.417	22.025	26.7	7.3	326	18	339	319	235	115	90.0	24	8.5	25.6	6.32	0	140.3	8.2	17	5.9	0.4	3.060	3.327	-0.266	6.387	-4.171
53	ATOTONILCO	IG-103	POZO	-100.368	22.133	31.3	8.08	312	40	327	333	265	140	92.5	38	5.5	33.8	1.94	0	170.8	8.2	16	6.6	0.51	3.643	3.862	-0.219	7.505	-2.914
54	ARMADILLO DE	IG-054	POZO	-100.654	22.249	18.6	7.94	566	10	275	602	420	268.8	242.8	34	7.54	82.8	8.7	11	305.0	15.3	33	4.3	0.35	6.527	6.821	-0.294	13.348	-2.205
55	ARMADILLO (M	IG-111	MANAN	-100.651	22.233	23.2	8.27	548	12	340	570	400	300.5	239.2	35	9.1	59	22.3	0	366.6	12.1	2	4.2	0.4	6.539	6.713	-0.174	13.252	-1.311
56	SAN MIGUEL	IG-052	NORIA	-100.487	22.024	16.3	7.88	638	6	322	710	515	319.5	284.3	33	4.1	80	20.5	0	389.8	10.7	10	1.1	0.77	7.226	7.019	0.207	14.245	1.450
57	ARROYO HOND	IG-106	NORIA	-100.616	22.268	16.3	7.77	567	7	316	600	408	272.5	258.6	28	5.89	90.1	8.1	0	332.5	12.2	31	2.8	0.32	6.539	6.658	-0.118	13.197	-0.897
64	PASO DEL AGUIL	IG-005	MANAN	-100.589	22.274	22.7	8	540	20	344	629	435	257	248.3	49	10	84	9.3	0	313.5	35.1	44	4	0.59	7.351	7.364	-0.013	14.716	-0.090
65	BARRANCAS	IG-022	NORIA	-100.551	22.216	20.3	7.63	551	7	299	609	415	270	233.5	27	5	72	13	0	329.4	10.7	36	0.8	0.38	5.971	6.528	-0.557	12.499	-4.456
66	SAN NICOLAS TO	IG-008	NORIA	-100.553	22.254	20	8.1	671	10	334	706	480	247.5	210.4	77	25	70	8.6	0	302.0	21.4	53	9.8	1.43	8.195	7.432	0.762	15.627	4.878
67	LOS MORENO	IG-004	NORIA	-100.517	22.206	22.3	8.23	550	12	325	584	400	218.5	205.3	54	8	66	9.8	0	266.6	18.3	49	0.7	0.76	6.659	5.998	0.661	12.656	5.221
68	OJO DE AGUA	IG-010	NORIA	-100.499	22.192	26.1	7.89	563	6	307	575	400	266.5	244.5	45	7	82	9.6	0	325.1	13.8	38	1.9	0.54	7.025	6.674	0.351	13.699	2.566
69	JAGUEY	IG-012	POZO	-100.454	22.227	20.5	7.86	808	14	320	854	600	240	300.6	53	7	88	19.6	0	292.8	29.0	28	27.3	0.42	8.496	8.171	0.325	16.667	1.949
70	LOS NOGALES	IG-013	NORIA	-100.433	22.158	22.1	8.7	810	7	327	849	600	300	335.8	42	5	83	31.2	0	366.0	15.3	61	7.5	0.68	8.671	8.273	0.397	16.944	2.345
71	GOLONDRINAS	IG-019	NORIA	-100.394	22.326	21	7.8	455	3	292	452	320	205	164.6	38	7	52	8.4	0	250.1	10.7	29	1	0.44	5.122	5.100	0.022	10.222	0.220
72	ALLENDE	IG-037	NORIA	-100.386	22.148	24.5	8.05	551	24	330	578	400	257	229.4	47	8	59	19.9	0	313.5	10.7	30	4.6	0.8	6.835	6.437	0.398	13.272	3.002
73	EL PARAISO	IG-093	NORIA	-100.343	22.105	23.9	7.43	449	2	264	473	335	190	148.2	36	6	41	11.1	0	231.8	9.1	29	2.4	0.44	4.682	4.857	-0.175	9.539	-1.834
74	EL SAUCILLO	IG-097	POZO	-100.330	22.084	33.9	7.75	675	3	293	689	490	218.5	297.9	39	5	56	38.4	0	266.6	9.1	115	2.2	0.76	7.782	7.211	0.572	14.993	3.814
75	EL SERMON	IG-098	POZO	-100.313	22.079	24.1	8.23	458	11	340	491	345	228	186.1	38	6	56	11.2	0	278.2	7.6	30	5.4	0.43	5.527	5.808	-0.281	11.335	-2.482
76	MOJARRAS DE A	IG-095	POZO	-100.271	22.161	22.8	7.7	584	2	335	556	390	190	211.9	38	4	65	12	0	231.8	9.6	32	8.2	0.28	5.992	5.337	0.655	11.329	5.778
77	OJO DE AGUA DE	IG-108	POZO	-100.400	22.050	24.1	7.66	377	2	357	397	280	195.5	160.5	43	6	28	22	0	238.5	7.4	14	6.7	0.38	5.233	4.910	0.323	10.143	3.180
78	RANCHO NUEVO	IG-109	POZO	-100.419	22.060	24	8.85	309	7	293	334	230	147.5	126.3	41	6	39	7	0	180.0	8.2	17	6.7	0.03	4.462	4.014	0.448	8.476	5.280
79	SANTA CATARIN	IG-065	POZO	-100.443	22.052	24.5	7.31	531	7	275	553	390	211	211.7	40	5	60	15	0	257.4	7.4	67	3.6	0.03	6.101	6.085	0.016	12.186	0.135
80	ATOTONILCO	IG-200	NORIA	-100.44	21.993	19	6.8	637			685	343	292	324.5	27	8.48	96	20.6	0	356.5	25	22	5.5		7.897	7.371	0.526	15.268	3.445
81	ATOTONILCO	IG-205	POZO	-100.42	22.021	25	7.2	489			551	386	200	259.5	17	3.48	75.1	17.6	0	244	12.5	60	5.8		6.012	6.014	-0.002	12.027	-0.017
82	ATOTONILCO	IG-208	POZO	-100.42	22.025	24	6.9	310			343	240	127	125.9	17	4.23	36.2	8.6	0	154.9	7.81	14	7.7		3.356	3.592	-0.236	6.948	-3.391
84	SAUCE	IG-210	POZO	-100.36	21.926	14	6.5	232			304	210	131.9	135.2	8.8	2.65	48	3.7	0	160.6	7.81	18	1		3.155	3.296	-0.142	6.451	-2.196
85	SANTA CATARIN	IG-211	POZO	-100.47	22.061	21	6.5	311			347	240	171.9	162.9	5.5	2.33	54.8	6.3	0	209.7	9.37	8	0.9		3.558	3.928	-0.370	7.486	-4.938
86	PASO DE SAN AN	IG-212	POZO	-100.38	22.016	26	6.8	405			433	303	184.2	207.6	15	3.46	72	6.7	0	224.7	9.37	20	6.2		4.890	4.807	0.083	9.696	0.857
87	PASO DE SAN AN	IG-213	POZO	-100.37	22.011	23	6.9	398			433	303	186.1	209.6	8.1	3.46	72.9	6.7	0	227	7.81	20	6.2		4.635	4.803	-0.168	9.437	-1.779
88	SANTA CATARIN	IG-214	POZO	-100.43	22.046	27	6.5	330			382	267	147.6	146	21	4.71	46.6	7.2	0	180	7.81	22	5.3		3.950	4.010	-0.060	7.960	-0.756

III.4.- Calidad del agua

Considerando los parámetros químicos integrados en la NOM-127-SSAI-1994 de los resultados de las muestras colectadas Tabla 3.4.

Una vez obtenidos los resultados de los análisis químicos por parte del laboratorio se agruparon muestras de agua con similares características físicas y químicas para determinar el funcionamiento del flujo de agua subterránea. Para delimitar grupos o familias de agua, con la ayuda del programa *AQUACHEM 4.0*, se realizaron las gráficas de clasificación química correspondientes diagramas modificados de *Stiff (1951)*, *Piper (1944)*, expandidos de Durov según Custodio, (1976), diagramas X-Y; esto permitió dar una primera idea en cuanto a las familias de aguas existentes, basados en la variación de la composición química. Posteriormente, los grupos de agua definidos se correlacionaron con la geología del subsuelo, y con manifestaciones superficiales de agua (arroyos y manantiales). Esto permitió una mejor visión de como interactúan los diferentes sistemas de flujo.

En base a la composición química de las muestras de agua subterránea se identificaron 5 familias principales; estas son: Bicarbonatada-Cálcica, Bicarbonatada-Sódica, Bicarbonatada-Magnesica, Bicarbonatada-Mixta y Sulfatada-Cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}$, $\text{HCO}_3\text{-Mg}$, $\text{HCO}_3\text{-Mixta}$, y $\text{SO}_4\text{-Ca}$) ver Tabla 9.

La ubicación de las obras muestreadas y la clasificación de las familias de agua por su ubicación en los diagramas modificados de *Piper y Durov*, Custodio, (1976) se presentan además en la (Figura 16) la configuración espacial. En términos generales solo la familia Bicarbonatada-Cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) puede considerarse como principal, ya que abarca el 62% del total de todos los aprovechamientos muestreados dentro del acuífero; y en un número menor, pero también importante, aparecen las de tipo Bicarbonatada-Mixta ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$, Na, Mg). El predominio del ion Ca^+ en estas muestras sugiere un recorrido del agua subterránea a través de rocas calcáreas (Figura 17). Solo la muestra IG-101 de un pozo perteneciente a la localidad de Puente Prieto resultó anómala, presenta concentraciones elevadas de sólidos totales disueltos, dentro de los que predominan los sulfatos (SO_4) con (725 mg/L), fluoruro en cantidades mayores a los límites permisibles (2.19 mg/L), bicarbonatos (HCO_3). Su temperatura y conductividad

eléctrica resultan contrastantes respecto de los otros pozos muestreados (temperatura de 31.2°C y conductividad eléctrica de 1848 $\mu\text{mho/cm}$) y con más contenidos de sales (1290 mg/L de STD). La profundidad a la que se cortó la roca acuífera (más de 300 m) sugiere que el agua subterránea es de un acuífero confinado, en el cual las aguas subterráneas tuvieron un recorrido más largo. La roca acuífera es la Formación El Abra de edad Cretácica, y la capa sello es de rocas andesíticas.

Además de ésta muestra no existe ninguna otra con irregularidades por lo que en términos generales en todos los casos el agua subterránea puede clasificarse de buena calidad.

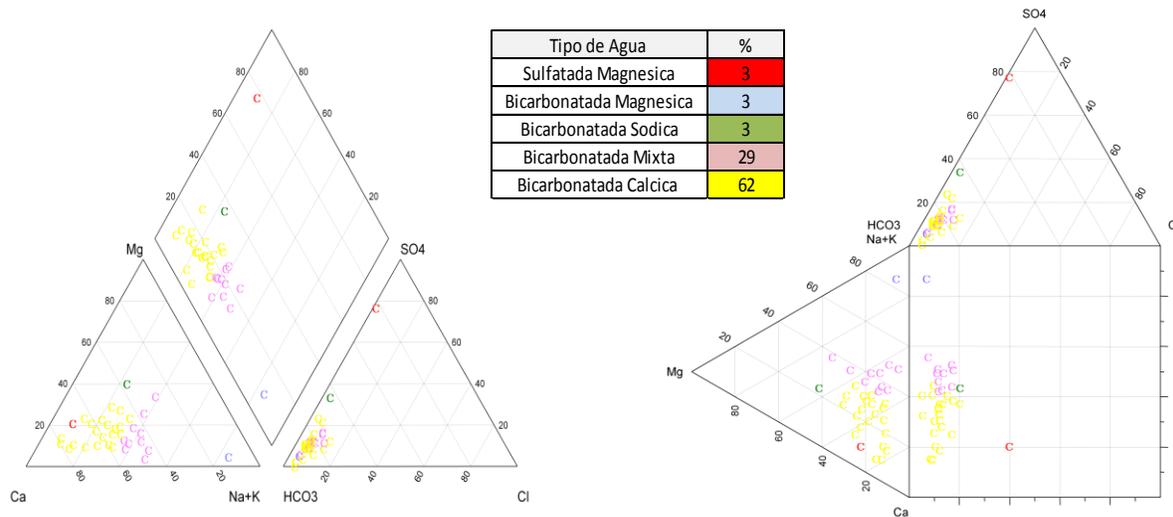


Figura 16- Clasificación del agua por medio de los diagramas modificados de *Piper* y *Durov* según Custodio, (1976) que muestra los parámetros químicos predominantes

Tabla 9- Clasificación de familias de agua mostradas en porcentaje.

MTRA	APROV	X	Y	FAM. QUIM
IG-079	POZO	-100.408	22.987	Na-Ca-Mg-HCO3
IG-057	POZO	-100.412	22.036	Ca-Na-HCO3
IG-056	POZO	-100.417	22.025	Ca-Na-HCO3
IG-103	POZO	-100.368	22.133	Ca-Na-HCO3
IG-008	NORIA	-100.553	22.254	Ca-Na-HCO3
IG-004	NORIA	-100.517	22.206	Ca-Na-HCO3
IG-019	NORIA	-100.394	22.326	Ca-Na-HCO3
IG-093	NORIA	-100.343	22.105	Ca-Na-HCO3
IG-108	POZO	-100.400	22.050	Na-Mg-Ca-HCO3
IG-109	POZO	-100.419	22.060	Ca-Na-HCO3
IG-075	POZO	-100.376	21.990	Na-HCO3
IG-101	POZO	-100.487	22.024	Ca-Mg-SO4-HCO3
IG-097	POZO	-100.330	22.084	Mg-Ca-Na-HCO3-SO4
IG-054	POZO	-100.654	22.249	Ca-Na-HCO3
IG-111	MANAN	-100.651	22.233	Ca-Mg-Na-HCO3
IG-052	NORIA	-100.487	22.024	Ca-Mg-Na-HCO3
IG-106	NORIA	-100.616	22.268	Ca-HCO3
IG-005	MANAN	-100.589	22.274	Ca-Na-HCO3
IG-022	NORIA	-100.551	22.216	Ca-HCO3
IG-010	NORIA	-100.499	22.192	Ca-Na-HCO3
IG-012	POZO	-100.454	22.227	Ca-Na-HCO3
IG-013	NORIA	-100.433	22.158	Ca-Mg-Na-HCO3
G-037	NORIA	-100.386	22.148	Ca-Na-Mg-HCO3
IG-098	POZO	-100.313	22.079	Ca-Na-HCO3
IG-095	POZO	-100.271	22.161	Ca-Na-HCO3
IG-065	POZO	-100.443	22.052	Ca-Na-Mg-HCO3-SO4
IG-200	NORIA	-100.443	21.993	Ca-Mg-HCO3
IG-205	POZO	-100.422	22.021	Ca-Mg-HCO3-SO4
IG-208	POZO	-100.418	22.025	Ca-Na-Mg-HCO3
IG-210	POZO	-100.356	21.926	Ca-HCO3
IG-211	POZO	-100.473	22.061	Ca-HCO3
IG-212	POZO	-100.378	22.016	Ca-HCO3
IG-213	POZO	-100.369	22.011	Ca-HCO3
IG-214	POZO	-100.429	22.046	Ca-Na-HCO3

Tipo de Agua	%
Sulfatada Magnesica	3
Bicarbonatada Magnesica	3
Bicarbonatada Sodica	3
Bicarbonatada Mixta	29
Bicarbonatada Calcica	62

III.5.- Clasificación del agua por cuencas

a).-Área I, San Nicolás Tolentino: De los 34 aprovechamientos muestreados 10 corresponden a la zona de San Nicolás. La familia predominante es la Bicarbonatada-Cálcica con un 80% y un 20% Bicarbonatada-Mixta Tabla 10. La distribución del agua Bicarbonatada-Calcica se manifiesta casi en toda el área de la subcuenca comenzando por Jagüey, Barrancas, San Miguel, Armadillo de los Infante, Arroyo Hondo, Paso del Águila, Ojo de Agua y el manantial en Armadillo de los Infante. En el nororiente de la subcuenca se presenta la familia Bicarbonatada-Mixta donde los aprovechamientos muestreados son dos manantiales San Nicolás y Los Moreno, se puede considerar una zona de recarga local ya que se encuentra en las partes más altas de la región de 1333 a 1437 msnm y con temperaturas de 20°C y los STD son mínimos, con temperaturas bajas.

Tabla 10 Clasificación de las familias de agua en el (Área I)

San Nicolas Tolentino	%
Bicarbonatada Mixta	20
Bicarbonatada Calcica	80

b).- Área II, Ocampo Paraíso: Se muestrearon 8 aprovechamientos y la familia predominante (con un 50%) es la bicarbonatada-cálcica, Bicarbonatada-Mixta representa un 37.5 y un 12.5% corresponde a Bicarbonatada-Magnésica Tabla 11. La familia de agua Bicarbonatada-Calcica se localiza en el valle, desde la localidad de Agua Fría hasta Mojarras de Arriba. En la zona norponiente, en aprovechamientos más cercanos a la Sierra, el agua corresponde a la familia Bicarbonatada-Mixta. El pozo IG-097 de la localidad El Saucillo (el cual ya se encuentra en elevaciones dentro de la serranía) es el único que presenta una calidad Bicarbonatada-Magnesica.

