

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Desarrollo de la metodología MEPAM para la de-
terminación de la conexión hidráulica entre una
zona de recarga y una de descarga, caso Joya de
Luna y Guaxcamá, San Luis Potosí.**

Tesis que presenta

Sonia Torres Rivera

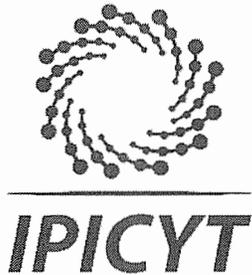
Para obtener el grado de

Doctor(a) en Geociencias Aplicadas

Director: Dr. José Alfredo Ramos Leal

Codirector: Dr. Pablo Dávila Harris

San Luis Potosí, S.L.P., 19 de Octubre de 2018



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis **“Desarrollo de la metodología MEPAM para la determinación de la conexión hidráulica entre una zona de recarga y una de descarga, caso Joya de Luna y Guaxacamá, San Luis Potosí”** presentada para obtener el Grado de Doctora en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **Sonia Torres Rivera** y aprobada el diecinueve de octubre del dos mil dieciocho por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Alfredo Ramos Leal
Codirector de la tesis

Dr. Pablo Dávila Harris
Codirector de la tesis

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Miembro del Comité Tutorial

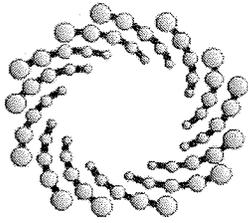
Dr. Germán Santacruz de León
Miembro del Comité Tutorial

Dr. Ulises Rodríguez Robles
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

- Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Laboratorio Nacional de Investigaciones de Nanociencias y Nanotecnología (LINAN), de la División de Nanociencias y Materiales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LAN-BAMA) donde se hizo análisis de los isótopos de agua en el Espectrómetro Laser Isotópico (Picarro L1102-i), del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Laboratorio de Aguas Subterráneas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), S.A de C.V.
- Herbario Isidro Palacios de Zonas desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), S.A. de C.V.
- Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (No. 130592) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 005 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Doctorado en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 19 días del mes de octubre del año 2018, se reunió a las 17:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Noel Carbajal Pérez	Presidente	IPICYT
Dr. Pablo Dávila Harris	Secretario	IPICYT
Dr. Germán Santacruz de León	Sinodal externo	COLSAN
Dr. José Alfredo Ramos Leal	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

DOCTORA EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó la C.

Sonia Torres Rivera

sobre la Tesis intitulada:

Desarrollo de la metodología MEPAM para la determinación de la conexión hidráulica entre una zona de recarga y una de descarga, caso Joya de Luna y Guaxcamá, San Luis Potosí

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. José Alfredo Ramos Leal
Dr. Pablo Dávila Harris

El Jurado, después de deliberar, determinó

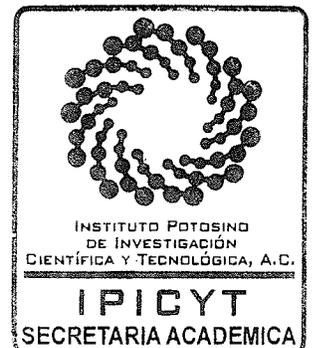
APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 18:45 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 19 días del mes de octubre de 2018.

Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado

Dr. Horacio Flores Zúñiga
Secretario Académico



Dedicatorias

A mi esposo David Pozos Salinas

Porque he tenido suerte de encontrarte en mi vida. Me siento realmente dichosa de tener tu amor, agradecida con Dios por enviarte cual ángel a mi vida y agradecida contigo por llenarme de alegría, de amor, de ternura, de todo lo bueno y tu gran apoyo que hay en tu corazón. Gracias, mi amor, por amarme y aceptarme así como soy.

A mi madre (†)

Por educarme con tus valores. Por enseñarme a usar los "buenos días", las "buenas tardes", el "hasta luego" y las "gracias". Por inculcarme el respeto a los mayores y a tratar a la gente con amabilidad. Por acostumbrarme a pedir permiso, a saludar con una sonrisa y amar a las personas por lo que son y no por lo que tienen. Por enseñarme a ser feliz con lo que tengo y con lo que puedo obtener. Gracias por sacar lo mejor que había en mí.

A mi hijo (a)

Ha mi bebe que naciste durmiendo y no pude llevarte a casa. Pequeño(a) pudiste haber tenido a esta fecha casi 6 años. Descansa en el cielo

A mis tías

Que me abrigan con todo el amor que pueda brindar una madre: Virginia, Margarita (†) y tía Fabiola eres lo más parecido que pude sentir a una maternidad. Ya casi 16 años en los que puse tan poco sacrificio y me llenó tanto mi vida, un pequeño dolor para luego además verte recompensada con creces.

A mis hermanos

Mi familia Fabiola, Miguel, Paty, Nora y Hugo ustedes son los regalos que Dios me dio para siempre, aunque los vea poco tiempo ahora que somos adultos ustedes siguen siendo el presente más dulces de mi niñez, los quiero.

Agradecimientos

Agradezco al Dr. José Alfredo Ramos Leal, mi asesor y guía durante el desarrollo del presente trabajo, por brindarme su comprensión, confianza y compartir conmigo su gran experiencia.

Agradezco a mi comité tutorial Dr. Pablo Dávila Harris, Dr. José Noel Carbajal Pérez, Dr. Germán Santacruz de León y Dr. Ulises Rodríguez Robles, por sus observaciones, que me han permitido fortalecer la información y mi confianza personal.

Agradezco a mi mejor amigo M. C. Simón Eduardo Carranco Lozada, por permanecer siempre a mi lado en todas las salidas a campo, por apoyarme en todo momento hasta el final y su gran amistad incondicional.

Dr. José Ramón Torres Hernández y Dr. Margarito Tristán Hernández (mi pa...) por su disponibilidad a ayudarme y darme los mejores consejos para mi vida profesional y en lo sentimental.

Agradezco a la Dra. María Elena García Arreola y al I.Q. Héctor Isidoro Solís Torres por su asesoramiento en el laboratorio de aguas subterráneas y su amistad.

A mis amigas (o) de IPICYT (María Mercedes Zavala Arriaga por su asesoramiento en el laboratorio de petrografía y María Guadalupe Ibarra por su amistad y comidas juntas, Víctor Mata por su atención a préstamos de libros de la biblioteca, Ángeles Martínez Ramírez, Lorena Elisa Sánchez Higuereado y Pradip Kumar Singh por hacer más amenos los momentos.)

A mis amigas (o) de UASLP Miguel Ángel Cortina Rangel, Nancy Araceli Rivera García e Isidro por el compañerismo y disponibilidad en laboratorio de Geoquímica, Ana Rocío Hernández García y Wendy Sánchez en sus asesorías y digitalización de mapas, Alma Lucia Sánchez Zavala por su valioso tiempo a ayudarme en los análisis químicos sobre todo en las diluciones de muestras en los fines de semana.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	I
Créditos institucionales	II
Acta de examen	III
Dedicatorias	IV
Agradecimientos	V
Contenido	VI
Lista de tablas	IX
Lista de figuras	X
Resumen	XII
Abstract	XV
1.- GENERALIDADES.	1
1.1.- Introducción.	1
1.2.- Antecedentes y estado del arte.	4
1.3.- Localización del área de estudio.	7
1.4.- Hipótesis.	12
1.5.- Objetivo General.	12
1.5.1.- Objetivos específicos.	12
1.6.- Justificación.	13
2.- MARCO TEORICO.	16
2.1.- Evolución hidrogeoquímica.	16
2.2.- Sistema de flujo	22
2.3.- Isotopos estables de agua subterránea.	27
2.4.- Polinización	30
3.- MATERIAL Y METODOS.	33

3.1.- Metodología de la hidrogeología en San Nicolás Tolentino.	33
3.2.- Metodología de polínica ambiental (MEPAM).	37
3a).- Polínica ambiental directamente de la vegetación.	39
3b).- Captura de polen en agua subterránea.	44
3c).- Caracterización de isotopos hidrológicos de ^{18}O y ^2H .	49
4.- MARCO GEOLOGICO	51
4.1.- Marco Geológico Regional.	51
4.2.- Estratigrafía.	55
4.2.1.- Formación Guaxcamá (Aptiano).	55
4.2.2.- Formación El Abra (Albiano-Cenomaniano).	57
4.2.3.- Formación Cárdenas (Campaniano-Maastrichtiano).	59
4.2.4.- Basalto (Pleistoceno Tardío).	61
4.2.5.- Aluvión (Holoceno).	62
4.3.- Geología Estructural.	65
5.- HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA	67
5.1.- Unidades Hidroestratigráficas.	68
a).- Formación Guaxcamá (Knap Y-Ah).	69
b).- Formación El Abra (KassCz).	69
c).- Formación Cárdenas ((KcmLu-Ar).	71
d).- Rocas Basálticas (ToTq).	71
e).- Aluvión (Qhoal).	71
5.2.- Unidades permeables.	72
5.3.- Unidades de escasa permeabilidad y no permeables.	72
5.4.- Comportamiento hidrogeológico.	73
6.- RESULTADOS	77
6.1.- Sistema San Nicolás Tolentino.	77
6.1.1.- Hidrogeoquímica y calidad del agua del Sistema San Nicolás Tolentino.	79
6.2.- Discusión.	85
6.3.- Sistema Joya de Luna-Guaxacamá.	88
6.3.1.- Hidrogeoquímica y calidad del agua del sistema Joya de Luna-Guaxacamá.	91
6.3.2.- Palinología Sistema Joya de Luna-Guaxacamá.	99
6.3.3.- Polínica ambiental directamente de la Vegetación.	99
6.3.4.- Captura de polen en agua subterránea.	105
6.3.5.- Isotopos estables hidrológicos del sistema Joya de Luna-Guaxacamá.	112

6.4.- Discusión.	114
6.4.1.- Polínica ambiental en agua subterránea y captura de polen.	114
6.4.2.- Isotopos hidrológicos del sistema Joya de Luna-Guaxcamá.	116
7.- CONCLUSIONES.	120
7.1.- Conclusiones de San Nicolás Tolentino.	120
7.2.- Conclusiones de Joya de Luna-Guaxcamá.	120
REFERENCIAS.	123
ANEXOS	

Lista de tablas

Tabla 1.- Clasificación de trazadores, que se distinguen por su aplicación.	6
Tabla 2.- Toma de muestra de agua subterránea en los diferentes aprovechamientos: Joya de Luna, Buenavista/ Puerta del Río, Guaxcamá y San Nicolas Tolentino.	35
Tabla 3.- Puntos de muestreo de agua subterránea y captura de polen.	47
Tabla 4.- Resumen del resultado de los parametros de campo in-situs.	89
Tabla 5.- Resumen de análisis químicos de Julio 2013 a Mayo 2014.	89
Tabla 6.- Familias de agua subterránea.	91
Tabla 7.- Taxonomía de las plantas.	100
Tabla 8.- Base de datos de las especies halladas en el área de estudio 2013-2016.	106
Tabla 9.- Conteo e identificación de polen en el agua subterránea (zona de recarga-descarga) periodo 2013-2016. Las especies utilizadas como trazadores están marcadas con negritas.	108
Tabla 10.- Presencia y ausencia de especies en diferentes puntos de muestreo siguiendo la ruta (G2). las celdas con achurado indican las especies que fueron utilizadas como trazadores.	111

Lista de figuras

CAPITULO 1	
Figura 1.1.- Localización del área de estudio.	10
Figura 1.2.- Vegetación dominante en el area de estudio INEGI (2005).	11
CAPITULO 2	
Figura 2.1.- Sistemas de flujo (Tóth, 2000).	26
Figura 2.2.- Línea de agua meteórica global (GMWL).	30
Figura 2.3.- Polinización indirecta.	31
CAPITULO 3	
Figura 3.1.- Analisis preliminar de las direcciones de flujo en Joya de Luna, Buenavista/Puerta del Río.	36
Figura 3.2.- Geología y localización de los puntos de muestreo de agua y polen en Joya de Luna-Guaxcamá.	38
Figura 3.3.- Diagrama de flujo de la metodología MEPAM.	40
Figura 3.4.- Cosecha de polen directo de la flor.	41
Figura 3.5.- Preparación de muestras de polen cosechado directo de la flor.	43
Figura 3.6.- Caracterización morfológica de polen en el microscopio.	44
Figura 3.7.- Microscopio electrónico de barrido (MEB).	44
Figura 3.8.- Diferentes aprovechamientos de Joya de Luna-Guaxcamá.	47
Figura 3.9.- Descripción morfológica de polen.	49
CAPITULO 4	
Figura 4.1.- Localización del área de estudio, con respecto a la Sierra Madre Oriental y Plataforma Valles San Luis Potosí (modificado de Alaniz y Nieto, 2005).	52
Figura 4.2.- Distribución de las facies de la Formación El Abra (tomado de Carrillo, 1971).	53
Figura 4.3.- Localización del área de estudio como parte del campo volcánico del Río Santa María (CVRSM) y dentro de la plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP) (modificado de Labarthe <i>et al.</i> ,1989).	55
Figura 4.4.- Geología local de Joya de Luna-Guaxacamá.	63
Figura 4.5.- Columna estratigráfica de Joya de Luna-Guaxcamá.	64
CAPITULO 5	
Figura 5.1.- Corrientes superficiales en San Nicolás Tolentino y Joya de Luna-Guaxcamá.	74

CAPITULO 6

Figura 6.1.- Direcciones de flujo subterráneo de San Nicolás Tolentino	78
Figura 6.2.- Diagramas de Piper (1944): A) subcuenca I Santa Catarina, B) subcuencas II Ocampo Paraíso y III San Nicolás Tolentino.	80
Figura 6.3.- Sección hidrogeoquímica AA' y sección geológica BB'.	83
Figura 6.4.- Sección hidrogeoquímica de Armadillo de los Infante a Paraíso.	84
Figura 6.5.- Esquema de Gibbs (1970).	87
Figura 6.6.- Esquema de Mifflin (1968).	88
Figura 6.7.- Gráfica de balance iónico.	90
Figura 6.8.- Diagrama de Piper (1944).	93
Figura 6.9.- Distribución espacial de los diagramas de Stiff según la familia química.	95
Figura 6.10.- El modelo conceptual de Joya de Luna y Guaxcamá descarga hacia los manantiales de Buenavista.	98
Figura 6.11.- Polen encontrado en Joya de Luna y Guaxcamá.	107
Figura 6.12.- Especies Vs el número de polen a) zona de recarga y b) zona de descarga.	109
Figura 6.13.- Relaciones isotópicas del polen obtenido de la muestras de agua subterránea.	113
Figura 6.14.- D-excess (exceso de Deuterio) para muestras de agua subterránea de Joya de Luna-Guaxcamá.	118
Figura 6.15.- Mapa de lineamientos estructurales y rutas de migración de polen en el área de Joya de Luna-Guaxcamá.	119

Resumen.

Desarrollo de la Metodología Polínica Ambiental (MEPAM) para la determinación de la conexión hidráulica entre una zona de recarga y una de descarga, caso Joya de Luna y Guaxcamá, San Luis Potosí.

En la región Centro-Oriente de México existen zonas con extensos afloramientos de rocas calcáreas plegadas formando sistemas montañosos con intenso desarrollo cárstico. El abastecimiento de agua en esta región se logra en una parte importante a partir de acuíferos controlados por dichos sistemas, por lo que es importante entender el comportamiento y dirección de las corrientes de agua subterránea en los sistemas acuíferos de la región. En este trabajo se analiza el flujo subterráneo entre la localidad de Joya de Luna (municipio de Cerritos, San Luis Potosí) y Guaxcamá (municipio de Villa Juárez, S.L.P.) para analizar la posible conexión entre ambas zonas (recarga y descarga) por medio del uso de diversas metodologías, conocidas y nuevas.

Se propone la implementación de un método novedoso, eficaz y factible denominado MEPAM (Metodología Polínica Ambiental) para el estudio de conectividad de acuíferos en medios cársticos, en especial en la identificación de la conectividad entre la zona de recarga y de descarga, utilizando granos de polen como trazadores.

De manera complementaria, para contrastar y examinar la validación de este método se emplearon isotopos estables de Deuterio y Oxígeno-18; se empleó además el exceso de deuterio como un factor para el análisis hidrogeológico. Se documentó mediante un levantamiento de la vegetación presente en ambas zonas de estudio, en un radio de 5 km, el tipo de familias existentes en la zona de recarga Joya de Luna y la de descarga en Guaxcamá, y se generó una base de datos con 41 especies polínicas, para la caracterización morfológica. Posteriormente, se hizo una recolecta de 135 muestras de agua subterránea donde se encontraban suspendidos los granos de polen en los 15 diferentes aprovechamientos de norias y manantiales. El análisis de especies mostró que granos de polen de las especies de *Zea mays* (*Zeama*), *Avena sativa* (*Avesa*), *Cicer arietinum* (*Cicar*) y *Quercus sp.*, característicos solo de la zona de recarga se presentaban en la zona de descarga. Los resultados polínicos fueron congruentes con la técnica isotópica y el exceso de deuterio en donde se identificaron dos rutas con conexión hidráulica G1 y G2. La ruta G1 conecta a la muestra 11 de la zona de recarga y las muestras 1, 4 y 6 de la zona de descarga. La ruta G2 muestra la conexión hidráulica entre la muestra 15 de la zona de recarga y las muestras 5, 7 y 10 de la zona de descarga. En ambas zonas se presentaron granos de *Zeama*, *Avesa* y *Cicar*. El polen de la familia *Quercus sp.*, propio también de la zona montañosa alta, se detectó en las muestras de los puntos 11, 12 y 15 de la zona de recarga y en los puntos 1, 4, 5, 6, 7, 9 y 10 de la zona de descarga.