Tabla 11 Clasificación de las familias de agua en el (Área II)

Ocampo Paraiso	%
Bicarbonatada Magnesica	12.5
Bicarbonatada Mixta	37.5
Bicarbonatada Calcica	50

c).- *Área III, Santa Catarina:* En esta zona las familias de agua que se registran de acuerdo a la interpretación de los diagramas son cuatro Tabla 12; la familia predominante es la Bicarbonatada-Cálcica, la cual está distribuida en todo el valle. Hacia la Sierra de Trejo (surponiente de la cuenca) el agua es Bicarbonatada-Mixta y hacia Cañada Grande en la localidad de Puente Prieto, el agua es Sulfatada-Cálcica. Solo en el pozo de agua potable La Ventilla se manifiesta una calidad de agua Bicarbonatada-Sódica.

Tabla 12 Clasificación de las familias de agua en el (Área III)

Santa Catarina	%
Sulfatada Calcica	6.25
Bicarbonatada Sódica	6.25
Bicarbonatada Mixta	31.25
Bicarbonatada Calcica	56.25

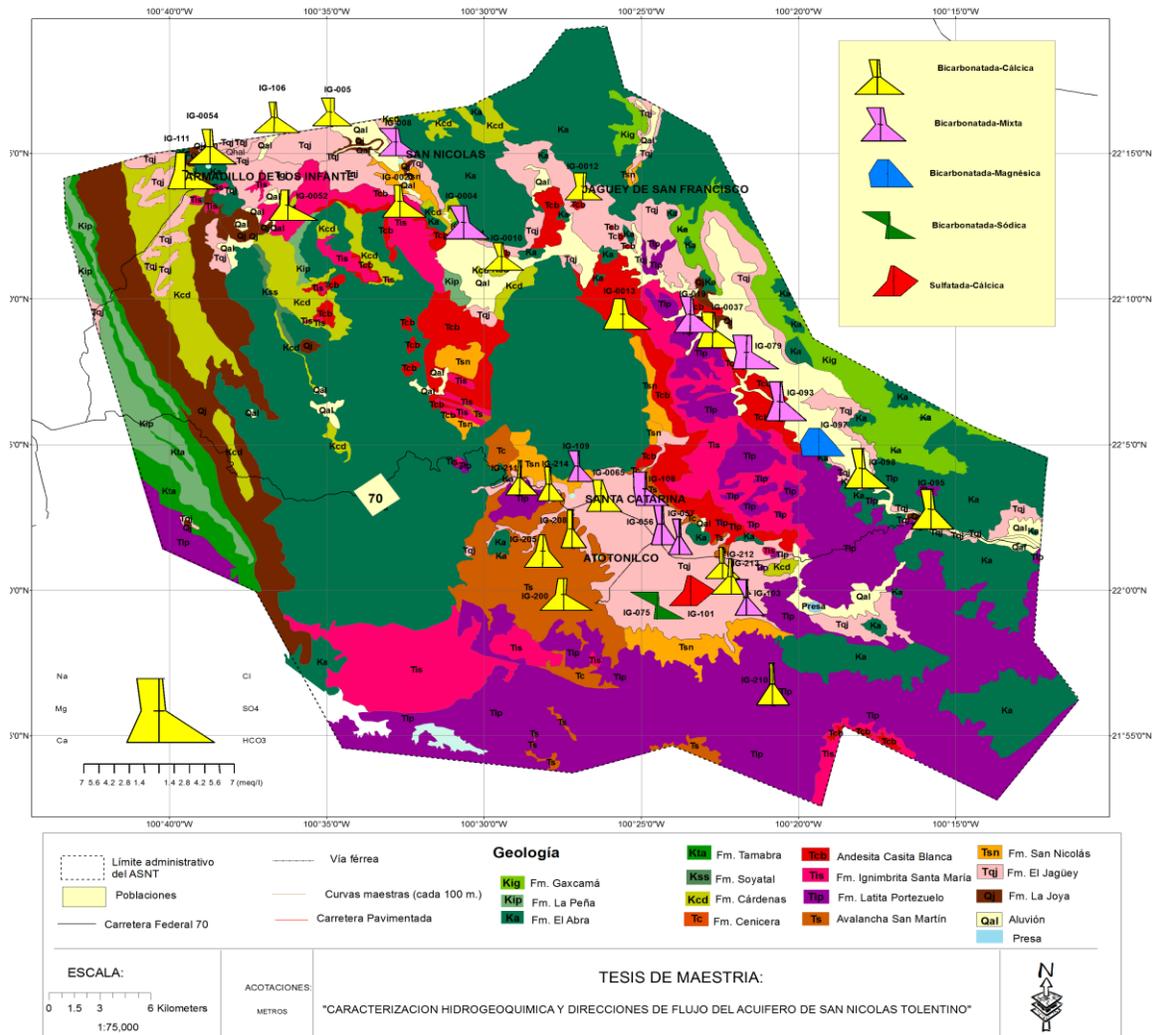


Figura 17- Distribución geográfica de las diferentes familias químicas de agua, y la interacción del agua subterránea con la litología

Interpretación

Se pueden resaltar varios aspectos en el diagrama de *Piper* de la Figura 16, el primero, que es muy clara la diferencia de la muestra IG-101 con las demás muestras las cuáles se pueden relacionar además con un recorrido a través de rocas volcánicas ($\text{HCO}_3\text{-Mg}$) y/o sedimentarias derivadas de ellas junto con carbonatos ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) y perteneciente a flujos de tipo local, formándose en ocasiones una mezcla de ambos tipos ($\text{HCO}_3\text{-Mixta}$). En general, todas las muestras contienen bajas concentraciones de Cl 7-35 mg/L, y Na menor a 150 mg/L, mientras que la muestra IG-101 ($\text{SO}_4\text{-Ca}$) muestra una concentración alta de sulfatos 725 mg/L lo que sugiere que ha estado en contacto con rocas con contenido de sulfatos además de carbonatos, y en su recorrido ha tenido tiempo de interactuar con yesos, éste tipo de flujo representa desde el punto de vista de evolución geoquímica una etapa más avanzada que el agua subterránea del flujo local. La Figura 17 muestra de una manera espacial la distribución de los diagramas de *Stiff en el ASNT*.

III.6.- Grupos presentes

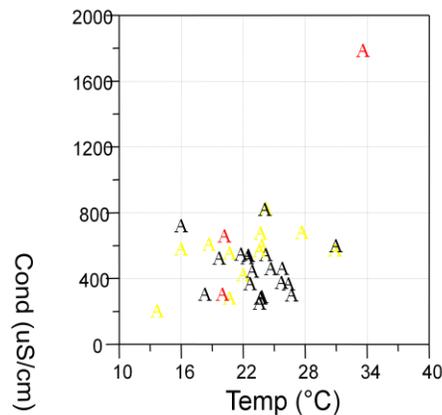
Los cationes que generalmente se tienen presentes son el magnesio, calcio, sodio y potasio. Por su parte, los aniones que se utilizan para el cálculo son el bicarbonato, nitrato, cloruro y sulfato, el porcentaje de error se determina usando unidades de meq/l, y su resultado debe ser menor a 5% para considerar los datos confiables; no obstante, diversos investigadores consideran aceptable un error de hasta el 10%. Otros parámetros que se toman en consideración son los que se mencionan en el Capítulo 2 en el subcapítulo "Introducción a los sistemas de flujo" que entre otros son: temperatura, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica etc. De esta forma la definición de grupos se basó en el análisis de la Figura 18 y Tabla 13, obtenidas por medio del programa *AQUACHEM 4.0*.

Con base en la composición química se diferenciaron tres grupos Tabla 13 estos son:

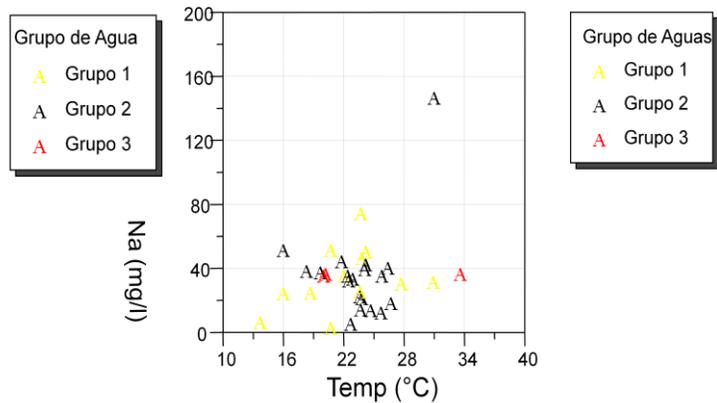
Tabla 13.- Clasificación de grupos de agua subterránea

Localidad	Area	Muestra	X m	Y m	Tipos de Agua	pH	C.E. uS/cm	Temp °C	STD mg/l	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	F mg/l	Cl mg/l	HCO3 mg/l	CO3 mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l
					rHCO ₃ >rCa+rMg														
JAGUEY	1	IG-012	-100.454	22.22722	Ca-Na-Mg-HCO3	7.08	854	20.5	600	53	7	88	19.6	0.42	29.04	292.8	0	27.25	28
GOLONDR	2	IG-019	-100.394	22.32594	Ca-Na-HCO3	7.03	452	21	320	38	7	52	8.4	0.44	10.67	250.1	11.4	1	29
BARRANC	1	IG-022	-100.551	22.21583	Ca-HCO3	7.09	609	20.3	415	27	5	72	13	0.38	10.67	329.4	0	0.8	36
SAN MIGU	1	IG-052	-100.609	22.21833	Ca-Mg-Na-HCO3	7.1	710	16.6	515	33	4.1	80	20.5	0.77	10.71	389.79	0	1.1	10
ARMADILL	1	IG-054	-100.654	22.24861	Ca-Na-HCO3	7.12	602	18.6	420	34	7.54	82.8	8.7	0.35	15.32	305	11.28	4.3	33
ARROYO H	1	IG-106	-100.616	22.26767	Ca-HCO3	7.1	600	17	408	28	5.89	90.1	8.1	0.32	12.23	332.45	0	2.8	31
SAN NICO	1	IG-008	-100.553	22.25455	Ca-Na-HCO3	7.1	706	20.6	480	77	25	70	8.6	1.43	21.38	301.95	0	9.8	53
LOS MORE	1	IG-004	-100.517	22.20611	Ca-Na-HCO3	7.25	584	22.3	400	54	8	66	9.8	0.76	18.33	266.57	11.4	0.7	49
PASO DEL	1	IG-005	-100.589	22.27389	Ca-Na-HCO3	7.23	629	22.4	435	49	10	84	9.3	0.59	35.13	313.54	0	4	44
TOTONILC	3	IG-200	-100.443	21.99264	Ca-Mg-HCO3	6.8	637	19	343	27.3	8.48	96	20.6	25	25	356.52	0	5.5	22
TA CATAR	3	IG-211	-100.473	22.06131	Ca-HCO3	6.5	311	21	240	5.53	2.33	54.8	6.3	9.37	9.37	209.71	0	0.9	8
SAUCE	3	IG-210	-100.356	21.92639	Ca-HCO3	6.5	232	14	210	8.8	2.65	48	3.7	7.81	7.81	160.64	0	1	18
					rHCO ₃ <rCa+rMg<rHCO ₃ +rSO ₄														
OJO DE AC	1	IG-010	-100.499	22.19167	Ca-Na-HCO3	7.12	575	26.1	400	45	7	82	9.6	0.54	13.76	325.13	22.8	1.9	38
LOS NOGA	2	IG-013	-100.433	22.15806	Ca-Mg-Na-HCO3	7.15	849	22.1	600	42	5	83	31.2	0.68	15.28	366	0	7.5	61
ALLENDE	2	IG-037	-100.386	22.14778	Ca-Na-Mg-HCO3	7.17	578	24.7	400	47	8	59	19.9	0.8	10.67	313.54	11.4	4.6	30
SEMINARI	3	IG-057	-100.487	22.02389	Ca-Na-HCO3	7.1	279	23.9	200	25	7.7	35	3.76	0.39	6.81	134.2	0	3.9	17
SANTA CA	2	IG-065	-100.443	22.05194	Ca-Na-Mg-HCO3	7.11	553	24.5	390	40	5	60	15	0.03	7.45	257.42	0	3.6	67
MOJARRA	2	IG-095	-100.271	22.16083	Ca-Na-HCO3	7.04	556	22.8	390	38	4	65	12	0.28	9.57	231.8	0	8.2	32
EL SERMO	2	IG-098	-100.313	22.07883	Ca-Na-HCO3	7.28	491	24.1	345	38	6	56	11.2	0.43	7.62	278.16	0	5.4	30
ARMADILL	1	IG-111	-100.651	22.23322	Ca-Mg-Na-HCO3	7.16	570	23.2	400	35	9.1	59	22.3	0.4	12.05	366.61	0	4.2	2
LA VENTI	3	IG-075	-100.408	22.98694	Na-HCO3	7.26	629	28	435	149	5.9	16	5.08	0.34	11.56	401.38	0	0.9	21
GASOLINE	3	IG-056	-100.412	22.03555	Ca-Na-HCO3	7.02	319	26.7	235	24	8.5	25.6	6.32	0.4	8.15	140.3	0	5.9	17
OCAMPO	2	IG-079	-100.368	22.13278	Na-Ca-Mg-HCO3	7.73	749	24.6	524	54	5	47	21	0.41	29.78	328.18	0	2.9	42
EL PARAIS	2	IG-093	-100.343	22.10528	Ca-Na-HCO3	7.25	473	23.9	335	36	6	41	11.1	0.44	9.15	231.8	11.4	2.4	29
OJO DE AC	3	IG-108	-100.406	22.04619	Na-Mg-Ca-HCO3	7.26	397	24.3	280	43	6	28	22	0.38	7.45	238.51	0	6.7	14
RANCHO F	3	IG-109	-100.419	22.0595	Ca-Na-HCO3	7.2	334	24.3	230	41	6	39	7	0.03	8.15	179.95	0	6.7	17
TOTONILC	3	IG-205	-100.422	22.02079	Ca-Mg-HCO3-SO4	7.2	489	25	386	16.6	3.48	75.1	17.6	12.5	12.5	244	0	5.8	60
TOTONILC	3	IG-208	-100.418	22.02529	Ca-Na-Mg-HCO3	6.9	310	24	240	16.8	4.23	36.2	8.6	7.81	7.81	154.87	0	7.7	14
DE SAN AN	3	IG-212	-100.378	22.0161	Ca-HCO3	6.8	405	26	303	15	3.46	72	6.7	9.37	9.37	224.72	0	6.2	20
DE SAN AN	3	IG-213	-100.369	22.01119	Ca-HCO3	6.9	398	23	303	8.05	3.46	72.9	6.7	7.81	7.81	226.98	0	6.2	20
TA CATAR	3	IG-214	-100.429	22.04614	Ca-Na-HCO3	6.5	330	27	267	20.9	4.71	46.6	7.2	7.81	7.81	180.03	0	5.3	22
					rHCO ₃ +rSO ₄ <rCa+rMg														
EL SAULIC	2	IG-097	-100.33	22.08361	Mg-Ca-Na-HCO3	7.18	689	33.9	490	39	5	56	38.4	0.76	9.15	266.57	11.4	2.2	114.5
ATOTONI	3	IG-104	-100.36	21.99583	Ca-Na-HCO3	7.22	333	31.3	265	38	5.5	33.8	1.94	0.51	8.15	170.8	0	6.6	16
PUNTE P	3	IG-101	-100.376	21.99025	Ca-Mg-SO4-HCO3	7.07	1816	32.3	1290	39	5.7	255	48.38	2.19	10.88	251.93	0	1.5	725

San Nicolas



San Nicolas



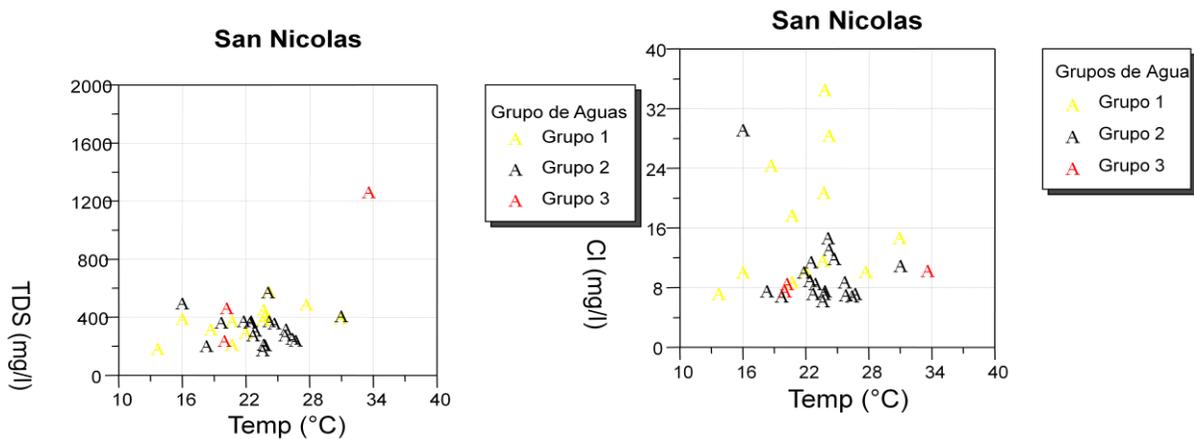


Figura 18.- a) Relación Temperatura (°C)-C.E (µs/cm), b) Temperatura (°C) –Na (mg/l), c) Temperatura (°C)-STD (mg/l) y d) Temperatura (°C)-Cl (mg/l)

Grupo 1 Flujo local

A este grupo pertenece el 35.3% de las muestras recolectadas, topográficamente se localizan en partes bajas del terreno o de la cuenca, en su mayoría se extraen por medio de norias por lo que el flujo es relativamente somero, con temperaturas que van de los 17 a los 21°C aproximadamente, y concentraciones de sodio y cloruro de los 28-77 mg/l y 10-29 mg/l respectivamente en formación calcárea.