Adicionalmente, se documenta en este trabajo otro caso de flujo de agua subterránea con condiciones distintas, en las subcuencas de Santa Catarina y Ocampo-

Paraíso, en la zona media de San Luis Potosí, 40 km al sur de Joya de Luna, donde la caracterización hidrogeoquímica ha permitido identificar los tipos de aguas subterráneas y diversos procesos de interacción agua-roca. La composición del agua subterránea en cada una de estas cuencas refleja la disolución por el agua de lluvia de los minerales de carbonato y magnesio de las rocas carbonatadas de la Formación El Abra (Cretácico medio) y el flujo subterráneo a través de un medio granular con fuerte influencia de material volcánico. Las aguas de tipo Ca-HCO₃ y Ca-Mg-HCO₃ se modifican durante el flujo subterráneo mediante la incorporación de iones de Na⁺ y SO₄⁻.

Ambas metodologías han permitido identificar las direcciones de flujo subterráneo, la interacción agua-roca, además MEPAM permitió determinar la conectividad hidráulica entre Joya de Luna y Guaxcamá.

Palabras clave: acuíferos cársticos, conectividad hidráulica, trazador de polen ambiental, isotopos estables, hidrogeoquímica, mezcla de aguas, San Luis Potosí, Sierra Madre Oriental.

Abstract.

Development of the Environmental Pollination Methodology (MEPAM) for the determination of the hydraulic connection between a recharge and discharge zone in karstic aquifers: Joya de Luna and Guaxcama, San Luis Potosi.

In the Central-Eastern region of Mexico there are areas with extensive outcrops of folded calcareous rocks forming mountainous systems with intense karstic development. The water supply in this region is accomplished in an important part from aquifers controlled by these systems, so it is important to understand the behavior and direction of groundwater flows in the aquifer systems of the region. In this work, the underground flow between the town of Joya de Luna (municipality of Cerritos, San Luis Potosi) and Guaxcama (municipality of Villa Juarez, SLP) is analyzed to analyze the possible connection between both zones (recharge and discharge) of the use with different, known and new methodologies.

It is proposed the implementation of a novel, effective and feasible method called MEPAM (Environmental Poll Methodology) for the study of connectivity of aquifers in karst environments, especially in the identification of connectivity between the recharge and discharge zones, using grains of pollen as tracers. In a complementary way, stable isotopes of Deuterium and Oxygen-18 were used to contrast and examine the validation of this method; In addition, excess deuterium was used as a factor for the hydrogeological analysis. It was documented by means of a survey of the

vegetation present in both study zones, within a radius of 5 km, the type of families existing in the recharge zone Joya de Luna and the discharge in Guaxcama, and a database with 41 pollen species, for morphological characterization. Subsequently, a collection of 135 groundwater samples was made where the pollen grains were suspended in the 15 different uses of norias and springs. Species analysis showed that pollen grains of *Zea mays* (*Zeama*), *Avena sativa* (*Avesa*), *Cicer arietinum* (*Cicar*) and *Quercus sp.*, are characteristic species only of the recharge zone, were present in the discharge zone. The pollen results were consistent with the isotopic technique and the deuterium excess in which two routes with hydraulic connection G1 and G2 were identified. Route G1 connects to sample 11 of the recharge zone and samples 1, 4 and 6 of the discharge area. Route G2 shows the hydraulic connection between sample 15 of the recharge zone and samples 5, 7 and 10 of the discharge area. Grains of *Zeama*, *Avesa*, and *Cicar* were presented in both zones. The pollen of the family *Quercus sp.*, also typical of the high mountainous area, was detected in the samples points 11, 12 and 15 of the recharge zone and in points 1, 4, 5, 6, 7, 9 and 10 from the discharge area.

Additionally, another case of groundwater flow with different conditions is documented in this work, in the sub-basins of Santa Catarina and Ocampo-Paraíso, in the middle zone of San Luis Potosí, 40 km to the south of Joya de Luna, where the hydrogeochemistry characterization has allowed to identify the types of groundwater and various water-rock interaction processes. The composition of the groundwater in each of these basins reflects the dissolution by rainwater of the carbonate and

magnesium minerals of the carbonate rocks of the Formation El Abra (Middle Cretaceous) and the underground flow through a granular medium with strong influence of volcanic material. The waters of type Ca-HCO₃ and Ca-Mg-HCO₃ are modified during the underground flow by the incorporation of Na⁺ and SO₄⁻ ions.

Both methodologies have allowed to identify the directions of underground flow, the water-rock interaction, in addition MEPAM to determine the hydraulic connectivity between Joya de Luna and Guaxcama.

Keywords: karstic aquifers, hydraulic connectivity, environmental pollen tracer, stable isotopes, hydrogeochemistry, water mixture, San Luis Potosi, Sierra Madre Oriental.

1.- GENERALIDADES

1.1.- Introducción

El agua subterránea es un recurso estratégico en muchas regiones del mundo, en el caso de acuíferos cársticos, por sus características de capacidad para almacenar y transmitir agua, son considerados altamente sensibles a la contaminación. Así mismo, debido a que tienen una rápida infiltración, son buenas zonas de recarga y excelentes acuíferos (Antigüedad *et al.*, 2008). Los acuíferos cársticos son asociados principalmente a formaciones carbonatadas, las cuales se fracturan durante su proceso de deformación, y genera permeabilidad secundaria, facilitando el proceso de disolución en el carst (Kiraly *et al.*, 1979; Andreo *et al.*, 2004; Antigüedad *et al.*, 2008). En el acuífero cárstico, la permeabilidad primaria de las rocas carbonatadas reside en la propia matriz rocosa y es aumentada en gran medida durante la deformación de la roca en la orogenia. El sistema de conductos en acuíferos cársticos suelen ser muy complejo, debido a que suelen formar una intrincada red subterránea, cuyos vínculos crean información adicional no visible y su dinámica tiene cambios temporales (Bensons, 2016). Por lo general, las aguas que se captan en este tipo de ambientes, son de un solo tipo (bicarbonatadas cálcicas); por lo que, si se quiere conocer con mayor precisión, si existe conexión entre dos puntos del acuífero, la hidrogeoquímica no es de gran ayuda y se deben utilizar otras técnicas con trazadores (Antigüedad, 1991).

Los trazadores constituyen una valiosa herramienta que permite obtener un mayor

conocimiento de la dinámica de masas de aguas superficiales y subterráneas, conocimiento que se obtiene mediante el monitoreo de estos trazadores, los cuales existen en el sistema hidrogeológico o se insertan en él (Rodgers *et al.*, 2005). Las técnicas con trazadores, son de utilidad en la comprensión de los procesos de transporte del sistema involucrado; así cómo, la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea, el movimiento, dirección del agua en el acuífero y la vulnerabilidad del recurso hídrico (Leibundgut *et al.*, 2009). Además, esta técnica es comúnmente empleada para calibrar y validar modelos hidrológicos (Leibundgut *et al.*, 2009). Es por ello, que la técnica con trazadores proporciona información integrada, que puede ser muy eficiente en la caracterización de los sistemas cársticos complejos (Leibundgut, 1987; Attinger, 1988).

Entre las técnicas más habituales están los trazadores hidrogeológicos con ensayos isotópicos, los cuales pueden ser naturales o artificiales. Los isotopos naturales se dividen en estables (^2H , ^{18}O , ^{13}C , ^3He , ^{39}Ar) y radioactivos (^3H y ^{14}C). De los primeros se utilizan especialmente el deuterio (^2H) y el oxígeno-18 (^{18}O), estos son inherentes en el sistema hidrológico de la superficie, el suelo y el agua subterránea sin alterar el medio, además de ser utilizados para la determinación de la procedencia de las aguas contenidas en las rocas, áreas de recarga, zonas de circulación y destino final (Singhal, 1999). La relación entre $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ es un reflejo de los fenómenos o procesos físico-químicos que han afectado a la molécula de agua en su circulación (Rodgers *et al.*, 2005). Los trazadores de fluorescencia (Piranina, Uranina) son los más importantes y a menudo también se usan sales como cloruro de sodio, potasio, Cl-, Br-, Li, Borax, etc., y partículas suspendidas en el agua. Sin embargo, estos

trazadores alteran el sistema natural del medio. Una técnica que ha sido poco utilizada, son los trazadores denominando “particulares”; como las Bacterias, Esporas de *Lycopodium* y Polen Marcado (Zötl, 1974; Leibundgut, 1977; Benischke *et al.*, 1980; Hötzl, 1991; Sabir *et al.*, 1999; Auckenthaler *et al.*, 2002; Flury, 2003; Zvikelsky, 2006; Göppert, 2008).

Estas últimas fueron utilizadas por Wanner (2000), esporas marcadas con fluorescencia, se utilizaron para estimar las distancias de transporte y las velocidades de deposición de partículas finas de materia orgánica, dominados por el fitoplancton y flóculos detritos, en un río de las tierras bajas en Spree, Alemania.

También, Spandre *et al.*, (2003), utilizaron esporas de *Lycopodium Clavatum* como marcador de aguas subterráneas para un sistema cárstico, en ese estudio se permitió determinar las conexiones hidráulicas subterráneas y los puntos de inyección en las canteras de explotación de mármoles de los Alpes Apuanos y los manantiales de abastecimiento de agua potable del acueducto de Carrara (Italia). La dificultad de estos estudios fueron el costo financiero, la falta de estudios preliminares, la limitada selección de pozos de muestreos y los procesos de contaminación natural. Las técnicas con polen y esporas también conocidas como polínica ambiental, son ideales e importantes, para obtener información de conexiones hidrológicas, trayectorias de partículas, direcciones de flujo, determinación de velocidades, dispersión hidrodinámica, escorrentía, tiempo de residencia, infiltración, procesos de difusión en las aguas superficiales, simulación de zonas de descarga y transporte de contaminantes en sistemas cársticos (Leibundgut *et al.*, 2009; Luhmann *et al.*, 2012).

Se analizaron dos regiones, la primer región corresponde a Joya de Luna-Guacamá y la segunda a San Nicolás Tolentino-Santa Catarina. En ambas zonas se realizó una caracterización química del agua subterránea, para seleccionar el área más adecuada y poder llevar acabo las pruebas de conectividad hidráulica entre la zona de recarga y descarga de un sistema cárstico. Se implementaron las esporas de *Lycopodium clavatum* y esferas de unicel teñidas; ambas zonas fueron monitoreadas durante un año; sin embargo, no se obtuvieron los resultados esperados, debido a que las esporas y esferas quedaron retenidas en las paredes de la roca carbonatada o posiblemente se perdieron en el medio cárstico.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una tercera variante o una metodología polínica ambiental MEPAM, la cual consistió en caracterizar polínicamente la zona de recarga-descarga siguiendo un gradiente altitudinal de la vegetación para demostrar la conexión entre ambas zonas. Para validar esta metodología, se utilizó la herramienta de isotopos estables como trazadores naturales (^2H y ^{18}O).

1.2.- Antecedentes y estado del arte

Los trazadores en hidrología son una herramienta que ayuda a la comprensión del sistema hidrológico, haciendo uso de medio ambiente, trazadores artificiales, trazadores naturales. Un trazador de agua proporciona métodos únicos para una visión directa de la dinámica de los cuerpos de agua superficial y subterránea. Las técnicas de trazadores son una herramienta útil para la comprensión de los procesos de transporte, permite cuantificar sus parámetros como los cambios de fase (evapora-

ción, condensación, sublimación), además ayudan a identificar los puntos que dieron el origen a una contaminación. Además, el enfoque de trazadores se utiliza comúnmente para identificar la dirección de sus interacciones entre las aguas subterráneas con el agua superficial, paleohidrología, el movimiento del agua en rocas de baja permeabilidad, de verificación y validación de modelos de flujo y de transporte numéricos y evaluación de la vulnerabilidad de los recursos hídricos. La relevancia de las técnicas de trazadores en las áreas hidrológicas y en hidrología es que proporcionan información integrada y pueden ser muy eficientes en la caracterización de los sistemas complejos en áreas naturales.

Los trazadores hidrológicos pueden ser disueltos, suspendidos o sustancias flotantes de acuerdo con su finalidad y ámbito de aplicación. Algunas sustancias artificiales naturales y que son adecuadas para los estudios científicos se pueden aplicar para la investigación de sistemas y subsistemas hidrológicos, como se muestra en la (Tabla 1).

Tabla 1.- Clasificación de trazadores, que se distinguen por su aplicación. Los trazadores de contaminación originan actividades antropogénicas, sin embargo su entrada en el sistema hidrológico puede ser similar a la de los trazadores naturales. (Leibundgut, 1982).

Trazadores Ambientales	Trazadores Artificiales
Utilización	Aplicación
Isotopos ambientales	Químicas
Sustancias hidroquímicas	Sustancias biológicas
Trazadores de contaminación	Sustancias flotantes
Características: entrada espacial via precipitación, fuente geogénica.	Características: Inyección puntual, definida por el tiempo, el lugar y la situación hidrológica.

Entre las técnicas más habituales están los trazadores hidrogeológicos con ensayos isotópicos, los cuales pueden ser naturales o artificiales. Los isotopos naturales se dividen en estables (^2H , ^{18}O , ^{13}C , ^3He , ^{39}Ar) y radioactivos (^3H y ^{14}C), por ejemplo el estudio tomado de Maduabuch *et al.*, (2006), es un estudio representativo de la zona Chad y el clima semiárido de África Central que hace la estimación del origen del agua subterránea, tiempo de residencia y recarga del acuífero Chad en Nigeria. Se analizaron aguas subterráneas del Cuaternario y del terreno continental en Nigeria, con el fin de investigar las fuentes y edades de las aguas, la posible renovación y mezclas de agua subterránea profundas e incidencias paleomagnéticas. Este estudio inicia en el año 2001, trata esencialmente de la investigación de los isotopos estables ^{18}O , ^2H y ^{13}C , isotopos radiactivos ^{14}C y ^3H , con menos énfasis en las características químicas. De los primeros se utilizan especialmente el deuterio (^2H) y el oxígeno-18 (^{18}O), estos son inherentes en el sistema hidrológico de la superficie, el suelo y el agua subterránea sin alterar el medio, además de ser utilizados para la definición de la procedencia de las aguas contenidas en las rocas, áreas de recarga,

zonas de circulación y destino final (Singhal, 1999).

Otro ejemplo es la interacción con agua subterránea en los Alpes Italianos cerca de Bolzano (glacial) (Leibundgut *et al.*, 2009). El objetivo de este estudio fue como dos ríos estuvieron conectados hidráulicamente con un acuífero. La clave fue una presa que se encontraba en el área dando información del grado en que están conectados el río y el acuífero local. No se puede detectar la variabilidad temporal de isótopos estables a lo largo de la sección; sin embargo, se observa conexión de flujo rápido y velocidad de flujo.