Grupo 2 Flujo mezcla o mixto (local-intermedio)

Este grupo representa el 55.9% de las muestras colectadas; estas muestras se localizan en las partes medias y bajas de la cuenca, descargando como manantiales en algunas ocasiones, producto de la descarga intermedia y local, o siendo captadas a través de pozos. En este grupo el agua tiene una temperatura de 22–28 °C, bajas concentraciones de Cl (9-35 mg/L), Na (24-54 mg/L) y SO₄ (30– 67 mg/L), y salinidad regular (200-600 mg/L de STD).

Grupo 3 Flujo regional

Se considera que los pozos que captan aguas de un sistema de flujo regional representan un 8.8% de las obras muestreadas. Esta es extraída por medio de pozos

profundos (por lo que algunas veces se obtiene una mezcla de familias de agua). El agua captada en estos pozos tiene una temperatura de 31.3–33.9 °C, con un contenido de sólidos totales disueltos de 1290 mg/l y elevada concentración de SO₄ 725 mg/L.

Por último los resultados obtenidos se correlacionan con la geología de la región, lo que conoce del subsuelo y de los sistemas superficiales de flujo de agua (topografía, corrientes intermitentes y perenes, y presencia de manantiales). Todos estos parámetros fueron digitalizados con el programa ArcGis 9.3 para asociar los diferentes sistemas de flujo superficial y los sistemas de flujo subterráneo (Figura 19).

En el diagrama de Schoeller (1962) Figura 20 se puede apreciar la diferencia de concentraciones de los parámetros analizados en éste estudio y las diferencias entre los grupos definidos.

En general las aguas muestreadas son de tres tipos, ($rHCO_3 > rCa + rMg$) grupo 1 en un 35%, ($rHCO_3 < rCa + rMg < rHCO_3 + rSO_4$) grupo 2 en un 26% y ($rHCO_3 + rSO_4 < rCa + rMg$) grupo 3 en un 9%. Desde el punto de vista de los aniones, respecto a los cationes predomina el calcio y después el sodio.

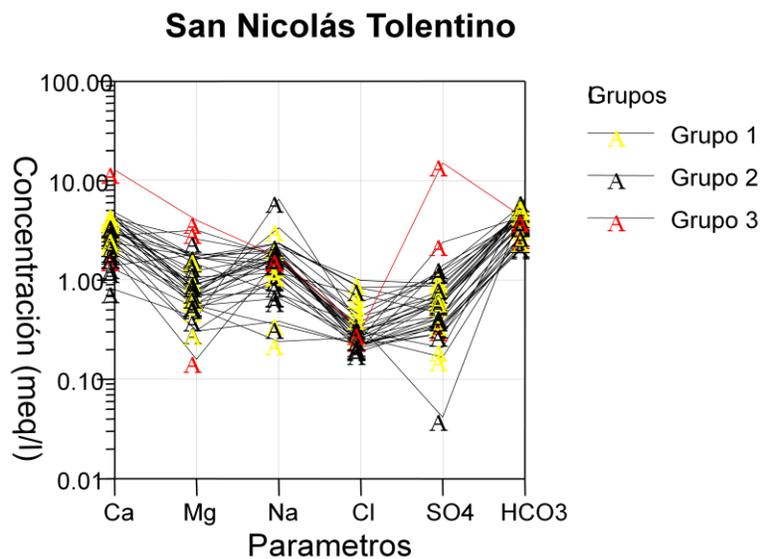


Figura 20.- Diagrama de Schoeller, (1962)

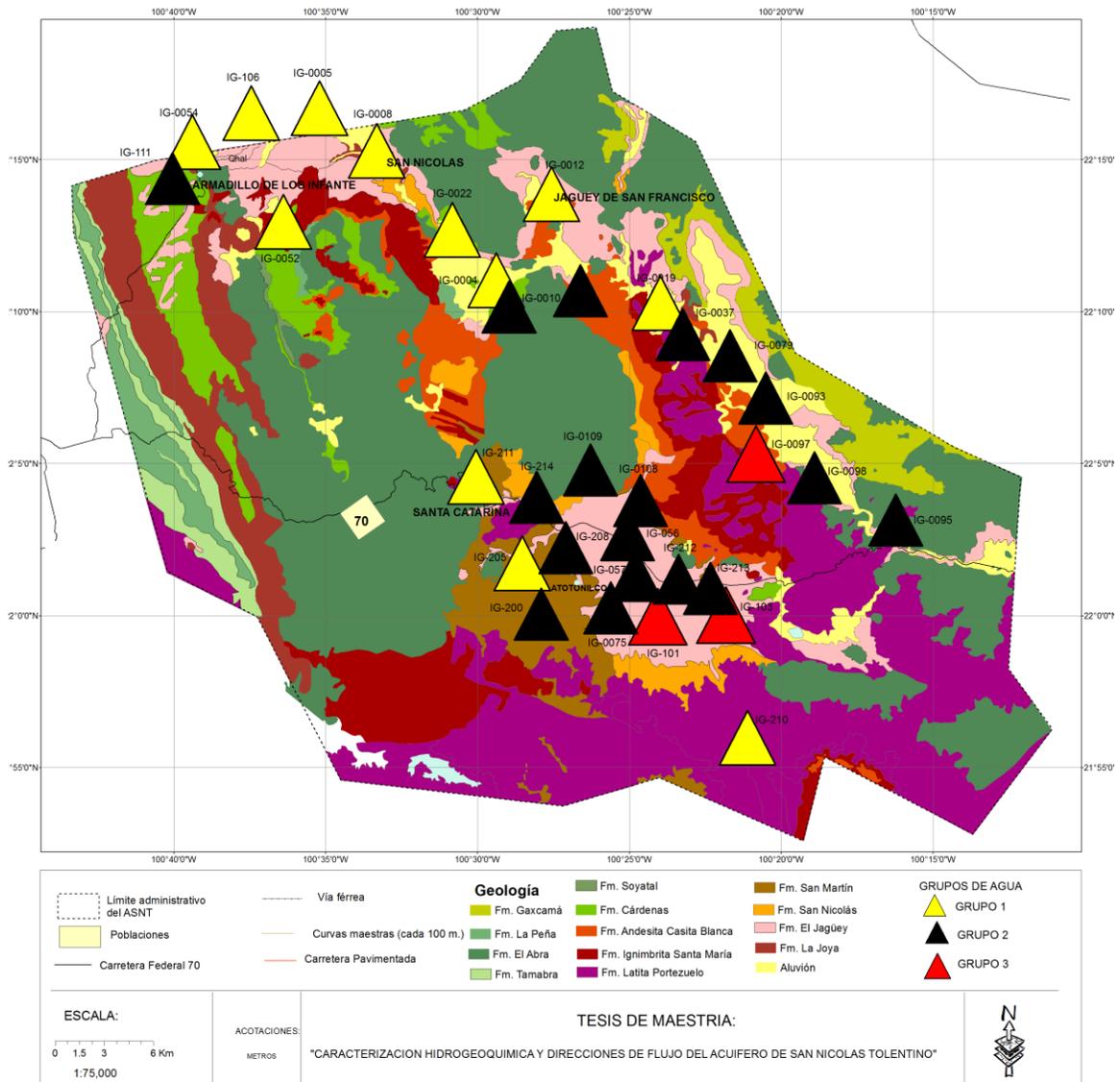


Figura 19- Ubicación geográfica de los diferentes grupos de agua

En la Figura 21 se observa una relación entre el fluoruro y temperatura, pero solo una muestra rebasa los límites permisibles para consumo humano con 2.1 mg/L. El límite óptimo para consumo humano es de 1.5 mg/L.

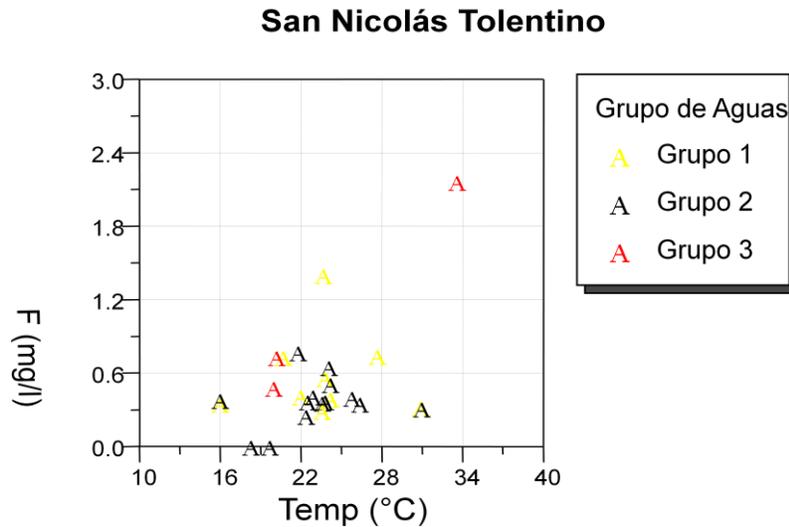


Figura 21- Relación Temperatura (°C) Vs Fluoruro (mg/l)

III.7.- Clasificación de agua para riego

La calidad del agua es de gran importancia para los habitantes de cualquier región, y esta determina los diferentes tipos de uso que a esta se pueda dar. En el presente estudio se estimó que en el ASNT, actualmente, de los 118 aprovechamientos se utiliza: el 38% para uso público – urbano; el 53% para uso agrícola; el 1.7% para uso domestico y el 0.8% para uso pecuario. Casi la mitad de los aprovechamientos censados son de tipo agrícola, por lo cual es importante conocer la calidad del agua subterránea para fines de riego dado el impacto económico que representa. La clasificación del agua para riego se hizo mediante el diagrama de Wilcox (1967)

Figura 22, en base al cálculo de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y la CE medida en campo.

Se realizaron los cálculos necesarios para estimar el RAS, el cual se expresa como la relación entre los iones de Na^+ con los iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} en miliequivalentes por litro (meq/L) existentes en el suelo, con el fin de estimar el impacto de salinización del suelo. Esto se hace mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{meq/L Na}^+}{\text{meq/L Ca}^{2+} + \text{meq/L Mg}^{2+}}$$

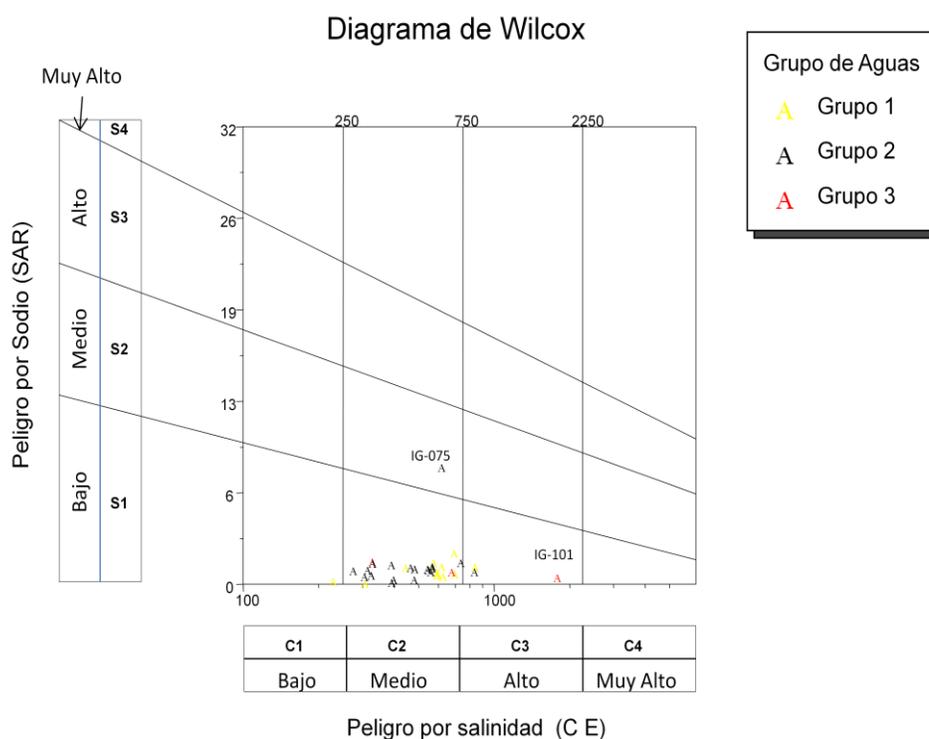


Figura 22- Diagrama de Wilcox, (1967) clasificación de agua para riego.

El Ca^{2+} y Mg^{2+} son cationes que forman parte de los complejos estructurales del suelo y ayudan a generar una estructura granular apropiada para los cultivos. La presencia de sodio intercambiable en el suelo desplaza el Ca^{2+} y Mg^{2+} y provoca la dispersión del suelo, lo cual causa que el suelo se vuelva duro y compacto en condiciones secas y reduce la infiltración de agua y aire a través de los poros que lo conforman. Con la finalidad de predecir la susceptibilidad del cultivo a disminuir su desarrollo debido al incremento de la salinidad, se identificaron las clases:

Clase C1-S1 (1 aprovechamiento IG-004)

Para esta clase hay baja salinidad, y el agua puede utilizarse para la mayoría de los cultivos y en todos los tipos de suelos, sin posibilidad de alcanzar concentraciones altas de Na.

Clase C2-S1 (29 aprovechamientos)

Corresponde a aguas con una salinidad media. La mayoría de las muestras se encuentran en esta clase (IG-005,IG-008,IG-010,IG-019,IG-022,IG-037, IG-052, IG-054, IG-056, IG-057, IG-065, IG-075, IG-093, IG-095, IG-097, IG-098, IG-103, IG-106, IG-108, IG-109, IG-111, IG-200, IG-205, IG-208, IG-210, IG-211, IG-212, IG-213, IG-214). Este tipo de aguas es bajo en Na y puede utilizarse con un grado moderado de lavado; en la mayoría de los casos se puede cultivar plantas moderadamente tolerantes a sales.

Clase C2-S2 (1 aprovechamiento IG-075).

Esta clase de agua de salinidad media y contenido medio en Na, puede utilizarse para riego en suelos orgánicos o textura gruesa con buena permeabilidad.

Clase C3-S1 (4 aprovechamientos IG-013, IG-012, IG-079, IG-101).

El agua que corresponde a esta clase es agua altamente salina, no puede utilizarse en suelos con drenaje insuficiente y con salinidad media del suelo aunque cuente con drenaje adecuado y sea baja en Na Figura 25. Variables para clasificación de agua ver Tabla 14.

Tabla 14- Variables para la clasificación del agua para riego en base a su salinidad y riesgo por adsorción de sodio.

C1 ----- Agua de baja salinidad. Puede utilizarse para la mayoría de los cultivos en casi todos tipos de suelos con muy poco riesgo de que se desarrolle salinidad. Es preciso algún lavado, que se logra normalmente con el riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad
C2 ----- Agua de salinidad media. Puede utilizarse con un grado moderado de lavado. Sin excesivo control de la salinidad se puede cultivar, en la mayoría de los casos, la mayoría de las plantas moderadamente tolerantes a sales.
C3 ----- Agua altamente salina. No puede utilizarse en suelos con drenaje deficiente. Selección de plantas muy tolerantes a las sales y posibilidad del control de salinidad del suelo, aun con drenaje adecuado.
C4 ----- Agua muy altamente salina. No es apropiada en condiciones ordinarias para el riego. Puede usarse para una selección de cultivos en suelos permeables, en buen drenaje y con exceso de agua para lograr un buen lavado.
S1 ----- Agua baja en sodio. Puede utilizarse en la mayoría de los suelos con escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable.
S2 ----- Agua media en sodio. Puede utilizarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad.
S3 ----- Agua alta en sodio. Puede producir niveles peligrosos de sodio intercambiable, debe usarse con mantenimiento especial, buen drenaje, alta lixiviación y abono orgánico.
S4 ----- Agua con elevada concentración de sodio. Este tipo de agua generalmente no es recomendada para irrigación, excepto cuando tienes niveles muy bajos de salinidad
Cultivos poco tolerantes a la salinidad: pera, manzana, naranja, almendra, ciruela, melocotón, limón, mora, apio, rábano.
Cultivos tolerantes a la salinidad: uva, aceituna, granada, tomate, coliflor, lechuga, maíz, zanahoria, cebolla, chicharos, alfalfa, trigo, centeno, avena, arroz, girasol, higo y papas.
Cultivos muy tolerantes a la salinidad: dátil, remolacha, esparrago, espinaca, césped, algodón, cebada.

III.8.- Mapas de isovalores por ion dominante (elementos mayores).

En la Figura 23 se puede apreciar la configuración de curvas de isovalores del ion sulfato ; también podemos observar que los valores menores 14 mg/L, se encuentran en el centro, enriqueciéndose hacia el noreste hasta valores de 65 mg/L. Esto también se refleja hacia el suroeste de la subcuenca.

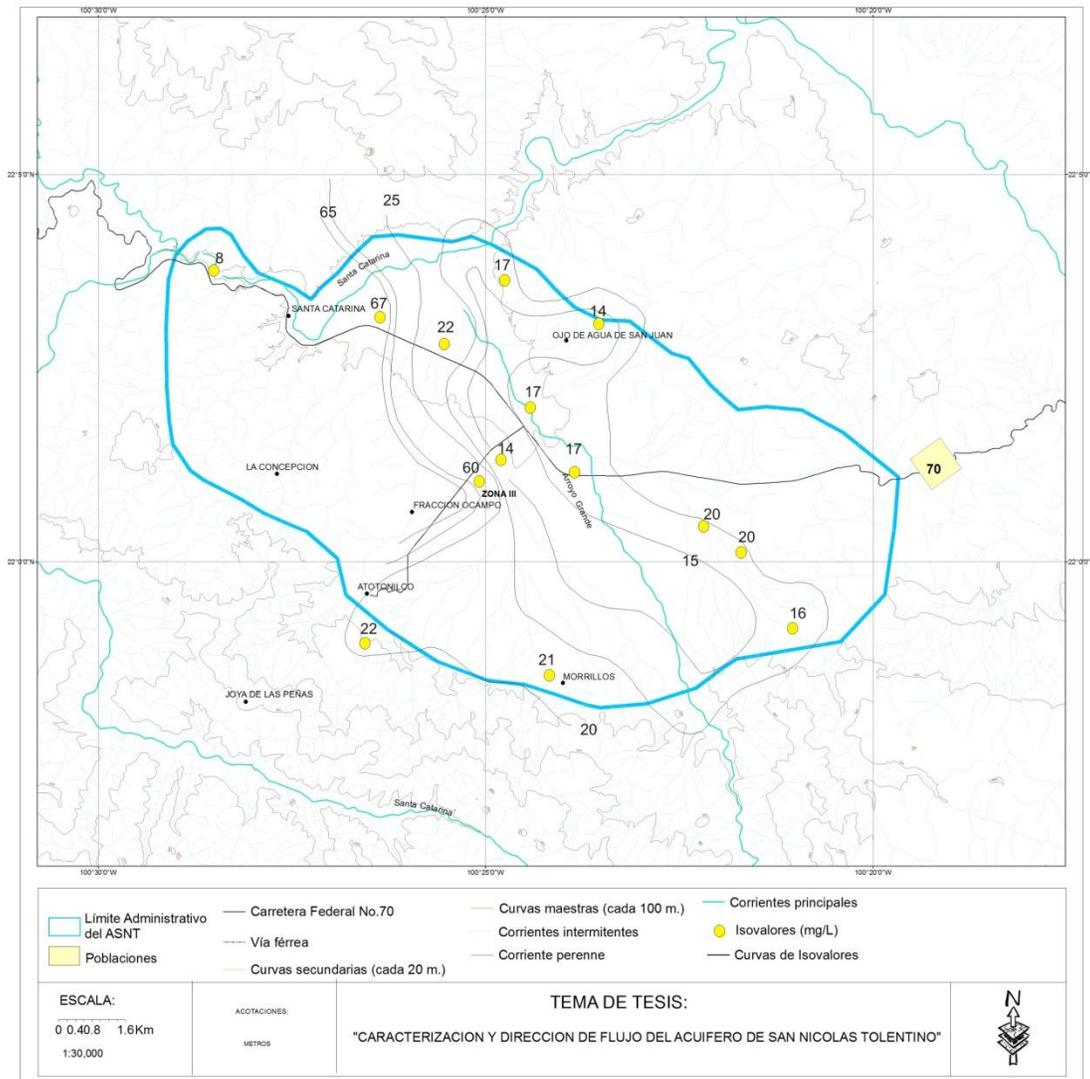


Figura 23- Mapa de isovalores de sulfatos () en (mg/L).

La configuración de curvas de isovalores del ion potasio de la Figura 24 nos muestra un enriquecimiento del ion hacia el centro y suroeste de la subcuenca,

pasando de valores de 3 mg/L hasta 8.5 mg/L. Esto también se refleja hacia el suroeste de la subcuenca. Los valores mayores de este ion se encuentran en el centro.

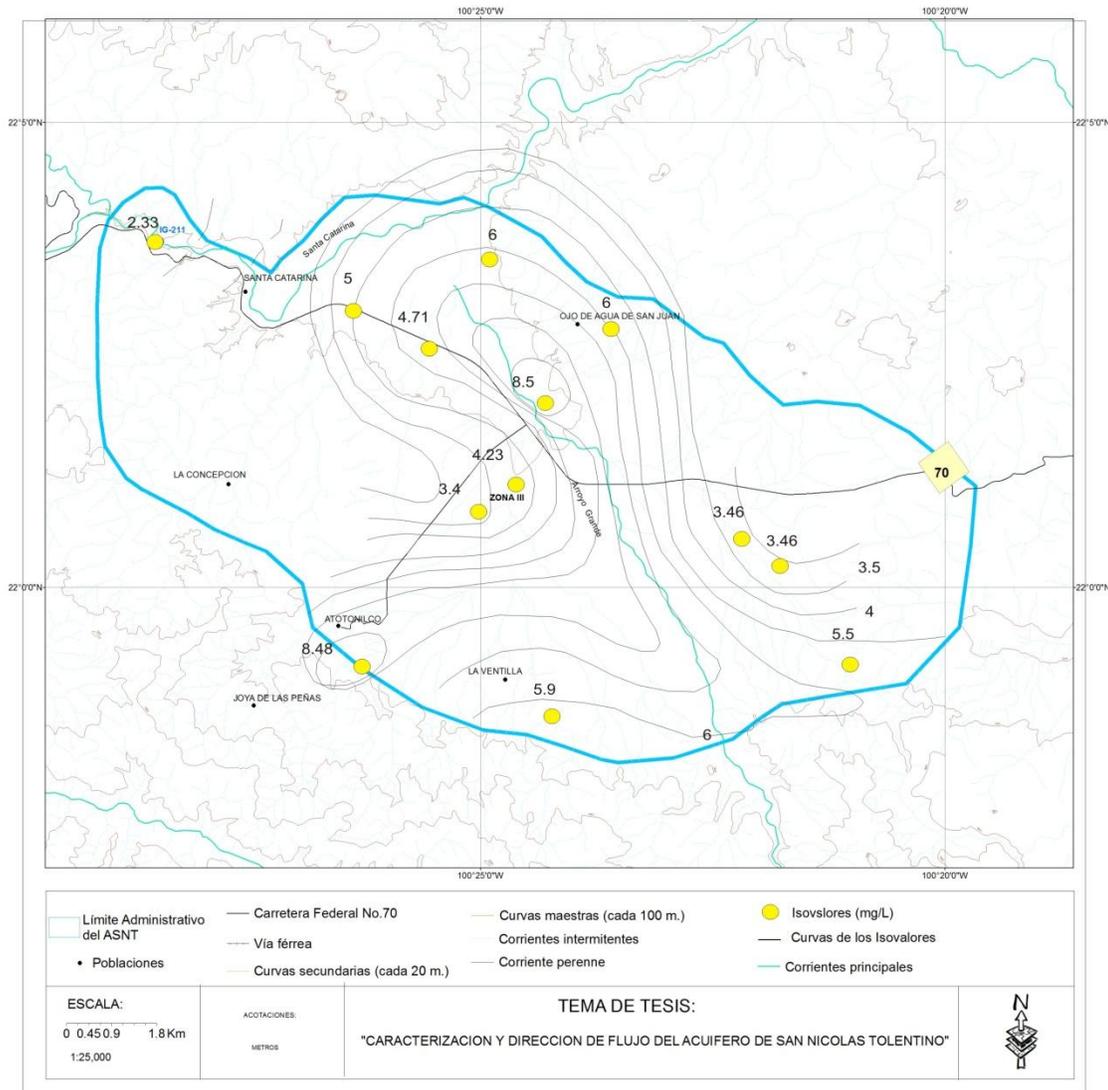


Figura 24- Mapa de isovalores de Potasio () en (mg/L).

En la Figura 25 de la configuración del ion sodio se observa un enriquecimiento del sureste hacia el noroeste de la subcuenca con valores desde 8 mg/L hasta 41 mg/L, observándose también tendencia de enriquecimiento hacia el suroeste.

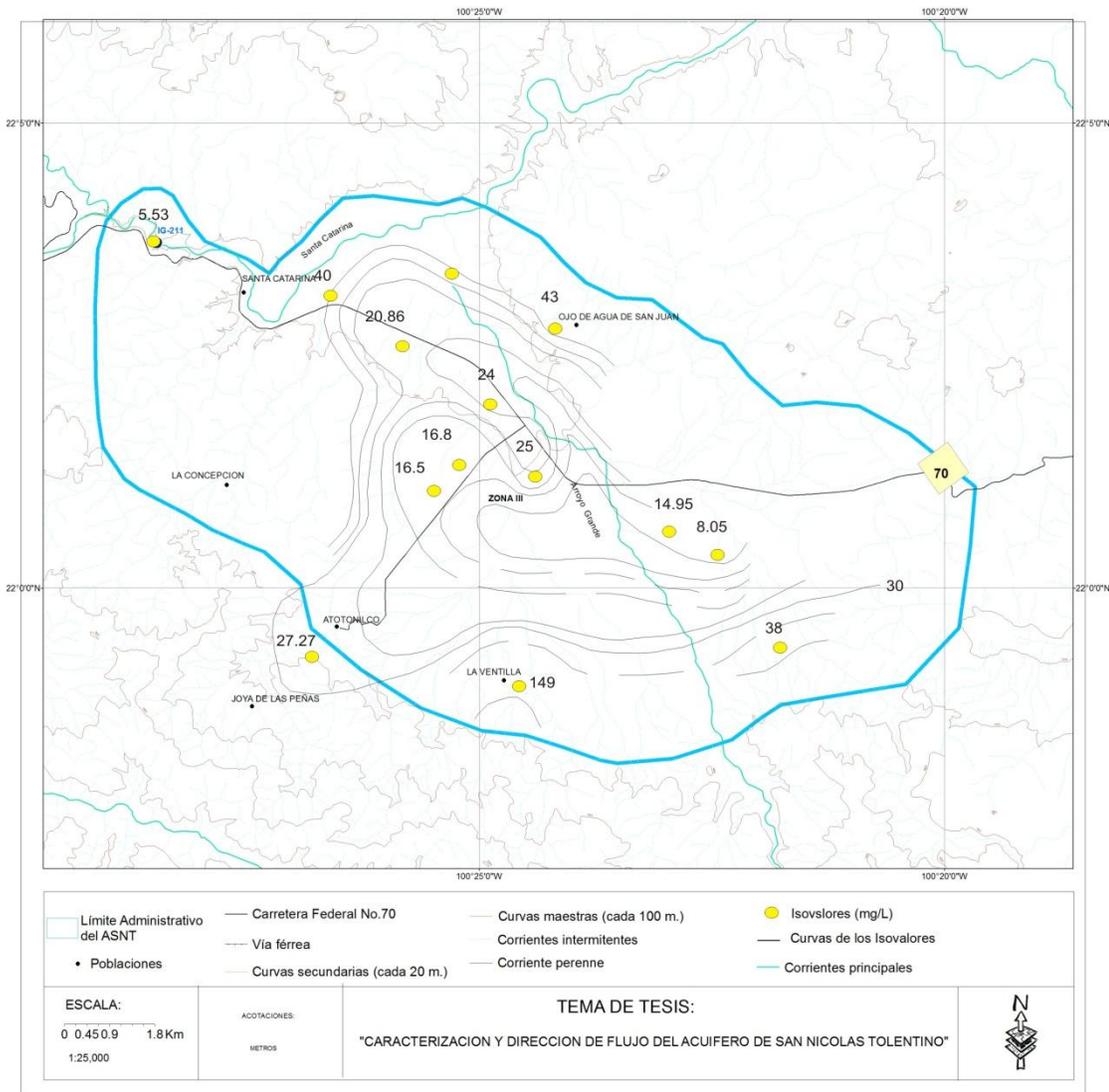


Figura 25- Mapa de isovalores de Sodio () en (mg/L).

La configuración de curvas de isovalores del ion carbonato de la Figura 26 nos muestra los menores valores hacia el centro, un enriquecimiento del centro hacia el noroeste y suroeste de la subcuenca (pasando de valores de 134 mg/L hasta 356 mg/L), y un empobrecimiento hacia el sureste.

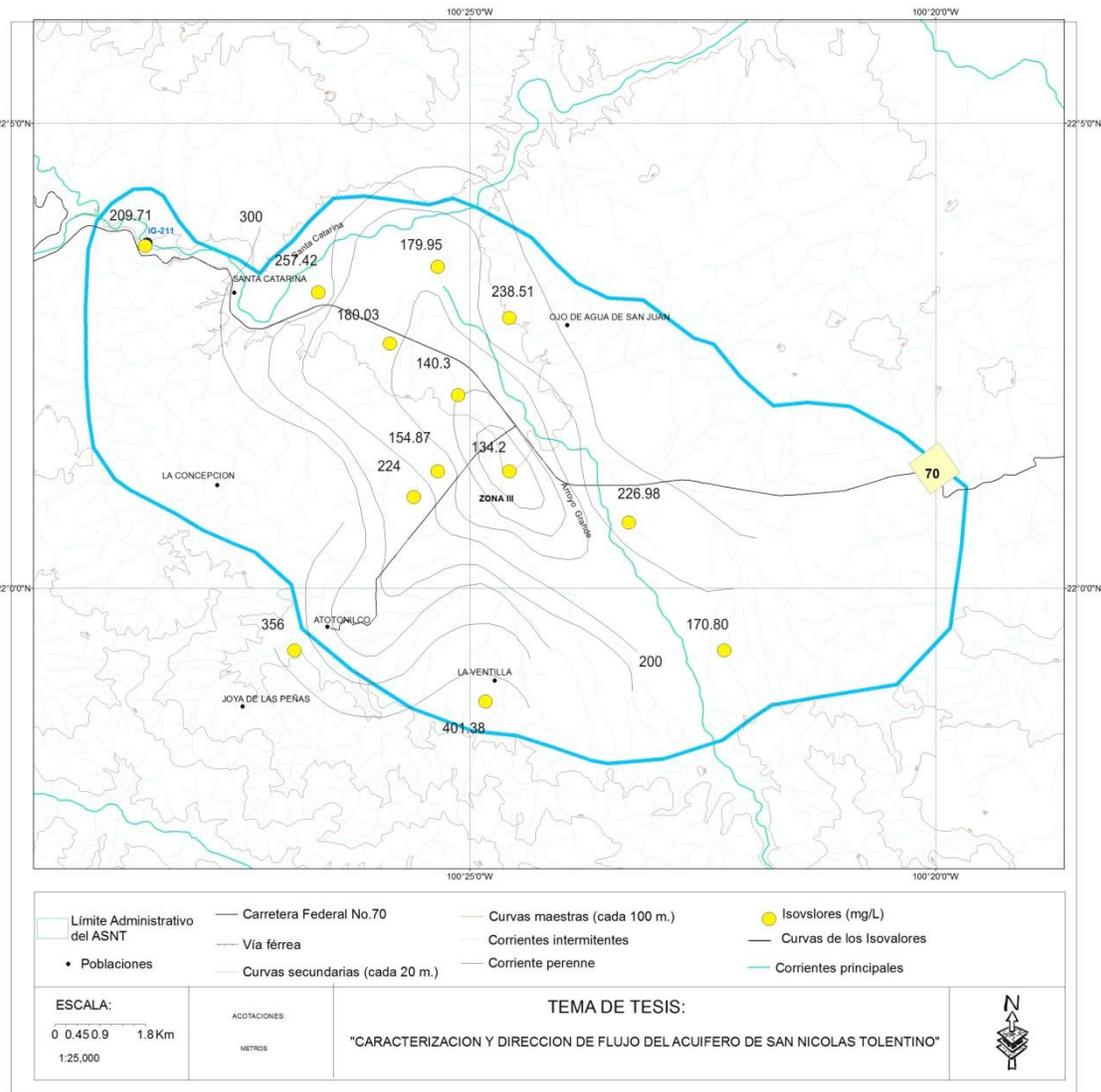


Figura 26- Mapa de isovalores de Bicarbonato (HCO_3) en (mg/L).

En configuraciones de isovalores de los diferentes cationes y aniones de las Figuras 23, 24, 25 y 26 se puede apreciar que dirección de flujo subterráneo en la subcuenca de Santa Catarina se refleja en las variaciones en el contenido de los iones, presentando los mayores valores hacia donde se cartografiaron las facies proximales de mega bloques y/o de "hummocks" de la avalancha, sugiriendo que el movimiento de las aguas subterráneas tienen también un fuerte control en la granulometría.

III.9.-Elementos traza interacción agua-roca

En el estudio de la química de las aguas subterráneas, es necesario expresar hasta que punto el agua ha alcanzado el equilibrio químico con los minerales que conforman la matriz del acuífero con los que ha estado en contacto Lloyd–Heathcote, (1985). Los minerales en contacto con el agua subterránea representan un sistema geoquímico que consiste de una fase sólida y una fase en solución. Si la solución inicialmente no contiene ninguno de los componentes del mineral, entonces existe desequilibrio entre las fases y el mineral disolverá para proveer componentes a la solución.