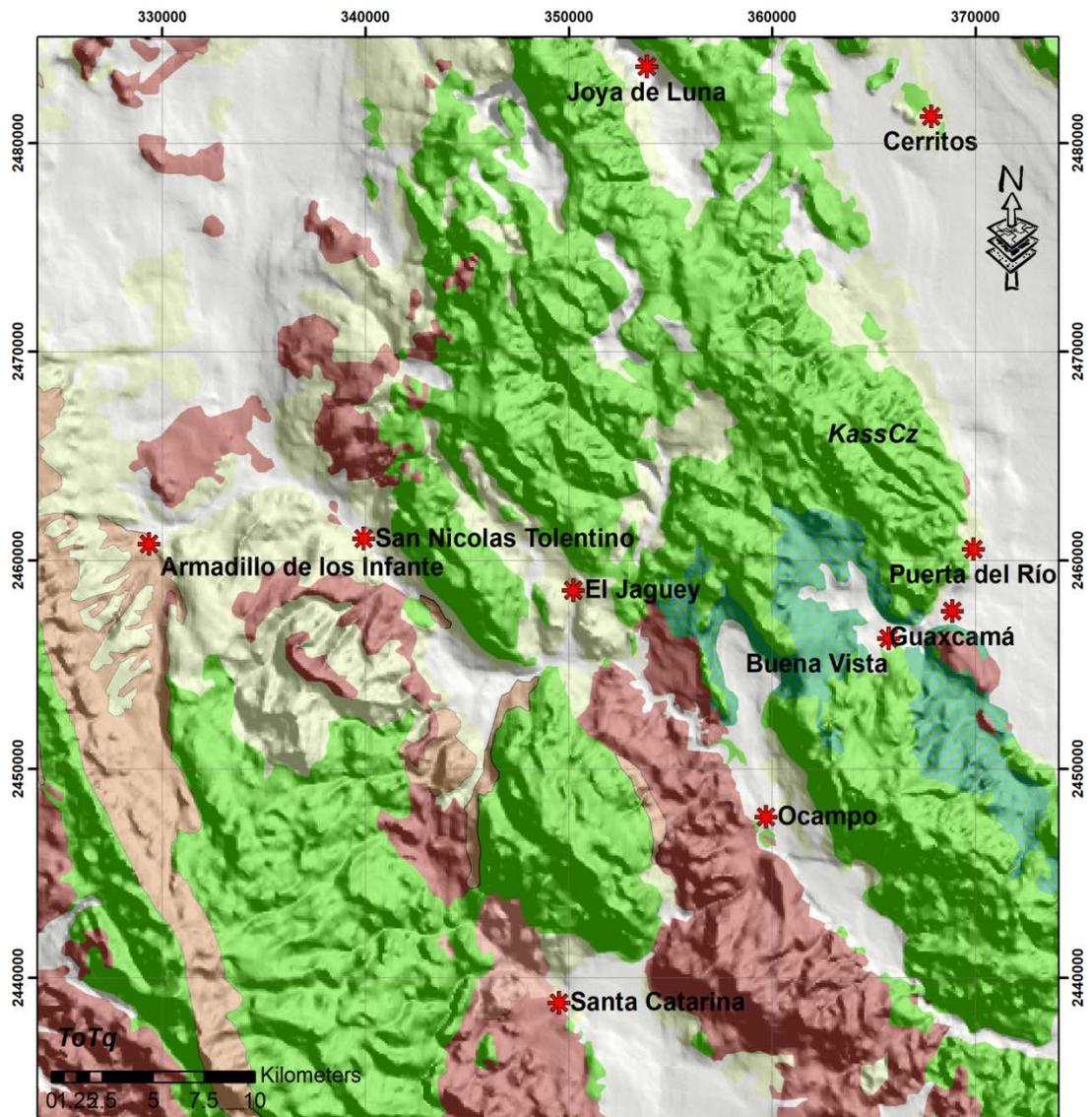
Casos de estudio en México

1.3.- Localización del área de estudio.

El área de trabajo se encuentra ubicada en la parte central del estado de San Luis Potosí, entre las coordenadas X= 330000, Y= 2480000 y X=370000, Y=2440000. Incluye las comunidades de Joya de Luna, Villa Juárez, Puerta del Río, Guaxcamá y una porción de San Nicolás Tolentino (Figura 1.1). La hidrografía, vegetación, orografía y clima presentan fuertes contrastes García (1973). La Sierra Madre Oriental marca dos zonas bien diferenciadas en la entidad: Seco semicálido predomina en todo el centro del municipio de Villa Hidalgo, al noroeste, con climas semiseco templado y al suroeste semiseco, con una temperatura media anual de 20 °C (INEGI, 2010), con mínimos menores de 0°C y máximos de 33.25°C, con lluvias en verano, su precipitación pluvial anual es de 336mm y una evaporación media de 93.96 mm. anuales, originando escurrimientos como arroyos: El puente, San Hilario, Las

Minitas, El Columpio, Los Verdes y Los Quimiles (siglo.inafed.gob.mx), que pertenecen a la región hidrológica 26, cuenca del Río Pánuco (RH - 26) e incluye las subregiones hidrológicas (010) Buenavista y (014) Cerritos - Villa Juárez (REPDA, 2005). El acuífero Villa Juárez queda incluido dentro de esta cuenca y sus principales recursos hidrológicos son alimentados por el Río San Nicolás que cruza en sentido sur poniente a suroriente en el área de estudio y se une aguas abajo con el Río Santa Catarina para posteriormente iniciar el Río Verde. (INEGI, 2010). El régimen de lluvia incluye los meses de mayo a octubre y la época de estiaje es de noviembre a abril. La temperatura cálida comprende de marzo a octubre, mientras que el periodo de frío es de noviembre a febrero. Los vientos dominantes son de este a oeste (INEGI, 2010). La vegetación en el área de estudio es diferenciada debido a los contrastes de relieve orográfico que hay en la región. Las estadísticas de vegetación de las cartas del INEGI (1997), en la región marcan los siguientes porcentajes de la superficie municipal de Cerritos: agricultura (21.33%), pastizal (13.37%), bosque (2.95%), matorral (73.74%) y zona urbana u otros (0.61%). En Joya de Luna que corresponde a la región de mayor elevación cuenta con: vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (VSa/QB), bosque de encino (BQ), agricultura temporal anual (TA), pastizal inducido (PI), matorral submontano (MSM), y agricultura de riego anual (RA) (Figura 1.1). El área es utilizada para actividad agrícola dada las condiciones de fertilidad del suelo. Con respecto a la parte topográficamente más baja, las estadísticas de vegetación en la región marcan los siguientes porcentajes de superficie municipal de Villa Juárez: agricultura (39.2%), matorral (34.2%), no apta para agricultura (31.3%), mezquital (15.9%), pastizal

(9.9%) y zona urbana (0.8%), (INEGI, 2005). Para Guaxcamá existen fundamentalmente matorral submontano (MSM), agricultura temporal anual (TA), mezquital (MK), vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano (VSa/BQ), agricultura de temporada (RA), pastizal halófilo (PH), pastizal xerófilo (MKX) y bosque de mezquite secundario con matorral submontano (MkSa/MSM). En esta región la actividad agrícola es escasa dada la presencia de sulfatos en niveles altos en el suelo (Figura 1.2).



* Localidades



Elaboró
Sonia Torres Rivera

Figura 1.1 Localización del área de estudio.

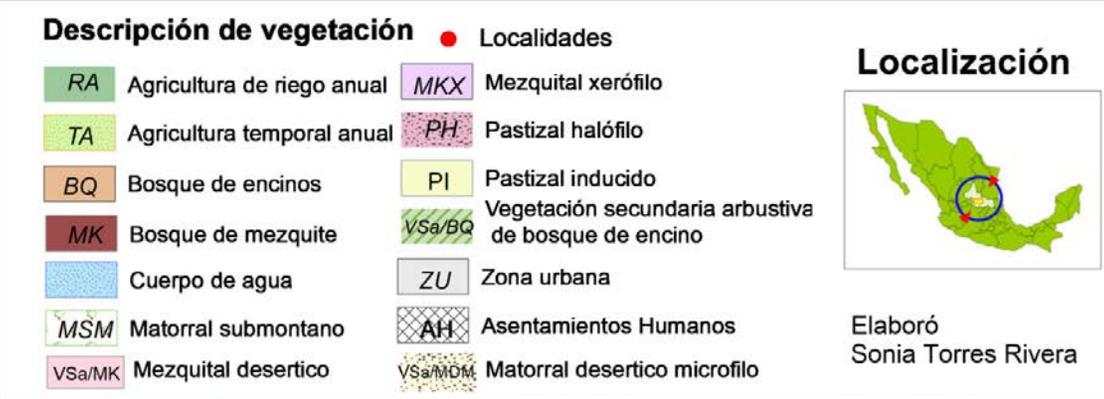
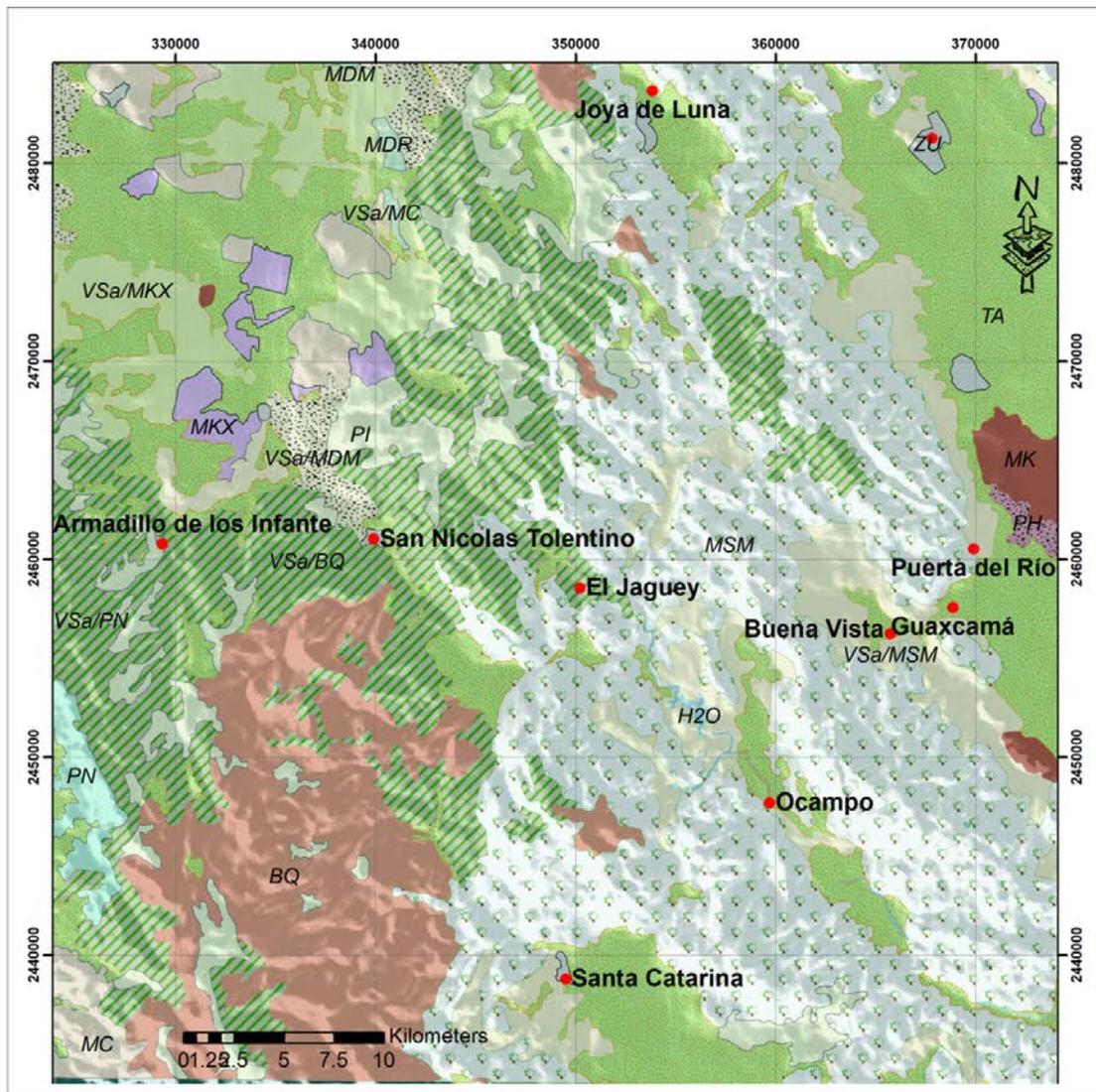


Figura 1.2.- Vegetación dominante en el área de estudio INEGI (2005).

1.4.- Hipótesis.

La conectividad de los sistemas cársticos y fracturados puede ser identificada utilizando granos de polen característicos de la zona de recarga que son infiltrados al acuífero y por presión hidrostática salen en la zona de descarga, para dar soporte a esta hipótesis se utilizan isotopos estables de (^{18}O y ^2H).

1.5.- Objetivo General

El objetivo de este estudio fue realizar una caracterización palinológica para determinar la conectividad hidráulica entre la zona de recarga Joya de Luna y la zona de descarga en Guaxcamá, para dar soporte a esta metodología se realizó una validación con Deuterio ($\delta^2\text{H}$), Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) y Deuterio en exceso (D-excess).

1.5.1.- Objetivos específicos.

- a) Establecer modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico para determinar las zonas de recarga y descarga.
- b) Caracterización morfológica de la zona de recarga y la zona de descarga.
- c) Caracterización hidrogeoquímica para identificar la calidad de aguas existente en ambas zonas.
- d) Caracterización polínica e isotópica del agua subterránea del área de estudio en zonas recarga-descarga.

- e) Identificación de polen en las muestras de agua para encontrar las diferentes rutas de migración de polen y agua.
- f) Caracterización isotópica, con análisis de deuterio, oxígeno-18, aplicar la fórmula $\delta D = \delta^2H - 8 \cdot \delta^{18}O$ y determinar el D-excess.

1.6.- Justificación.

Los acuíferos cársticos son inherentemente susceptibles a la contaminación. En acuíferos cársticos la presencia de fracturas o sumideros facilita altas tasas de infiltración, recarga rápida y una vía directa para que los contaminantes ingresen al sistema de agua subterránea. Las aguas subterráneas de acuíferos cársticos abastecen alrededor del 25% de la población mundial; los acuíferos cársticos tienen características muy particulares (Perrin, 2003; Bakalowicz, 2005) que ocasionan su mayor exposición a contaminantes como nutrientes, pesticidas, metales pesados, ácidos, solventes orgánicos, productos derivados del petróleo y bacterias fecales han sido documentados en los acuíferos cársticos. La urbanización, industria y las actividades agropecuarias que se realizan en la superficie del carst son grandes amenazas de contaminación debido a los residuos que son vertidos hacia los acuíferos (Veni, 1999; Daly *et al.*, 2002; Davis *et al.*, 2002; Kueny, 2002; Andreo *et al.*, 2006; Nguyet, 2006; Guo *et al.*, 2007; De Waele *et al.*, 2009).

La restauración de un acuífero contaminado es una tarea técnicamente complicada

y de elevado costo, a veces es irreversible por lo que es preferible tomar medidas de prevención y previsión, en lugar de la remediación (Pérez, 2004; Guo *et al.*, 2007; Jiménez, *et al.*, 2010). Desde los años 60's y desde diversas disciplinas surgen conceptos, metodologías y enfoques para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en ambientes cársticos (Albinet, 1975; Foster, 1987; De la Rosa, 1998; Daly *et al.*, 2002; Zwahlen, 2003; De la Rosa *et al.*, 2004; Corwin *et al.*, 2006; Díaz *et al.*, 2011).

Los modelos y enfoques de estudio tienen fortalezas y debilidades. Por ejemplo los métodos de trazadores proporcionan información directa sobre la dinámica del agua en todos los compartimentos del ciclo hidrológico. La dinámica incluye los procesos de movimiento, distribución y diseminación. Las posibilidades de las técnicas trazadoras son enormes y comprenden, entre muchas otras, la investigación de procesos tales como la recarga de aguas subterráneas, la generación de escorrentía, el transporte de agua y solutos y la evaluación de la contaminación.

Es importante este tipo de estudio, porque el estado de San Luis Potosí tiene una fuerte demanda de agua, además se encuentra sobre un sistema cárstico, tienen una rápida infiltración, son buenas zonas de recarga, excelentes acuíferos y forman la Sierra Madre Oriental.

La conectividad hidráulica en los sistemas cársticos como es el caso de Joya de Luna (zona de recarga) y Guaxcamá (zona de descarga) muestra el funcionamiento de estos sistemas. Por otro lado también se observó la afectación de las estructuras geológicas que sirvieron como conductos hidrológicos que facilitaron y en algunos

casos limitaron la recarga y descarga del agua subterránea en el sistema acuífero. El conocimiento de este tipo de escenarios puede servir para la planeación estratégica y manejo de los recursos hídricos.

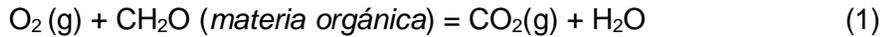
2.- MARCO TEÓRICO

2.1.- Evolución hidrogeoquímica

La mayor parte del agua subterránea que existe en el mundo, tiene su origen en la precipitación de agua de lluvia o el derretimiento de nieve y su infiltración a lo largo del suelo hasta alcanzar los sistemas de flujo que viajan a través de las capas que constituyen los materiales geológicos (Freeze, 1979).

La etapa de infiltración a través del suelo es muy importante para la composición química del agua subterránea. La disolución de sustancias sólidas y de gases en el agua subterránea es el proceso más importante de la hidrogeoquímica, conocido también como la mineralización del agua subterránea. Ya que el agua es un disolvente fuerte, no existe agua pura bajo la superficie de la tierra. En las zonas de recarga, el suelo pierde una cantidad neta de material mineral que asimila el flujo de agua. Con frecuencia, gran parte de la composición química del agua subterránea se adquiere en los primeros metros de su recorrido desde la superficie del terreno, aunque después haya recorrido varios kilómetros en el subsuelo a lo largo de la trayectoria de flujo. Esto ocurre principalmente debido a que el agua en el suelo es ácida por la reacción del CO₂ del suelo con el agua; ya que los poros del suelo presentan una elevada concentración en este gas (10-1.5 – 10-2.5 atmósferas), generado por el decaimiento de la materia orgánica y la respiración de las raíces (Freeze, 1979). Esta acidez hace que el agua pueda alterar silicatos y carbonatos.