Los elementos traza se midieron en el equipo ICP-MS “Thermo X series II” del laboratorio de geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad de San Luis Potosí. Es un espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente, usa una técnica analítica de multielementos. Que permite la detección de iones en cada masa en secuencia rápida, permitiendo que los isótopos individuales de un elemento sean determinados. Las señales eléctricas resultantes de la detección de los iones son procesadas dentro de la información digital que es usada para indicar la intensidad del ión y subsecuentemente la concentración del elemento. Cuenta con un diseño del hardware de última generación

III.10.- Índices de saturación de los minerales

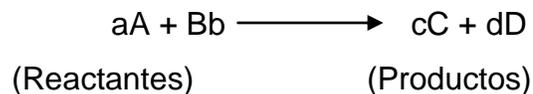
La determinación de índices de saturación IS con respecto a varios minerales, se realiza comparando los Productos de Actividad Iónica PAI (calculados a partir de las actividades de los iones involucrados y de las relaciones establecidas a partir de la disolución de un mineral), con los productos de solubilidad o constante de equilibrio (K_{eq}) de la reacción de disolución del mineral en cuestión. Posteriormente, los índices de desequilibrio o de saturación ($\log PAI / K_{eq}$), se utilizan para verificar si el agua está en equilibrio ($\log PAI / K_{eq} = 0$), sobresaturada ($\log PAI / K_{eq} > 0$), o subsaturada ($\log PAI / K_{eq} < 0$), con respecto a determinada fase sólida.

Jenne *et al.*, (1980) observaron que la varianza en los índices de saturación alrededor del valor cero (en equilibrio) con determinado mineral, se incrementa con el valor de la

constante de solubilidad para ese sólido. Ellos determinaron que un valor del 5% del logaritmo del producto de solubilidad de un mineral ($IS = \pm (5\%) (\text{Log } K_{eq})$), representa una franja en la que el agua está en equilibrio con dicho mineral.

Por ejemplo, el logaritmo de la constante de solubilidad para la calcita a 25° C es -8.5 . Por lo tanto, la zona en la que determinada agua se puede considerar en equilibrio con la calcita, es cuando el IS calculado es ± 0.43 . Con base en este criterio, las gráficas que se relacionen con el IS, indicarán este rango de equilibrio, con una línea arriba y abajo del valor de $\log PAI/K=0$.

Si el $IS < 0$ para un mineral calculado (si el índice de saturación es menor a cero), el agua está subsaturada con respecto a ese mineral. Esto significa que, desde el punto de vista termodinámico, el mineral no puede precipitar de la solución y deberá disolverse si está presente dentro de la solución para alcanzar el equilibrio. Si el $IS > 0$ (si el índice de saturación es mayor a cero) existe una sobresaturación; esto significa que presentará la tendencia a precipitar el mineral a partir de la solución. La constante de equilibrio (K_{eq}) juega un papel importante, ya que es necesaria su determinación para realizar el cálculo del IS en el agua con relación a diversos minerales. La constante de equilibrio (K_{eq}) expresa la relación constante de las actividades de los reactantes presentes cuando las velocidades de reacción en ambos sentidos se han igualado, y se define en términos de actividades (concentraciones activas). La forma más común de expresarla es mediante la concentración molar de las especies en solución.



El modelo geoquímico PHREEQC Parkhurst, (1995) se utilizó para calcular las actividades de las especies disueltas y los índices de saturación con respecto a varias fases minerales. Esta decisión se tomó con base en los siguientes aspectos: *i*) su base de datos contiene información de tipo termodinámico necesaria para incluir elementos

traza y sólidos estables, y *ii*) a nivel mundial, se considera de los más documentados. Los datos que se requieren para alimentar el programa son la temperatura, el pH, el potencial de óxido-reducción y la concentración de las especies disueltas. En la Tabla 15 se muestran los IS de las fases minerales más utilizadas durante la modelación geoquímica del agua subterránea.

La especiación (cálculo de todas las especies disueltas incluyendo complejos), se realiza por un proceso iterativo, utilizando constantes de equilibrio basadas en la energía libre de Gibbs para la reacción involucrada. Para la obtención de coeficientes de actividad se utilizan las ecuaciones de Davies, (1971) o la extendida de Debye-Hückel, (1923). La variación de la constante de equilibrio con la temperatura se calcula utilizando una ecuación de tipo empírica, o la relación de Van't Hoff. Las siguientes gráficas muestran los valores de saturación para diversos minerales, e indican el grado de saturación de los minerales más comunes que están presentes en el sistema del ASNT de acuerdo a los datos termodinámicos y químicos introducidos al programa para los diversos cálculos.

Tabla 15- Índices de Saturación (IS) respecto a varios minerales para las muestras usadas en la modelación de interacción agua/roca.

MTRA	Fam. Quim	Area	CE	Calcite	Celestite	CO2(g)	Dolomite	Gypsum	Halite	Strontianite
IG-079	-Ca-Mg-HC	2	585	0.3	-1.59	-2.28	0.48	-2.14	-7.35	-0.35
IG-075	Na-HCO3	3	608	-0.33	-2.74	-1.63	-0.73	-2.87	-7.36	-1.5
IG-101	Mg-SO4-HC	3	1848	0.28	-1.71	-1.66	0.24	-0.54	-8.03	-2.21
IG-057	Ca-Na-HCO3	3	487	-0.66	-2.76	-1.98	-1.95	-2.55	-8.32	-2.12
IG-056	Ca-Na-HCO3	3	326	-0.86	-2.87	-1.88	-1.98	-2.68	-8.27	-2.3
IG-103	Ca-Na-HCO3	3	312	-0.51	-3	-2.02	-1.98	-2.6	-8.06	-2.14
IG-054	Ca-Na-HCO3	1	566	0.15	-2.32	-1.58	-0.27	-2.03	-7.88	-1.44
IG-111	-Mg-Na-HC	1	548	-0.02	-3.69	-1.63	-0.13	-3.38	-7.95	-1.57
IG-052	-Mg-Na-HC	1	638	0.14	-2.93	-1.51	0.08	-2.58	-8.04	-1.49
IG-106	Ca-HCO3	1	567	0.07	-2.37	-1.6	-0.56	-2.02	-8.04	-1.53
IG-005	Ca-Na-HCO3	1	540	0.14	-2.15	-1.76	-0.34	-1.91	-7.35	-1.36
IG-022	Ca-HCO3	1	551	-0.14	-2.42	-1.64	-0.79	-2.02	-8.1	-1.75
IG-008	Ca-Na-HCO3	1	671	-0.1	-1.93	-1.65	-0.77	-1.91	-7.37	-1.37
IG-004	Ca-Na-HCO3	1	550	-0.01	-2.16	-1.83	-0.55	-1.93	-7.57	-1.47
IG-010	Ca-Na-HCO3	1	563	0.1	-2.34	-1.57	-0.39	-1.98	-7.79	-1.52
IG-012	Ca-Na-HCO3	1	808	-0.04	-2.17	-1.64	-0.39	-2.14	-7.41	-1.33
IG-013	-Mg-Na-HC	2	810	0.1	-1.96	-1.62	0.11	-1.83	-7.78	-1.29
IG-019	Ca-Na-HCO3	2	455	-0.31	-2.48	-1.62	-1.11	-2.22	-7.96	-1.82
G-037	-Na-Mg-HC	2	551	-0.06	-2.64	-1.68	-0.28	-2.21	-7.88	-1.73
IG-093	Ca-Na-HCO3	2	449	-0.21	-2.66	-1.86	-0.66	-2.31	-8.05	-1.8
IG-097	Ca-Na-HCO3	2	675	-0.2	-1.67	-1.77	-0.27	-1.7	-8.03	-1.4
IG-098	Ca-Na-HCO3	2	458	0.01	-2.63	-1.84	-0.31	-2.2	-8.12	-1.68
IG-095	Ca-Na-HCO3	2	584	-0.29	-2.43	-1.7	-0.99	-2.12	-8.01	-1.85
IG-108	-Mg-Ca-HC	3	377	-0.35	-2.84	-1.88	-0.43	-2.81	-8.07	-1.65
IG-109	Ca-Na-HCO3	3	309	-0.49	-3.04	-1.99	-1.45	-2.54	-8.03	-2.21
IG-065	a-Mg-HCO3	3	531	-0.26	-2.46	-1.74	-0.84	-1.84	-8.09	-2.1
IG-200	Ca-Mg-HCO3	3	637	-0.25	-2.58	-1.31	-0.9	-2.17	-7.74	-1.88
IG-205	Mg-HCO3-S	3	489	-0.03	-2.16	-1.83	-0.34	-1.81	-8.27	-1.64
IG-208	-Na-Mg-HC	3	310	-0.79	-2.94	-1.72	-1.88	-2.64	-8.44	-2.34
IG-210	Ca-HCO3	3	232	-1.19	-3.04	-1.36	-3.3	-2.38	-8.69	-3.03
IG-211	Ca-HCO3	3	311	-0.92	-3.61	-1.21	-2.49	-2.71	-8.84	-3.05
IG-212	Ca-HCO3	3	405	-0.44	-2.94	-1.45	-1.54	-2.26	-8.43	-2.38
IG-213	Ca-HCO3	3	398	-0.37	-3.11	-1.57	-1.45	-2.25	-8.77	-2.48
IG-214	Ca-Na-HCO3	3	330	-0.99	-2.73	-1.24	-2.42	-2.36	-8.36	-2.64

III.11.- Geoquímica de carbonatos

Los resultados de la determinación de los índices de saturación para las muestras de agua subterránea, señalan que para el caso de los carbonatos, calcita (con una franja de equilibrio de ± 0.45) y dolomita (con franja de equilibrio de ± 0.858), Figura 27 presentan valores que indican equilibrio para la mayor parte de muestras con un rango de salinidades lo que corresponde ha (232 a 487 $\mu\text{mhos/cm}$) registrado en las familias de aguas subterráneas. Esto significa que predomina el equilibrio y la subsaturación con relación a carbonatos. Las muestras que presentan condiciones de subsaturación y que pertenecen a las familias bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-mixta, se localizan en la subcuenca de Santa Catarina. En la Figura 28 para dolomita se puede observar también lo que corresponde a (232 a 455 $\mu\text{mhos/cm}$) la subcuenca de Ocampo paraíso.

La familia Sulfatada-Magnésica, se encuentra en la localidad de Puente Prieto perteneciente a Santa Catarina es el pozo más profundo de todos los aprovechamientos muestreados con una conductividad eléctrica de 1848($\mu\text{S/cm}$), y los demás aprovechamientos someros de las familias $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Mix}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}$ y $\text{HCO}_3\text{-Mg}$, localizándose en la parte de las subcuencas San Nicolás, Ocampo Paraíso y otras pocas en Santa Catarina.

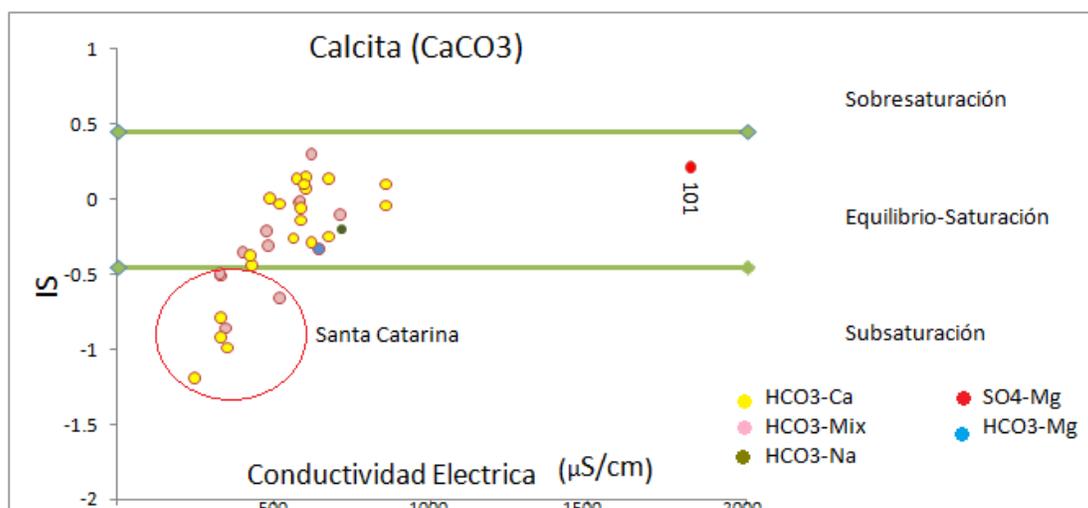


Figura 27- Índice de Saturación (IS) respecto a la Calcita (CaCO_3)

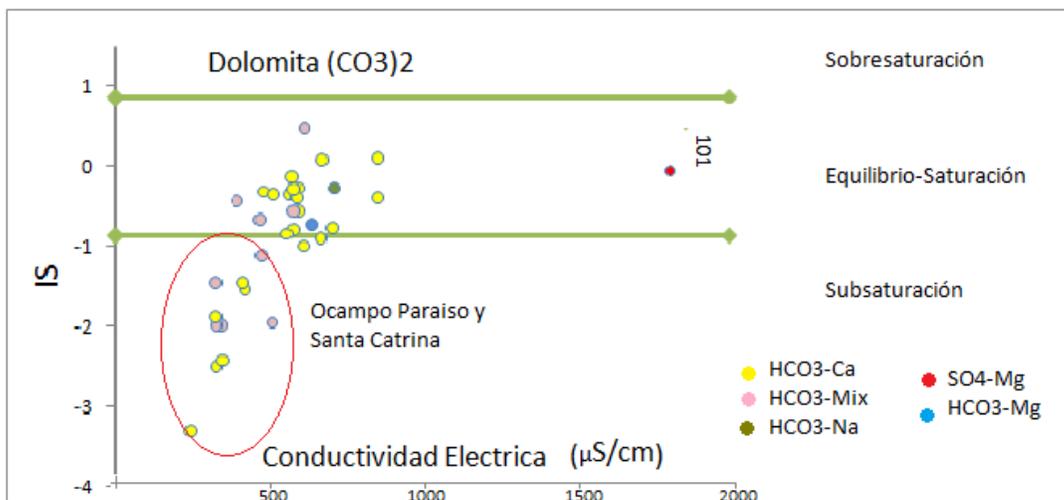


Figura 28- Índice de Saturación (IS) respecto a la Dolomita MgCa(CO₃)₂

En el caso de la estroncionita Figura 29, la mayoría de las muestras manifiestan condiciones de subsaturación en las aguas de menor salinidad y se mantiene en equilibrio solo la muestra IG-079 perteneciente a la subcuenca Ocampo Paraíso, lo que sugiere en este caso que este mineral no controla la concentración de estroncio en el agua subterránea.

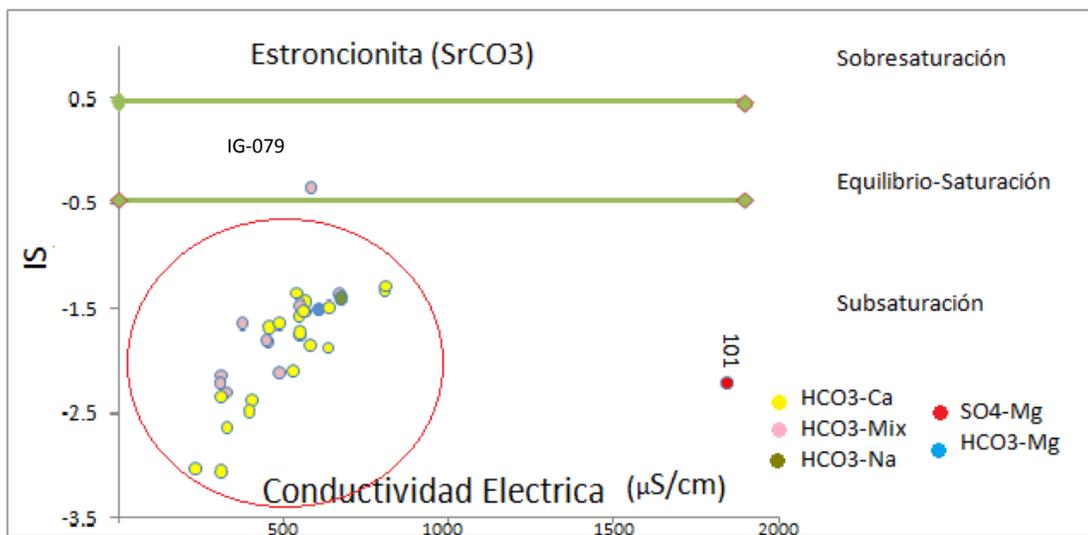


Figura 29- Índice de Saturación (IS) respecto a la Estroncionita SrCO₃

III.12.- Geoquímica de sulfatos

Con relación a sulfatos como el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), los valores de IS determinados indican que todas las muestras de agua presentan condiciones de subsaturación con conductividades eléctricas de 232 a 810 $\mu\text{mhos/cm}$, lo cual indica que el agua subterránea tiende a disolverse respecto al yeso, ver Figura 30. Al aumenta la salinidad en el agua llegara al punto de equilibrio; por ejemplo la muestra IG-101 con una CE de 1848 $\mu\text{S/cm}$ y un índice de saturación de -0.54 casi encuentra el equilibrio.