La acidificación del agua se puede representar mediante las reacciones:



Si el agua permanece en el suelo, siempre hay CO_2 presente y recupera reacción 1, en la reacción 2, la acidez que ha consumido el proceso de alteración de minerales. Esto mantendrá su agresividad mientras permanezca en el suelo (Sánchez, 2004). En la medida que el H_2CO_3 es consumido en la zona de suelo, la oxidación de la materia orgánica, y la respiración de las raíces, constituyen una fuente de CO_2 a los poros presentes en el suelo y asegura nuevamente la generación de H_2CO_3 al ocurrir nuevos eventos de recarga que circulen a través del suelo.

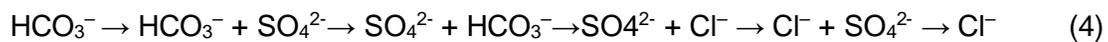
De este modo los procesos bioquímicos e hidrogeoquímicos proporcionan un suministro continuo de CO_2 que, al reaccionar con el agua subterránea, promueve las reacciones agua – mineral (Freeze & Cherry, 1979). Una vez que el agua llega a la zona saturada, generalmente no hay aportes de acidez, por lo que comúnmente se torna básica y disminuye parcialmente su capacidad de disolver carbonatos y alterar silicatos. Además la presencia de ácido inorgánico, existen muchos ácidos orgánicos en la zona de suelo producidos mediante procesos bioquímicos. Estas sustancias, como ácidos húmicos y fúlvicos, constituyen una parte importante en el desarrollo de suelos y en el transporte de constituyentes disueltos hasta el nivel freático. Sin embargo su efecto es menor, comparado con el efecto del CO_2 disuelto. Otra fuente importante de acidez, es la reacción del oxígeno libre con minerales que contienen Fe reducido, como la pirita (FeS_2). Esta fuente de H^+ generada por oxidación,

juega un papel importante en el intemperismo del subsuelo en algunas regiones (Freeze, 1979).

La evolución química del agua dependerá de los minerales y el tiempo de contacto, que a su vez depende del sistema de flujo subterráneo. Generalmente se considera que a mayor tiempo de permanencia en el terreno, mayor será la salinidad del agua. Sin embargo si un agua permanece solo unas horas en contacto con NaCl será más salina que otra que permanezca por mucho más tiempo en contacto con cuarzo (SiO_2) (Sánchez, 2004).

Aunque las reacciones y procesos químicos que se desarrollan en los sistemas de flujo son muy variados, como norma general, se observa que en las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo, generalmente predomina el anión bicarbonato (HCO_3^-). Conforme se incrementa el tiempo de permanencia en el subsuelo predominan el SO_4^{2-} , y finalmente las aguas más salinas, con mayor recorrido, son cloruradas. Esta evolución normalmente se acompaña de los cambios regionales en las especies de aniones dominantes, denominada secuencia de Chebotarev (Freeze, 1979).

→ *Recorrido a lo largo de un sistema de flujo subterráneo* →



→ *Aumento de la salinidad* →

Estos cambios se llevan cabo conforme el agua se mueve desde zonas someras con flujo activo, a zonas intermedias donde el flujo es más lento y el agua más

antigua. Esta secuencia, como muchas otras en las ciencias geológicas, debe ser observada en términos de escala y geología de un caso específico, con las concesiones necesarias para su modificación (Freeze, 1979).

La secuencia de Chebotarev pudiera indicar un proceso lineal: el agua al principio de su viaje es bicarbonatada; a medio viaje, sulfatada; al final, clorurada. Aunque esto es cierto para una gota de agua determinada, la distribución de la geoquímica del agua en el subsuelo de una región está mejor descrita por el esquema trazado por Domenico (1972, citado en Freeze, 1979). En grandes cuencas sedimentarias, se distinguen tres zonas en profundidad:

Zona superior: presenta flujo activo en rocas relativamente lixiviadas, generalmente con recorridos cortos y tiempos de permanencia de años o decenas de años. En esta zona predomina el anión HCO_3^- y tiene bajo contenido de Sólidos Totales Disueltos (STD). En términos generales, se trata de aguas bicarbonatadas y poco salinas.

Zona intermedia: presenta flujo menos activo, recorridos más largos y tiempos de permanencia de cientos de años. Las aguas son más salinas y el anión predominante es el SO_4^{2-} .

Zona inferior: flujo muy lento o estancado, largos recorridos y tiempos permanencia de miles a millones de años. Por lo que es muy común la presencia de minerales altamente solubles. La salinidad es elevada y el agua es clorurada. (Freeze, 1979).

Desde el punto de vista geoquímico, la evolución aniónica es posible gracias a la abundancia y a la solubilidad de distintos minerales en el subsuelo. En términos

generales, la abundancia se refiere a la diferente probabilidad que existe de que un agua encuentre minerales que le aporten bicarbonatos, sulfatos o cloruros. Si un agua estuviera en contacto simultáneamente desde su infiltración con minerales que le aportaran todos estos iones, no se produciría la secuencia de Chebotarev, sino que desde el primer momento, las aguas serían cloruradas, puesto que son las sales más solubles. Pero en la realidad siempre existe un aporte de bicarbonatos, en segundo lugar, los yesos son relativamente frecuentes en series sedimentarias, y finalmente, las sales cloruradas, presentes como estratos salinos depositados millones de años atrás en cuencas marinas cerradas, son las menos abundantes.

La solubilidad, es proporcional a la salinidad del agua, que aumenta progresivamente con el tiempo de permanencia del agua en el terreno. El agua disuelve o altera los minerales que encuentra hasta que se alcanza el límite marcado por la constante de equilibrio correspondiente. De este modo, no disolverá más ese mineral y continuará disolviendo otros minerales con una constante de solubilidad más elevada hasta que de nuevo se alcance el equilibrio.

Las considerables cantidades de calcita y dolomita presentes en la mayoría de las cuencas sedimentarias y su fácil solubilidad en contacto con el CO₂ disuelto en el agua, hacen que el HCO₃⁻ sea invariablemente el ión dominante en las zonas de recarga. Por otro lado, el yeso y la anhidrita, son los minerales más comunes que aportan sulfato, dado que se disuelven rápidamente en contacto con el agua. La reacción de disolución para el yeso, es la siguiente:



La solubilidad de los cloruros es mucho más alta que la de los sulfatos y la solubilidad de los sulfatos más alto que los carbonatos, sin embargo primero se alcanza el equilibrio para los minerales con carbonatos, después para aquellos que incluyen sulfatos, y finalmente para los minerales con cloruro. Un litro de agua a 25°C puede llegar a disolver 2,100 mg/l de SO_4^{2-} , mientras que puede alcanzar 360,000 mg/l de Cl^- (Freeze, 1979).

Otro factor importante dentro de la evolución hidrogeoquímica, es la secuencia de evolución electroquímica. Esta secuencia se refiere a la tendencia del potencial redox (Eh) a disminuir conforme el agua subterránea viaja a lo largo del sistema de flujo. Diferentes estudios han demostrado que el agua de lluvia, contiene un alto potencial redox como resultado de su contacto con el oxígeno atmosférico. Las condiciones iniciales del potencial redox reflejan altas concentraciones de oxígeno disuelto, expresados en Eh cercanos a 750 mV a pH 7 (Freeze, 1979).

La secuencia de evolución electroquímica inicia en las capas de suelo ricas en materia orgánica, la oxidación de ésta consume la mayor parte del oxígeno **ecuación 1**. Este proceso disminuye notablemente el potencial redox, tomando en cuenta que el consumo de oxígeno depende mucho de la estructura del suelo, porosidad y permeabilidad, así como de la profundidad y distribución de la materia orgánica, además de la profundidad del nivel freático y la temperatura (Freeze, 1979).

De este modo, diferentes estudios, enfocados a la identificación de la presencia del oxígeno disuelto en el agua, definieron las siguientes generalizaciones: *i) en zonas de recarga*, con suelos arenosos o cavernas de caliza, el agua subterránea somera

contiene hasta 0.1 mg/l de oxígeno disuelto, *ii) el agua subterránea somera en zonas de recarga* con suelos limosos o arcillosos, no contiene oxígeno disuelto detectable y *iii) en áreas donde el suelo es escaso o se encuentra sobre roca fracturada* permeable los niveles de oxígeno disuelto son detectables aún a grandes distancias dentro del sistema de flujo. En algunos casos todo el sistema de flujo manifiesta presencia de oxígeno disuelto (Freeze, 1979). La considerable cantidad de oxígeno disuelto, presente en agua subterránea somera de depósitos arenosos, es probable que se deba al bajo contenido de materia orgánica en el suelo y las altas tasas de infiltración.

La cantidad de sustancia disuelta por la naturaleza depende de: temperatura del agua, la solubilidad de los minerales, el tiempo del contacto entre agua y roca, la superficie del contacto, la concentración de sustancias ya disueltas, el pH y potencial redox.