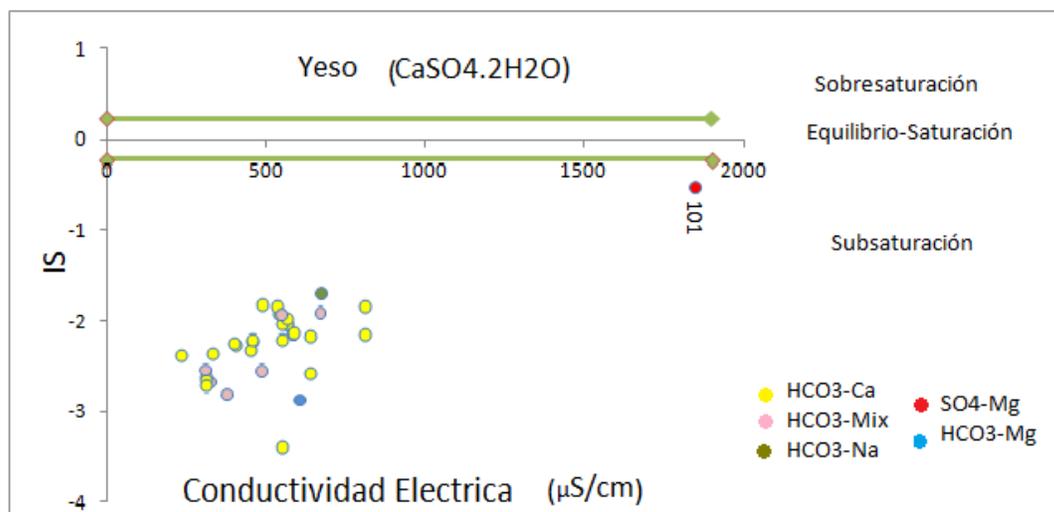


Figura 30- Índice de Saturación (IS) respecto al Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Para el caso de la barita (BaSO_4), las condiciones de equilibrio con el agua subterránea se identifican a partir de 232 hasta los 808 $\mu\text{S/cm}$ de conductividad eléctrica; abarcando cuatro familias de agua $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Mix}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}$ y $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ en el ASNT, únicamente la familia $\text{SO}_4\text{-Mg}$ que constituye el agua subterránea de mayor salinidad presenta condiciones de saturación eso significa que esta muestra esta precipitando el SO_4 Figura 31, por lo que este mineral controla las concentraciones de Ba en el agua subterránea.

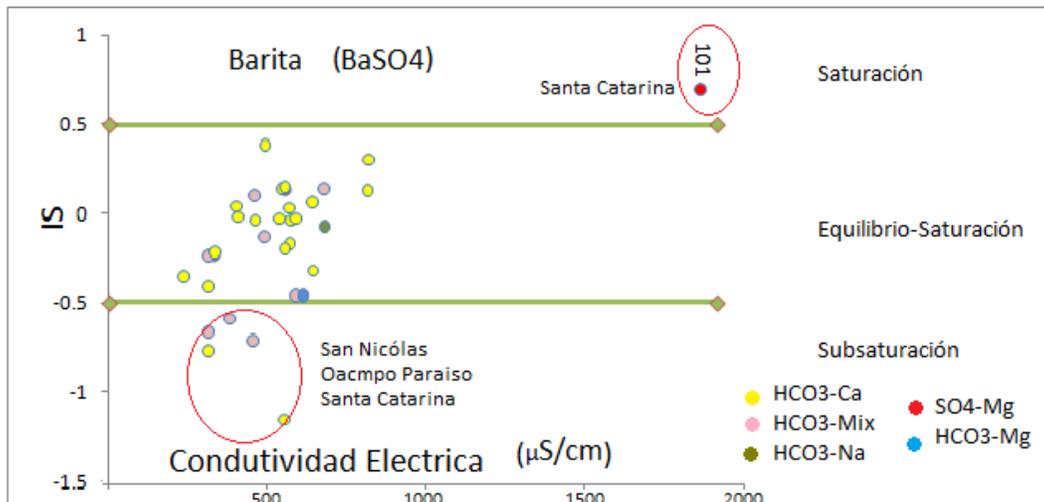


Figura 31- Índice de Saturación (IS) respecto a la Barita ($BaSO_4$)

III.13.- Procesos de Dedolomitización

De acuerdo con las condiciones geológicas que se presentan en el ASNT, las evidencias hidrogeoquímicas hasta ahora analizadas sugieren que el agua subterránea ha estado en contacto con materiales geológicos que contienen minerales como la calcita, dolomita y yeso (o anhidrita), los cuales se encuentran en las principales formaciones que afloran en la región; estas son: La Peña, El Abra y Guaxcamá. En estas condiciones, el agua subterránea funciona como un agente geológico que produce un fenómeno conocido como dedolomitización, que en conjunto da como resultado la disolución de yeso (o anhidrita) en un medio calcáreo, la dolomita se disuelve y la calcita precipita. Debido a que el agua subterránea de la zona de estudio está en equilibrio con la calcita y dolomita Figuras 27 y 28 entonces aplica la siguiente reacción:

Por lo que considerando la constante de equilibrio de esta reacción química, la relación permanece constante (considerando una temperatura de $25^{\circ} C$), de acuerdo con la siguiente expresión:

La disolución de anhidrita o yeso, liberando calcio y sulfato al agua subterránea, se desarrolla en términos generales de la siguiente manera:

El incremento de la concentración de calcio debido a la disolución de yeso ocasiona la precipitación de calcita. A medida de que la calcita precipita, la concentración de carbonato disminuye, produciendo que se disuelva la dolomita y el consiguiente incremento de magnesio. Cuando el magnesio se incrementa el calcio se incrementa también (o sea que no todo el calcio que se genera de la disolución del yeso precipita), de tal modo que la disolución del yeso en estas condiciones induce la transformación de dolomita a calcita en la roca calcárea y produce agua subterránea en la que, a medida de que se desarrolla la interacción agua/material geológico, se incrementan las concentraciones de magnesio, calcio y sulfato, produciendo además una disminución de la alcalinidad y en el pH Appelo, C.A.J. y Postma, D., (1996).

Analizando el desarrollo de estas reacciones para la zona de estudio se tiene lo siguiente: El agua subterránea está en equilibrio o ligeramente subsaturada con relación a la calcita y dolomita Figuras 27 y 28, sin importar la salinidad que presente. Para el caso del yeso, el agua es muy subsaturada Figura 30 a mayor conductividad eléctrica, el mineral encuentra su equilibrio. Para la barita pasa de muy subsaturada a equilibrio, y a mayor conductividad eléctrica existe una precipitación de la muestra.

Cuando el agua está en equilibrio con calcita y dolomita, de acuerdo con las condiciones descritas previamente, la relación $\frac{[Ca^{2+}]}{[Mg^{2+}]}$ debe ser del orden de 0.8.

De este modo, la transferencia de masa está dada por la reacción siguiente.

De acuerdo con esto, por cada dos moles de calcita que precipitan, se disuelve un mol de dolomita. Esta reacción predice que la concentración de carbonatos debe de incrementarse tanto en relación con sulfatos como con el magnesio.

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Discusiones

En la Tabla 16 se puede apreciar: el aprovechamiento, familia química del agua, la subcuenca a la que pertenece y el tipo de formación.

En la subcuenca de San Nicolás Tolentino (SNT) predominan las familias Bicarbonatadas-Cálcicas (80%) y Bicarbonatadas Mixtas (20%) con las formaciones: La Joya (Qj), Cárdenas (Kcd), Ignimbrita Santa María (Tis), El Jagüey (Tqj), Aluvión (Qal), Andesita Casita Blanca (Tcb), y San Nicolás (Tsn).

Las aguas de subsuelo que en su trayectoria tienen contacto con rocas calcáreas obtienen la mayor parte de su contenido de calcio y bicarbonato a partir de la disolución de la calcita, del aragonito, de la dolomita, y de la anhidrita, porque el carbonato de calcio y bicarbonato se disuelven fácilmente en el agua. Las diferentes reacciones químicas entre el agua y el carbonato de calcio son las siguientes:

Si el dióxido de carbono (CO_2) está presente en el agua en cantidad abundante, la disociación de carbonato continuará hasta que el bicarbonato se equilibre. Si el pH aumenta, la relación entre iones carbonato () y bicarbonato () aumentará y, el carbonato de calcio comenzará a precipitar (Davis *et. al.*, 1959).

Para la familia mixta pudiera ser la transición de una familia química para convertirse en otro tipo de familia química.

Las familias químicas presentes en esta subcuenca reflejan probablemente, la interacción de las aguas con las calizas de la formación El abra, ya que esta es la unidad calcárea más extendida dentro del área de estudio.

En la subcuenca Ocampo Paraiso (OP) las familias químicas de agua son las siguientes: Bicarbonatada-Cálcica (50%), Bicarbonatada-Mixta (37.5) y Bicarbonatada-Magnésica (12.5). Teniendo un sistema de corrientes intermitentes que drenan las

siguientes formaciones: Andesita Casita Blanca (Tcb), Aluvión (Qal), La Joya (Qj), El Jagüey (Tqj) y Latita Portezuelo (Tlp); se asume que de ellas se incorporan sus iones.

Las fuentes más comunes de magnesio en la hidrosfera están constituidas por la dolomita que se encuentran en rocas sedimentarias. En esta subcuenca las calizas de la formación El Abra afloran ampliamente y aunque no se ha documentado cuantitativamente, se sabe que contiene estratos parcialmente dolomitizados (diferentes grados de dolomitización). La mayor parte de las calizas contienen también algo de magnesio; por lo tanto la disolución de roca caliza puede proporcionar calcio y magnesio.

El magnesio se encuentra generalmente en menor concentración que el calcio, probablemente a la lenta solubilidad de la dolomía, así como a la mayor abundancia de calcio en la corteza terrestre, sin embargo, cuando estos iones Ca^{2+} y Mg^{2+} quedan disueltos el carbonato de magnesio no llega a precipitar bajo las condiciones ordinarias del agua que se encuentra próxima a la superficie. (Davies *et. al.*, 1959).

Para la familia Bicarbonatada-Mixta, la cual contiene iones de calcio Ca, magnesio Mg y sodio Na, esta puede representar una mezcla de aguas bicarbonatadas cálcicas con aguas bicarbonatadas magnésicas, y reflejar también la influencia de corrientes que drenaron rocas volcánicas, e inducir la liberación de sodio, a partir de los feldespatos del grupo de las plagioclasas.

En la subcuenca Santa Catarina (SC), se encontró familias químicas de agua: Bicarbonatada-Cálcica (56.25%), Bicarbonatada-Mixta (31.25%), Bicarbonatada-Sódica (6.25%), Sulfatada-Cálcica (6.25%). Con las siguientes formaciones: El Jagüey (Tqj), Avalancha San Martín (Ts), Latita portezuelo (Tlp), y San Nicolás (Tsn).

Las sales de sodio son solubles y raramente precipitan a menos que se haya alcanzado una precipitación de varios miles de partes por millón (ppm). El paso de agua Bicarbonatada-Cálcica a Bicarbonatada-Sódica se debe a los procesos de intercambio iónico lo que quiere decir que el proceso de estos intercambios ionicos es reversible dependiendo de la dirección de intercambio y de la concentración relativa de

cada ion. Por ejemplo las arcillas intercambian frecuentemente iones de sodio por iones de calcio y magnesio.

Cuando el ion predominante en una agua es el sulfato () y cuando la concentración de bicarbonato es baja, la solubilidad del Sulfato-Calcio (yeso) tendrá a controlar la concentración final del calcio. (Davis *et. al.*, 1959).

La interacción agua-roca que justifique el contenido de sulfatos en el agua subterránea de esta subcuenca, está justificada por las corrientes que drenan a la formación Guaxcamá la cual principalmente está compuesta por yeso y anhidrita y esta aflora principalmente en la parte nororiente de la subcuenca.

Tabla 16.- Familias químicas de agua y formaciones geológicas para cada aprovechamiento de cada subcuenca.

MTRA	Aprvechamiento	Fam. Quim.	Nombre	Subcuenca	Formaciones
IG-054	Armadillo de los Infante	Ca-Na-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	SNT	Qj
IG-111	madillo d los Inf. (manant	Ca-Mg-Na-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	SNT	Qj, Kcd
IG-052	San Miguel	Ca-Mg-Na-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	SNT	Tis
IG-106	Arroyo Hondo	Ca-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	SNT	Tqj
IG-005	Paso del Aguila	Ca-Na-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	SNT	Tqj, Qal
IG-022	Barrancas	Ca-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	SNT	Tis
IG-010	Ojo de Agua	Ca-Na-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	SNT	Kcd
IG-012	Jagüey	Ca-Na-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	SNT	Tqj, Tcb
IG-008	San Nicolas Tolentino	Ca-Na-HCO3	Bicarbonatada-Mixta	SNT	Qal
IG-004	Los Moreno	Ca-Na-HCO3	Bicarbonatada-Mixta	SNT	Qal, Tsn

MTRA	Aprvechamiento	Fam. Quim.	Nombre	Subcuenca	Formaciones
IG-013	Los Nogales	Ca-Mg-Na-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	OP	Tcb
IG-037	Allende	Ca-Na-Mg-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	OP	Tcb
IG-098	El Sermón	Ca-Na-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	OP	Qal
IG-095	Mojarras de Arriba	Ca-Na-HCO3	Bicarbonatada-Calcica	OP	Qal, Qj, Tqj
IG-019	Golondrinas	Ca-Na-HCO3	Bicarbonatada-Mixta	OP	Qal
IG-093	El paraiso	Ca-Na-HCO3	Bicarbonatada-Mixta	OP	Tcb
IG-079	Ocampo	Na-Ca-Mg-HCO3	Bicarbonatada-Mixta	OP	Tlp, Tcb
IG-097	El Saucillo	Mg-Ca-Na-HCO3-SO4	Bicarbonatada-Magnesica	OP	Tcb

MTRA	Aprvechamiento	Fam. Quim.	Nombre	Subcuenca	Formaciones
IG-065	Santa Catarina	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄	Bicarbonatada-Calcica	SC	Tqj
IG-200	Atotonilco	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada-Calcica	SC	Ts
IG-205	Atotonilco	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄	Bicarbonatada-Calcica	SC	Ts
IG-208	Atotonilco	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada-Calcica	SC	Ts
IG-210	El Sauce	Ca-HCO ₃	Bicarbonatada-Calcica	SC	Tlp
IG-211	Santa Catarina	Ca-HCO ₃	Bicarbonatada-Calcica	SC	Tqj
IG-212	Paso de San Antonio	Ca-HCO ₃	Bicarbonatada-Calcica	SC	Tlp,Tqj
IG-213	Paso de San Antonio	Ca-HCO ₃	Bicarbonatada-Calcica	SC	Tqj
IG-214	Santa Catarina	Ca-Na-HCO ₃	Bicarbonatada-Calcica	SC	Tlp
IG-057	Seminario	Ca-Na-HCO ₃	Bicarbonatada-Mixta	SC	Tqj
IG-056	Gasolinera	Ca-Na-HCO ₃	Bicarbonatada-Mixta	SC	Tqj
IG-103	Atotonilco	Ca-Na-HCO ₃	Bicarbonatada-Mixta	SC	Tqj
IG-108	Ojo de Agua de San Juan	Na-Mg-Ca-HCO ₃	Bicarbonatada-Mixta	SC	Tqj
IG-109	Rancho Nuevo	Ca-Na-HCO ₃	Bicarbonatada-Mixta	SC	Tsn
IG-075	La Ventilla	Na-HCO ₃	Bicarbonatada-Sodica	SC	Tqj
IG-101	Puente Prieto	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃	Sulfatada-Calcica	SC	Tqj

Conclusiones

Los resultados de piezometría de los diferentes aprovechamientos censados concuerdan con las corrientes principales que drenan el acuífero, las direcciones principales del ASNT por subcuencas es la siguiente: en las subcuencas 1 (San Nicolás Tolentino), y 2 (Ocampo Paraiso) la dirección de las aguas subterráneas es de NW-SE; en la subcuenca 3 (Santa Catarina), en la zona de influencia del río Santa Catarina las corrientes subterráneas tienen una dirección oeste a este, y se les suman, en la mitad norte del valle, las corrientes que aportan el arroyo semiperene de Cañada Grande (de SE-NW) y de los arroyos intermitentes de Los Álamos de S-SW a N-NE, y El Hacha de W-SE a N-NW.

Las familias químicas del agua determinadas, correlacionan bien con la litología que drenan las corrientes de agua superficial y subterránea.

La subcuenca de Santa Catarina es de tipo tectónico delimitada por fallas en su parte norte, sur y este.

Existen dos tipos de acuíferos en la subcuenca de Santa Catarina: Uno de tipo libre, alojado en material granular, el cual está constituido en su mayoría por material derivado de una avalancha catastrófica producto del colapso del sector norte del estratovolcán de Atotonilco (de edad Oligoceno). Se considera que en este acuífero la recarga es de tipo local, por corrientes superficiales que atraviesan o llegan a esta

subcuenca. El otro es de tipo confinado y alojado en material clástico sobreyacente a las rocas marinas cretácicas, en el cual la roca sello es una unidad de andesitas que cubren dichos sedimentos clásticos continentales. Las corrientes subterráneas que alimentan este acuífero son profundas y con alto contenido en sales. Este acuífero confinado solo se alcanza con pozos profundos de hasta 300m. El movimiento de las aguas subterráneas tiene un fuerte control en la granulometría, pues manifiesta una dirección de flujo subterráneo hacia donde el tamaño del material de relleno de la cuenca es de mayores dimensiones (facies proximales de mega bloques y/o de "hummocks" de la avalancha). Esto se refleja en las configuraciones de isovalores de los diferentes cationes y aniones.

La composición química de las aguas en ambos acuíferos es contrastante siendo mucho mas salina la del acuífero profundo.

Recomendaciones

Los acuíferos libres, alojados en medios granulares, son muy sensibles a la influencia, por recarga vertical, a algún tipo de contaminación, ya sea por los químicos y pesticidas usados en actividades agrícolas, o los derivados del desarrollo y crecimiento de los poblados ubicados en el valle que ocupa el acuífero. Por lo tanto, se recomienda monitorear de manera sistemática las aguas captadas sobre todo en el acuífero de la subcuenca de Santa Catarina.

Dicho monitoreo debe contemplar los análisis que permitan detectar elementos contaminantes por la actividad agrícola existente (por la aplicación de fertilizantes - NO_3 y SO_4 -, pesticidas y herbicidas, entre otros) que pudieran deteriorar la calidad química de las aguas subterráneas, la recomendación para este estudio es realizar los analisis bacteriológicos que detecten la reducción bacteriana de la materia orgánica que deriven de la actividad humana en la región.

Se recomienda explorar con nuevas perforaciones profundas el acuífero confinado que se detecto mediante el pozo IG-101, ya que este acuífero será de gran importancia para el abastecimiento de agua en el futuro.

El conocer el movimiento del agua ayuda a la determinación específica de zonas de recarga y descarga donde se consideraron las variables como el relieve, el clima, el cual a su vez, junto con la litología del área ayudan a la formación de determinado tipo de suelo, ligándose también al tipo de vegetación y la calidad química del agua por lo que es recomendable realizar estudio de granulometría en la subcuenca de Santa Catarina, pues este estudio manifiesta una dirección de flujo subterráneo hacia donde el tamaño del material de relleno de la cuenca es de mayores dimensiones (facies proximales de mega bloques y/o de “*hummocks*” de la avalancha). Observando las configuraciones de isovalores de cationes y aniones.

APENDICE

Tabla de datos fisicoquímicos de campo, laboratorio y elementos traza.

MTRA	Localidad	clave	APROV	LATTUD	LONG	°C		µmhos/cm	%	mV	µmhos/cm	mg/lit	mg/lit	Total	Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	N-NO ₃	F	7Li	27Al	29Si	51V	55Mn	65Cu	75As	79Br	88Sr	137Ba	202Hg	208Pb	238U
70	LOS NOGA	IG-013	NORIA	-100.433	22.158	24.4	7.53	585		81	749	524	269.00	204	54	5	47	21	0	328.2	29.8	42	2.9	0.41	11.02	29.13	25260	32.41	0.842	6.443	4.535	55.6	1199	158.8	0.149	0.269	3.356
56	SAN MIGUEL	IG-052	NORIA	-100.487	22.024	28.0	8.15	608	14	234	629	435	329.00	61	149	5.9	16	5.08	0	401.4	11.6	21	0.9	0.34	10.59	5.833	20810	11.29	90.83	0.848	1.76	75.47	690.5	226.4	0.075	0.062	2.027
54	ARMADILLO	IG-054	POZO	-100.654	22.249	31.2	8.21	1848	17	1816	789	1290	206.50	836	39	5.7	255	48.38	0	251.9	10.9	725	1.5	2.19	9.967	3.446	13770	13.28	0.615	5.75	15.45	87.71	818.2	107	0.178	0.488	1.424
57	ARROYO	IG-106	NORIA	-100.616	22.288	23.9	8.82	487	28	244	279	200	110.00	103	25	7.7	35	3.76	0	134.2	6.8	17	3.9	0.39	7.033	1.642	13760	9.878	0.102	1.494	15.74	70.12	787.6	118.5	0.19	0.327	1.58
77	OJO DE AGUA	IG-108	POZO	-100.400	22.060	26.7	7.30	326	18	339	319	235	115.00	90	24	8.5	25.59	6.32	0	140.3	8.2	17	5.9	0.4	8.198	9.047	19190	29.78	0.426	3.105	6.854	41.18	511	69.6	0.14	0.29	1.297
49	LA VENTANA	IG-075	POZO	-100.376	21.990	31.3	8.08	312	40	327	333	265	140.00	93	38	5.5	33.81	1.94	0	170.8	8.2	16	6.6	0.51	44.73	4.437	18400	7.359	0.103	0.261	6.032	41.43	410.8	73.69	0.111	-0.085	0.856
78	RANCHO	IG-109	POZO	-100.419	22.060	18.6	7.94	566	10	275	602	420	268.80	243	34	7.54	82.8	8.7	11	305.0	15.3	33	4.3	0.35	5.414	27.25	16360	4.439	2.433	1.582	2.102	21.59	243.6	85.58	1.224	0.09	0.613
73	EL PARAISO	IG-093	NORIA	-100.343	22.105	23.2	8.27	548	12	340	570	400	300.50	239	35	9.1	59	22.3	0	366.6	12.1	2	4.2	0.4	3.719	1.186	11090	6.43	0.37	1.015	3.453	39.18	364	22.17	0.489	0.049	1.56
65	BARRANCO	IG-022	NORIA	-100.551	22.216	16.3	7.88	638	6	322	710	515	319.50	284	33	4.1	80	20.5	0	389.8	10.7	10	1.1	0.77	7.909	33.74	10040	6.3	2.772	1.777	0.789	7.106	565.6	106.5	1.124	0.123	1.065
7	OCAÑA	IG-079	POZO	-100.408	22.987	16.3	7.77	567	7	316	600	408	272.50	259	28	5.89	90.1	8.1	0	332.5	12.2	31	2.8	0.32	54.93	-0.126	11240	1.261	2.189	2.282	13.04	19.18	3370	23.52	0.36	-0.132	0.855
76	MOJARRA	IG-095	POZO	-100.271	22.161	22.7	8.00	540	20	344	629	435	257.00	248	49	10	84	9.3	0	313.5	35.1	44	4	0.59	5.513	0.129	11290	5.622	0.74	1.297	4.736	29.96	621.7	105	0.234	0.125	1.375
53	ATOTONILCO	IG-103	POZO	-100.368	22.133	20.3	7.63	551	7	299	609	415	270.00	233	27	5	72	13	0	329.4	10.7	36	0.8	0.38	21.54	-1.43	13300	12.21	-0.039	0.45	2.071	48.31	268	35.11	0.196	-0.154	0.398
79	SANTA CA	IG-065	POZO	-100.443	22.052	20.0	8.10	671	10	334	706	480	247.50	210	77	25	70	8.6	0	302.0	21.4	53	9.8	1.43	21.93	-3.12	17490	14.2	-0.039	0.187	3.301	41.29	286.4	47.23	0.152	-0.135	0.456
71	GOLODRIN	IG-019	NORIA	-100.394	22.326	22.3	8.23	1	12	325	584	400	237.50	205	54	8	66	9.8	11	266.6	18.3	49	0.7	0.76	3.898	52.46	10550	2.557	65.05	1.549	4.412	59.53	564.7	140	0.044	0.405	0.575
75	EL SERMO	IG-098	POZO	-100.313	22.079	26.1	7.89	563	6	307	575	400	304.50	244	45	7	82	9.6	23	325.1	13.8	38	1.9	0.54	6.044	7.254	16420	8.532	0.517	2.269	4.159	28.56	405	120.7	0.065	0.233	1.803
74	EL SAUCILLO	IG-097	POZO	-100.330	22.084	20.5	7.86	808	14	320	854	600	240.00	301	53	7	88	19.6	0	292.8	29.0	28	27.25	0.42	17.14	-3.706	23310	11.56	-0.081	0.653	5.606	6.684	1179	30.95	0.092	-0.151	1.912
72	ALLENDE	IG-037	NORIA	-100.386	22.148	22.1	8.70	810	7	327	849	600	300.00	336	42	5	83	31.2	0	366.0	15.3	61	7.5	0.68	12.01	1.743	25740	17.44	0.191	1.094	3.235	59.06	434.5	76.74	1.082	0.189	3.801
67	LOS MORES	IG-004	NORIA	-100.517	22.206	21.0	7.80	455	3	292	452	320	224.00	165	38	7	52	8.4	11	250.1	10.7	29	1	0.44	8.469	1.04	12230	7.296	4.26	0.628	14.67	48.75	764.9	100.4	0.321	-0.075	1.804
69	JAGUEY	IG-012	POZO	-100.454	22.227	24.5	8.05	551	24	330	578	400	276.00	229	47	8	59	19.9	11	313.5	10.7	30	4.6	0.8	6.963	24.38	18110	16.81	3.528	0.865	2.761	133.5	1615	230	0.193	0.01	2.478
51	SEMINARI	IG-057	POZO	-100.412	22.036	23.9	7.43	449	2	264	473	335	209.00	148	36	6	41	11.1	11	231.8	9.1	29	2.4	0.44	4.425	12.64	11170	5.886	1.112	55.1	1.827	34.92	423.8	124	0.178	5.479	1.471
50	PUNTE PI	IG-101	POZO	-100.487	22.024	33.9	7.75	675	3	293	689	490	237.50	298	39	5	56	38.4	11	266.6	9.1	114.5	2.2	0.76	10.43	1.416	17750	5.665	0.717	8.632	2.863	35.08	320.8	110.7	0.056	1.382	1.139
52	GASOLINE	IG-056	POZO	-100.417	22.025	24.1	8.23	458	11	340	491	345	228.00	186	38	6	56	11.2	0	278.2	7.6	30	5.4	0.43	13.36	15.58	19260	6.998	2.078	2.167	3.404	26.77	326	100.3	0.056	0.659	0.988
55	ARMADILLO	IG-111	MANAN	-100.651	22.233	22.8	7.70	584	2	335	556	390	190.00	212	38	4	65	12	0	231.8	9.6	32	8.2	0.28	6.172	-1.913	16420	19.25	-0.031	0.285	3.43	72.82	574.1	126.9	0.058	-0.011	1.677
64	PASO DEL	IG-005	MANAN	-100.589	22.274	24.1	7.66	377	2	357	397	280	195.50	160	43	6	28	22	0	238.5	7.4	14	6.7	0.38	12.95	-1.292	14610	10.71	0.11	0.988	2.287	97.71	944.1	132.3	-0.048	0.012	1.929
66	SAN NICO	IG-008	NORIA	-100.553	22.254	24.0	8.85	309	7	293	334	230	147.50	126	41	6	39	7	0	180.0	8.2	17	6.7	0.03	65.05	118.9	25710	38.59	3.331	1.139	13.09	133.7	1311	110.6	-0.052	1.375	5.335
68	OJO DE AGUA	IG-010	NORIA	-100.499	22.192	24.5	7.31	531	7	275	553	390	211.00	212	40	5	60	15	0	257.4	7.4	67	3.6	0.03	8.29	1.848	14190	8.527	0.348	0.247	8.037	53.14	700.6	118.3	-0.06	0.02	1.94

Hidrogeoquímica

Tabla a exportar para hacer hidrogeoquímica en AquaChem

SampleID	Location	X	Y	pH	Temp	Cond	TDS	Na	K	Mg	Ca	Mn	Li	Pb	Sr	Cu	Ba	Cl	SO4	HCO3	CO3	NO3	F	Al	As	Si	Br	U	V	Hg
IG-079	7.-OCAMPO	-100.3677778	22.13277778	7.73	16.3	749	524	54	5	21	47	2.189	54.93	0.066	3370	2.282	23.52	29.78052	42	328.18	0.5	12.84	0.41	0.5	13.04	11.24	19.18	0.855	1.261	0.36
IG-075	49.-LA VENTILLA	-100.4075	22.98694444	7.26	31.3	629	435	149	5.9	5.08	16	0.103	44.73	0.0425	410.8	0.261	73.69	11.55768	21	401.38	0.5	3.98	0.34	4.437	6.032	18.4	41.43	0.856	7.359	0.111
IG-101	50.-PUENTE PRIETO	-100.3755833	21.99025	7.07	33.9	1816	1290	39	5.7	48.38	255	0.717	10.43	1.382	320.8	8.632	110.7	10.88407	725	251.93	0.5	6.642	2.19	1.416	2.863	17.75	35.08	1.139	5.665	0.056
IG-067	51.-SEMINARIO	-100.4869444	22.02388889	7.1	23.9	279	200	25	7.7	3.76	35	1.112	4.425	5.479	423.8	55.1	124	6.806976	17	134.2	0.5	17.27	0.39	12.64	1.827	11.17	34.92	1.471	5.886	0.178
IG-066	52.-GASOLINERA	-100.4122222	22.03555556	7.02	24.1	319	235	24	8.5	6.32	25.59	2.078	13.36	0.659	326	2.167	100.3	8.15419	17	140.3	0.5	26.12	0.4	15.58	3.404	19.26	26.77	0.988	6.998	0.056
IG-103	53.-ATOTONILCO	-100.3603056	21.99583333	7.22	20.3	333	265	38	5.5	1.94	33.81	0.25	21.54	0.077	268	0.45	35.11	8.15419	16	170.8	0.5	29.22	0.51	0.5	2.071	13.3	48.31	0.398	12.21	0.196
IG-054	54.-ARMADILLO DE LOS INFANTES	-100.6536111	22.24861111	7.12	31.2	602	420	34	7.54	8.7	82.8	0.615	9.967	0.488	818.2	5.75	107	15.3157	33	305	11.28	19.04	0.35	3.446	15.45	13.77	87.71	1.424	13.28	0.178
IG-111	55.-ARMADILLO (MANANTIAL)	-100.6506389	22.23222222	7.16	22.8	570	400	35	9.1	22.3	59	0.25	6.172	0.0065	574.1	0.285	126.9	12.05402	2	366.61	0.5	18.6	0.4	0.5	3.43	16.42	72.82	1.677	19.25	0.058
IG-052	56.-SAN MIGUEL	-100.6091667	22.21833333	7.1	28	710	515	33	4.1	20.5	80	90.83	10.59	0.062	690.5	0.848	226.4	10.70681	10	389.79	0.5	4.87	0.77	5.833	1.76	20.81	75.47	2.027	11.29	0.075
IG-106	57.-ARROYO HONDO	-100.6155556	22.26766667	7.1	23.9	600	408	28	5.89	8.1	90.1	0.102	7.033	0.327	787.6	1.494	118.5	12.23129	31	332.45	0.5	12.4	0.32	1.642	15.74	13.76	70.12	1.58	9.878	0.19
IG-005	64.-PASO DEL AGUILA	-100.5886111	22.27388889	7.23	24.1	629	435	49	10	9.3	84	0.11	12.95	0.012	944.1	0.988	132.3	35.13392	44	313.54	0.5	17.71	0.59	0.5	2.287	14.61	97.71	1.929	10.71	0.25
IG-022	65.-BARRANCAS	-100.5513889	22.21583333	7.09	16.3	609	415	27	5	13	72	2.772	7.909	0.123	565.6	1.777	106.5	10.67135	36	329.4	0.5	3.54	0.38	33.74	0.789	10.04	7.106	1.065	6.3	1.124
IG-008	66.-SAN NICOLAS TOLENTINO	-100.5528889	22.25455556	7.1	24	706	480	77	25	8.6	70	3.331	65.05	1.375	1311	1.139	110.6	21.37816	53	301.95	0.5	43.3	1.43	118.9	13.09	25.71	133.7	5.335	38.59	0.25
IG-004	67.-LOS MORENO	-100.5169444	22.20611111	7.25	21	584	400	54	8	9.8	66	4.26	8.469	0.0375	764.9	0.628	100.4	18.3292	49	266.57	11.4	3.1	0.76	1.04	14.67	12.23	48.75	1.804	7.296	0.321
IG-010	68.-OJO DE AGUA	-100.4994444	22.19166667	7.12	24.5	575	400	45	7	9.6	82	0.348	8.29	0.02	700.6	0.247	118.3	13.75576	38	325.13	22.8	8.41	0.54	1.848	8.037	14.19	53.14	1.94	8.527	0.25
IG-012	69.-JAGUEY	-100.4538889	22.22722222	7.08	24.5	854	600	53	7	19.6	88	3.528	6.963	0.01	1615	0.865	230	29.03601	28	292.8	0.5	120.67	0.42	24.38	2.761	18.11	133.5	2.478	16.81	0.193
IG-013	70.-LOS NOGALES	-100.40325	22.15805556	7.15	24.4	849	600	42	5	31.2	83	0.842	11.02	0.269	1199	6.443	158.8	15.28024	61	366	0.5	33.21	0.68	29.13	4.535	25.26	55.6	3.356	32.41	0.149
IG-019	71.-GOLONDRINAS	-100.3943056	22.32594444	7.03	22.3	452	320	38	7	8.4	52	65.05	3.898	0.405	564.7	1.549	140	10.67135	29	250.1	11.4	4.42	0.44	52.46	4.412	10.55	59.53	0.575	2.557	0.044
IG-037	72.-ALLENDE	-100.3858333	22.14777778	7.17	22.1	578	400	47	8	19.9	59	0.191	12.01	0.189	434.5	1.094	76.74	10.67135	30	313.54	11.4	20.37	0.8	1.743	3.235	25.74	59.06	3.801	17.44	1.082
IG-093	73.-EL PARAISO	-100.3427778	22.10527778	7.25	23.2	473	335	36	6	11.1	41	0.37	3.719	0.049	364	1.015	22.17	9.146874	29	231.8	11.4	10.62	0.44	1.186	3.453	11.09	39.18	1.56	6.43	0.489
IG-097	74.-EL SAUCILLO	-100.3297222	22.08361111	7.18	20.5	689	490	39	5	38.4	56	0.25	17.14	0.0755	1179	0.653	30.95	9.146874	114.5	266.57	11.4	9.74	0.76	0.5	5.606	23.31	6.684	1.912	11.56	0.092
IG-098	75.-EL SERMON	-100.3125556	22.07883333	7.28	26.1	491	345	38	6	11.2	56	0.517	6.044	0.233	405	2.269	120.7	7.622395	30	278.16	0.5	23.91	0.43	7.254	4.159	16.42	28.56	1.803	8.532	0.065
IG-095	76.-MOJARRAS DE ARRIBA	-100.2713889	22.16083333	7.04	22.7	556	390	38	4	12	65	0.74	5.513	0.125	621.7	1.297	105	9.57231	32	231.8	0.5	36.31	0.28	0.129	4.736	11.29	29.96	1.375	5.622	0.234
IG-108	77.-OJO DE AGUA DE SAN JUAN	-100.40625	22.04619444	7.26	26.7	397	280	43	6	22	28	0.426	8.198	0.29	511	3.105	69.6	7.44513	14	238.51	0.5	29.67	0.38	9.047	6.854	19.19	41.18	1.297	29.78	0.14
IG-109	78.-RANCHO NUEVO	-100.4189722	22.0595	7.2	18.6	334	230	41	6	7	39	2.433	5.414	0.09	243.6	1.582	85.58	8.15419	17	179.95	0.5	29.67	0.03	27.25	2.102	16.36	21.59	0.613	4.439	1.224
IG-065	79.-SANTA CATARINA	-100.4427778	22.05194444	7.11	20	553	390	40	5	15	60	0.25	21.93	0.0675	286.4	0.187	47.23	7.44513	67	257.42	0.5	15.94	0.03	0.5	3.301	17.49	41.29	0.456	14.2	0.152
IG-200	ATOTONILCO	-100.4429247	21.99264155	6.8	19	637	343	27.27	8.48	20.6	96	0.549	50.53	0.32	748.6	3.225	183.4	25	22	356.52	0.5	24.35	0.03	2.2	2.761	0.5	29	3.968	16.16	0.631
IG-205	ATOTONILCO	-100.422392	22.02079469	7.2	25	489	386	16.57	3.48	17.6	75.1	0.561	3.382	0.0388	655.1	0.898	173.3	12.5	60	244	0.5	25.68	0.03	2.1	1.142	0.5	37.41	2.495	12.39	0.568
IG-208	ATOTONILCO	-100.4181259	22.02529374	6.9	24	310	240	16.8	4.23	8.6	36.2	1.782	3.932	0.666	360.8	8.557	85.65	7.81	14	154.87	0.5	34.1	0.03	3.2	2.264	0.5	31.28	0.817	17.45	0.578
IG-210	SAUCE	-100.355612	21.92639031	6.5	14	232	210	8.8	2.65	3.7	48	0.437	2.859	0.122	213.3	0.132	47.32	7.81	18	160.64	0.5	4.428	0.03	2.1	0.174	0.5	0.959	1.154	1.59	0.544
IG-211	SANTA CATARINA	-100.4733879	22.06130583	6.5	21	311	240	5.53	2.33	6.3	54.8	1.803	4.6945	0.1115	137.8	0.174	58.37	9.37	8	209.71	0.5	3.98	0.03	2.3	1.441	0.5	4.747	0.91	2.94	0.455
IG-212	PASO DE SAN ANTONIO	-100.3781434	22.01609648	6.8	26	405	303	14.95	3.46	6.7	72	1.556	2.2745	0.012	293.1	3.725	185.1	9.37	20	224.72	0.5	27.45	0.03	2.0	3.395	0.5	36.15	5.74	3.28	0.5
IG-213	PASO DE SAN ANTONIO	-100.3693199	22.01119343	6.9	23	398	303	8.05	3.46	6.7	72.9	0.077	4.083	0.095	197.4	0.365	188.6	7.81	20	226.98	0.5	27.45	0.03	1.5	2.653	0.5	17.86	2.929	2.59	0.437
IG-214	SANTA CATARINA	-100.4291853	22.04614399	6.5	27	330	267	20.86	4.71	7.2	46.6	40.860	9.686	0.98	379.6	3.561	95.33	7.81	22	180.03	0.5	23.47	0.03	205.8	2.884	0.5	26.09	1.615	12.31	0.981

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón-López, F. U., (2006), Inventario físico de los recursos minerales del municipio Armadillo de los Infante, S. L. P., SGM, Gerencia Regional Centro. 104 p.
- Alencaster-Ibarra, G., Torres-Hernández, J. R., Tristán-González, M., Barboza-Gudiño, R. López- Doncel, R., Pons J. M., y Omaña, I., (1999), El Abra formation in the western part of the Valles-San Luis Potosí Platform (México). Fifth international congress on rudists. Abstracts and field trip guides. Erlanger geol. Abh., sonderband 3: 7-8p.
- American Public Health Association: *Standard methods for the examination of water and wastewater*. A.P.H.A. Washington (1975).
- Aparicio-Mijares, F. J., (1999), Fundamentos de Hidrología de Superficie, Editorial, Limusa, México, 303 p.
- APHA AWWA, WPCF, (1975), Standar methods for the examination of water and astewater. 14th edition. American public health association. Washington. 1193p.
- Appelo, C.A.J. y Postma, D., (1996), *Geochemistry, groundwater and pollution*. Edit. Balkema, 536 p.
- Aqua Chem (Waterloo Hydrogeologic), (1997). Version 3.7.42
- Aranda-Gómez, J. J., Labarthe-Hernández, G., (1977), Estudio geológico de la Hoja Villa Hidalgo, S. L. P., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto técnico No. 53, 58 p.
- Aranda-Gómez, J. J., Luhr, J. F., Pier, J. P., (1993), Geología de los volcanes cuaternarios portadores de xenolitos del manto y de la base de la corteza en el estado de San Luis Potosí, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 106, p. 1-22.
- Aranda-Gómez, J. J., McDowell, F. W., (1949), Paleogene extension in the southern Basin and Range province of Mexico: Syndepositional tilting of Eocene red

beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining District: International Geology Review, 40(2), 116-134p. Área. In Hemphill, D.D. (Editor), Trace substances in environmental health. XIV.

Armienta-Hernández, E. K., Zamora y Juárez, F., (1987), Manual para el análisis químico de aguas naturales, en campo y laboratorio. Comunidades técnicas. Serie Docencia y Divulgación, Núm. 4. México D.F. Instituto de Geofísica de la UNAM, 86p.

Barboza-Gudiño, R., (2002), carta Geológico-Minera y Geoquímica Villa Hidalgo (F-14-A-74), escala 1:50,000, realizada en convenio entre el Consejo de Recursos Minerales y el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Barboza-Gudiño, R., Torres-Hernández, J. R., Rodríguez-Ríos, R., Tristán-Capetillo, L. C., García-Pérez, K., Saucedo-Girón, R., (2008), Carta geológico-minera y geoquímica Santa Catarina clave F14-A85, escala 1:50,000, S.L.P.

Carrillo-Bravo, J., (1971), La Plataforma Valles - San Luis Potosí: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 23, p. 1-102.

Carrizalez-Águilar, A., (2006), Inventario físico de los recursos minerales del municipio de San Nicolás Tolentino, S.L.P., SGM, 74p.

Chow, V., Maidment, D. y Mays, L., (2000), Hidrología Aplicada, Editorial, Nomos, S.A., Colombia, 584 p.

CONAGUA, (2007), Subdirección General Técnica Actualización Geohidrológica en los acuíferos Cedral-Matehuala, y Cerritos-Villa Juárez, San Luis Potosí.

CONAGUA, (2011), Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero San Nicolás Tolentino (2416) estado de San Luis Potosí. UASLP.

CONAGUA, (2011), Diario Oficial, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de evaluación y ordenamiento de Acuíferos.

Cserna-Gombos E., Bello B. A., (1963), Geología de la sierra de Álvarez, municipio de Zaragoza, estado de San Luis Potosí. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Bol. 71, 23-63p.

- Custodio, E. y Llamas, M., (1976), Hidrología Subterránea, Editorial, Omega, España, 299-305p.
- Davis, S. N., y F.R. Hall, (1959), Water quality of eastern Stanislaus and northern Merced counties, California: Stanford University Publications in Geol. Sciences, v. 6, No.1, 112p.
- Davies, S.N. y De Wiest, R. J. M., (1971), Hidrología, Ariel, Madrid.
- Debye P., and Hückel E., (1923), The theory of electrolytes. I. Lowering of freezing point and related phenomena. (PDF). *Physikalische Zeitschrift*, 24: 185-206.
- Edmunds W. M., Darling W. G., Kinniburgh D.G., Dever L., Vachier P. (1992), Chalk groundwater in England and France: hydrochemistry and water quality. Report SD/92/2. British Geological Survey.
- Enos P., (1974), Reefs Platforms and basins of Middle Cretaceous in Northeast Mexico. *AAPG Bulletin*, 58(5): 800 – 809.
- Estadísticas climatológicas básicas del estado de San Luis Potosí en el período de (1961-2001).
- Ferrusquilla-Villafranca, I., Ruiz-González, J., Torres-Hernández, J. R., and Martínez-Hernández E., (2000), Depositional systems of the San Nicolás Unit, Peotillos Graben, Sierra Madre Oriental at San Luis Potosi, Central-East México: A first approach, Geological Society of America, Annual Meeting & Exposition, Abstract with Programs, Paper No. 227-12CD.
- Fitts, (2002), *Groundwater Science*, Academic, San Diego, Calif.
- Fosters', (1992-2003), Annual Report, available at: [www. Fosters.com.au](http://www.Fosters.com.au) (accessed 5 March 2004).
- Francisco J., Aparicio-Mijares, (1992), *Fundamentos de Hidrología de superficie*, editorial Limusa, 1:19-25.
- García E., (1973), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. 4ta. Ed. Offset Larios. Nacional Autónoma de México. C.U. México, D.F. 246p.
- Garza-Blanc, (1978), *Cartografía geológica Santa Catarina, S.L.P.* Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 61, 37 p.

- González-Grijalva, M. D., Castro-Larragoitia, J., (2009), Evolución espacio temporal de la calidad del agua subterránea en el acuífero Cedral-Matehuala. UASLP. 1p.
- Henry C. D., y Aranda-Gómez, (1992), The real southern Basin and Range: mid-to late Cenozoic extension in Mexico: *Geology*, 20, 701-704p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2002), Estudio Hidrológico del estado de San Luis Potosi.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2009), Estudio Hidrológico del estado de San Luis Potosi.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2010), Estudio Hidrológico del estado de San Luis Potosi.
- Jenne, E.A., Ball, J.W., Vivit, D.V., y Barks, J.H. 1980. Geochemical modelling apparent
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., (1978), Cartografía Geológica hoja San Luis Potosí.- 34 S., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 59.
- Labarthe-Hernández, G., Sánchez-Pérez, M., Vázquez-Guillen, M., (1999), Mapa Geológico del Volcán de Atotonilco, S. L. P., México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 125.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aranda-Gómez, J. J., (1982), Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí.- 205 p., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 85.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., (1984), Cartografía Geológica 1:50,000 Salitrera, S.L.P., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 94, 85 p.
- Lloyd, J.W. and Heathcote, J.A., (1985), Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater, an introduction. Clarendon Press, Oxford.
- López-Doncel, R., (2000), La brecha calcárea de la Sierra del Coro como un indicador de la dinámica de la margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis.
- López-Doncel, R., (2003), La Formación Tamabra del Cretácico medio en la Porción Central del Margen Occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 20, núm. 1, 1-19p.

- López-Doncel, R., Rodríguez-Hernández, (2004), Control litológico de los depósitos alóctonos en una zona de transición Plataforma-Cuenca.- IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Juriquilla, Qro., 118p.
- López-Doncel, R., (2007). Cartografía geológica minera de la Hoja Peotillos, S.L.P. Servicio Geológico Mexicano
- López-Doncel, R., Rodríguez-Hernández, Cruz-Márquez y Barbosa-Gudiño, R., (2009), Analisis sedimentológico – facial de clastos formadores de brechas calcáreas cretácicas de la zona transicional plataforma – cuenca en el centro de México Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 26, Núm. 3: 687-708p.
- Maldonado-Lee, (2006), Inventario físico de los recursos minerales del municipio Río Verde, S.L.P., SGM, 98p.
- Maderey-Rascon y Carrillo-Rivera, (2005), El recurso agua en México, un analisis geográfico 1.2.3. Instituto de Geografía UNAM, Ciudad Universitaria Del. Coyoacán, 04510 México, D.F. www.igeograf.unam.mx
- Medina-Rivero, F., (1965), Estudio Geohidrológico de la Región Norte de San Nicolás Tolentino, S.L.P., Universidad Autónoma de San Luis Potosi, Instituto de Investigación de Zonas Desérticas.
- Michael-Price, (2003), Agua Subterránea, Editorial Limusa, 10:142-171
- Mohr-Friedrich, (1836), Lehrbuch der chemisch-analytischen Titrimethode. Zahlreich weiter Auflagen.
- Myers R., (1968), Biostratigraphy of the Cardenas Formation (Upper Cretaceous) S.L.P., México. Instituto de Geología, UNAM, México paleontología Mex. No. 24, 1-89p.
- Nieto-Samaniego, A. F., Alanís A. S. A., Labarthe-Hernández, G., (1997), La deformación cenozoica poslaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 14, 13-25p.
- NOM-011-CNA-2000, la recarga de agua subterránea, establece la metodología para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- Parhurst, D.L., (1995), User's guide to PHREEQC- a computer program for Speciation, reaction path, advective-transport and inverse geochemical calculations Us Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rep 99-4529.

- Pichardo-Barrón, Y., (2006), Microfacies carbonatadas del Cretácico en el margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, centro – noreste de México. Tesis de Maestría (DEA), Universidad Autónoma de Barcelona, España, Departamento de Geología, Unidad de Paleontología, 79 p.
- Piper A. M., (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Am. Geophysical Union Trans. Vol. 25, 914-923p.
- Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, (2009), San Nicolás Tolentino, San Luis Potosí, Clave geoestadística, 24030.
- Raisz E., (1964), Landforms of Mexico, 2a edition. Geography branch of the office of Naval Research, Cambridge, Mass., mapa con texto.
- Rodríguez-Ríos, R., (2004), Un modelo petrogenético del volcanismo bimodal en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. Proyecto PROMEP PTC-36, 56 p.
- Ross M. A., (1979), Stratigraphy of the Tamaulipas Limestone Northeastern, Mexico: M. S. Thesis, Univ. of Texas at Arlington, 96 p.
- Sánchez-González, J. A., (2007), Inventario físico de los recursos minerales de Villa del municipio Zaragoza, S.L.P., SGM, 90p.
- Stanley N. Davis y Roger J.M. de Wiest, (1971), "HIDROGEOLOGIA": BARCELONA, 138-177p.
- Stewart, J. H., (1978), Basin and range structure in western North America: A review. GSA Memoir 152, p. 1-31.
- Stiff , H. A., (1951), The interpretation of chemical water analysis by means of patterns: Jour of petrol. Teach., v.3, No.10, Technical Note 84, 15-16p.
- Thornthwaite, C. W., (1948), An approach toward a rational classification of climate. Geographical Rev. 38(1): 55-94
- Torres-Hernández J. R., Tristán-González, M., (1994), Evolución estructural de la sierra de Guadalcázar, San Luis Potosí. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, 94 p. No publicada.
- Torres-Hernández , J. R., Tristán-González, M., (2000), Carta geológico-minera Guadalcázar F14-A-65. CEDOCIT, Servicio Geológico Mexicano, Gerencia Regional Centro.

- Tóth, J, (1962). A teory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. *J. of Geophysial Res.* 67(11)4375-4387
- Tóth, J, (1995). Hydraulic in large sedimentary basins. *Hydrogeol. J.*, 3(4)4-16
- Tóth, J, (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico Minero*, 111(4), 9-26p.
- Tristán-González, M., Aguillón-Ramos, A., Barboza-Gudiño, R., Torres-Hernández, J. R., Hervé B., López-Doncel, R., Rodríguez R. R., y Labarthe-Hernández, G., (2009), Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el campo volcánico de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. 61, No. 2, 287-303p.
- Turc, L., (1961), Evaluation des besions en equ d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. *Ann. Arg.*, 12, 13-49p.
- Van-Lanen, A.J. H. y Carrillo-Rivera, J. J., (1998), "Framework for groundwater monitoring in (semi-arid) region", UNESCO, Monitoring for groundwater management in (semi-)arid regions. *Studies and reports in hydrology* 57; 7-22p.
- Venegas R., O. Umnova, and D. Tsiklauri, (2009), Effect of boundary slip on the acoustical properties of microfibrus materials, *jornal of the Acoustical Society of America*, 126(4), 1850-1860p.
- Wilcox, J. C, (1967), Effect of soil texture net evapotranspiration and other factor son irrigation requeriments of orchards as determination by a scheduling procedure. *Can. Journal soil sci.*, 47, 147-156p.
- Xu, S., Nieto-Samaniego, A.F., Alanís-Alvarez, S.A., (2004), Powerland dsitribution of normal fault displacement and length and estimation of extensional atrain due to normal faults: A case study of te Sierra de San Miguelito, México: *acta Geologica Sinica*, 79 (1), 36-49p
- Zapata-Zapata, J. L., Pérez-Venzor, J. A., (1979), *Cartografía Geológica Hoja Peotillos*, S.L.P, Folletos Técnicos publicados por el Instituto de Geología y Metalurgia,