Estas condiciones se explican por: a) la solubilidad de una sustancia aumenta con la temperatura, el tiempo de contacto entre agua y roca depende de las velocidades de flujo del agua subterránea, la superficie del contacto entre agua y roca depende de la porosidad del medio rocoso, la concentración de sustancias ya disueltas se representa por el grado de saturación del agua. Para poder disolver una sustancia, la solución debe estar subsaturada y los metales pesados se disuelven mejor en condiciones reductoras.

2.2.- Sistema 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 importantes 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 o 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 o zona de descarga (zonas con movimiento vertical ascendente del agua, emergido del subsuelo, contribuyendo junto con el agua de escorrentía a la formación de fuentes superficiales de agua) (Tóth, 1999).

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 depende 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 *et al.*, 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 un mismo valle. Se encuentran a corta distancia de su zona de recarga y en una profundidad somera en 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 limitado a una cuenca y puede variar acorde a cómo cambian las estaciones del año, 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 y flujos intermedios en algunos casos, esto definirá el sistema intermedio (Tóth, 1999). 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. El flujo regional circula a mayor profundidad, iniciando en los terrenos de mayor altitud y finalizando en las zonas más bajas donde descarga, 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 se puede apreciar, la (Figura 2.1) muestra un esquema general que representa la distribución del agua subterránea, algunas condiciones hidrogeológicas típicas y fenómenos naturales asociados con el flujo subterráneo y su interacción con el terreno debido a la acción natural que la fuerza de gravedad ejerce sobre el agua subterránea. Ese esquema simplificado de Toth, (2000) nos muestra una cuenca idealizada con un sistema de flujo que surge de la parte izquierda y que transita bajo una pendiente poco pronunciada y otro sistema que surge de la parte derecha donde se encuentran flujos regionales, intermedios y locales circulando bajo una superficie topográfica más accidentada. Como se puede apreciar, cada sistema de flujo tiene un área de origen o recarga, una de tránsito y una final o de descarga (Tóth, 1999).

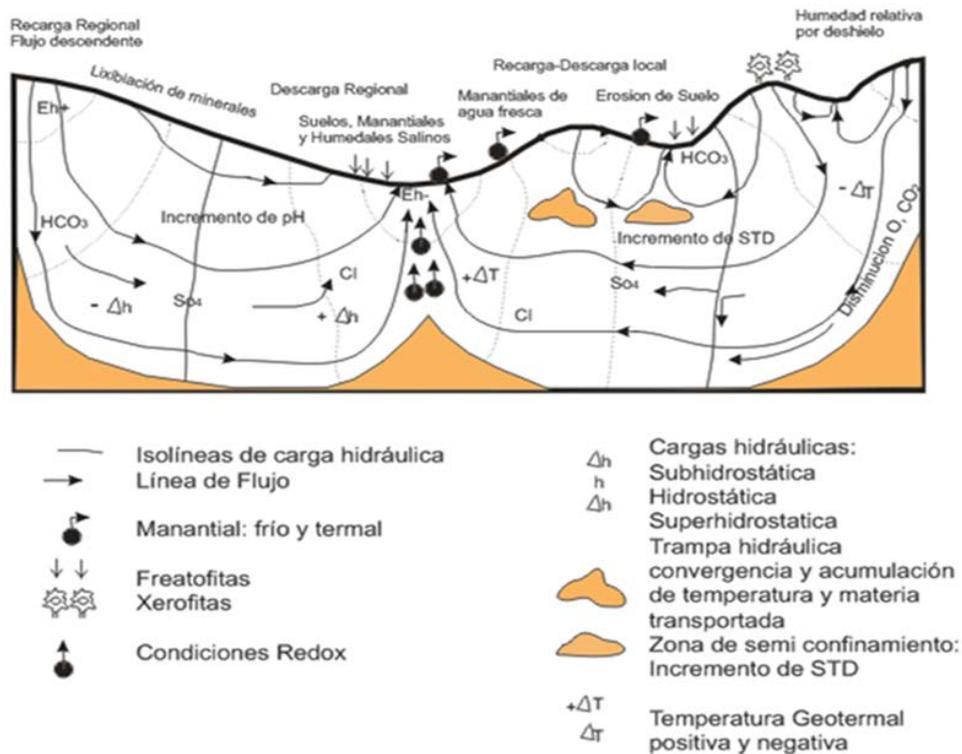


Figura 2.1.- Sistemas de flujo. Efectos y manifestaciones de flujo gobernado por gravedad en una cuenca regional (Tóth, 2000).

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. Pueden ocurrir también otros cambios, tales

como cambios en las facies aniónicas (por ejemplo, de bicarbonatada a sulfatada y clorurada), una disminución de los contenidos de 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 intercambio de solutos.

En el presente estudio es importante establecer las regiones de recarga y descarga del agua subterránea, la superposición vertical de los diferentes tipos de régimen de flujo, debido a 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.

La concentración de sólidos totales disueltos en el agua varía de 500 a 2000 ppm, los valores menores se encuentran al noreste de la zona y se incrementa en el sureste. La familia imperante del agua es del tipo cálcico-sódico-bicarbonatada.

2.3.- Isotopos estables del agua subterránea

Los isótopos pueden ser definidos como átomos del mismo elemento, diferenciándose por el número de neutrones (Mazor, 1991). Cada elemento tiene un número constante de protones, puede tener diversos tipos de isótopos dependiendo del número de neutrones.

Por ejemplo, el hidrógeno tiene 3 isótopos:

- H – Hidrógeno común, 1 protón
- ²H – Deuterio, hidrógeno estable pesado, 1 protón + 1 neutrón
- ³H – Tritio, hidrógeno radioactivo, 1 protón + 2 neutrones

Y el oxígeno también tiene 3 isótopos:

- ¹⁶O – oxígeno común, 8 protones + 8 neutrones
- ¹⁷O – oxígeno (muy raro) pesado, 8 protones + 9 neutrones
- ¹⁸O – oxígeno pesado, 8 protones + 10 neutrones

Los isótopos pueden ser clasificados en estables y radioactivos (inestables) y tienen origen natural, no parecen decaer en otros isótopos en tiempo geológico y pueden ser producidos por el decaimiento de otros isótopos. Los isótopos estables analizados en este trabajo de investigación son el deuterio ($\delta^2\text{H}$) y el oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$).

La composición isotópica estable de un elemento de poca masa se expresa usualmente como "delta" (δ) desviaciones de la composición estándar.

$$\delta \text{Isótopo} \left(\text{en } \frac{0}{00} \right) = \left(\frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estándar}}} - 1 \right) \times 1000 \quad \text{Ecuación (6)}$$

Dónde: "R" es la tasa de isótopos pesados a livianos.

La composición isotópica del agua en el trabajo de investigación es comparada con el Agua del Océano Media Estándar (Standard Mean Ocean Water - SMOW). Esta composición se expresa con una desviación de miles (0/00) respecto al SMOW.

Para el caso del deuterio:

$$\delta D \left(\text{en } \frac{0}{00} \right) = \left(\frac{\left(\frac{D}{H} \right)_{\text{muestra}}}{\left(\frac{D}{H} \right)_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \times 1000 \quad \text{Ecuación (7)}$$

Durante la evaporación existe un fraccionamiento isotópico. Las propiedades físicas y químicas de los diferentes isótopos son levemente distintas debido a sus diferencias de masas. Las partículas ligeras de agua evaporan más eficientemente que las pesadas; como resultado, el fraccionamiento isotópico ocurre. El aire toma las partículas ligeras de agua con valores relativamente negativos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, mientras que la parte residual es más rica en isótopos pesados (más positivos $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$). (Craig, 1961)

Los valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se enriquecen progresivamente cuando se da la evaporación y desarrolla una composición isotópica única. Cuando son graficados, estos valores tienen una tendencia lineal llamada "línea de evaporación" y su pendiente se determina principalmente por la temperatura y la humedad del aire (Figura 2.2).

Línea de agua meteórica Global (GMWL), cuando las composiciones isotópicas de precipitaciones de todo el mundo se grafican en $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$, pueden ser descritas por la ecuación (Craig, 1961):

$$\delta^2\text{H} = 8. \delta^{18}\text{O} + 10 \text{ (en } 0/00\text{)} \quad \text{Ecuación (8)}$$

La pendiente de 8 se debe a las condiciones de equilibrio durante la condensación de la precipitación en nubes a 25-30 °C. El valor de 10 0/00 en la intersección con el eje Y es llamado el valor de exceso de deuterio. Este valor de exceso de deuterio se aplica sólo a los datos que "encajan" con la pendiente de 8; valores de exceso típicos de deuterio se encuentran en el rango de 0 a 20 (Kendall, 1998) y son un indicador de las condiciones de humedad de la región fuente.

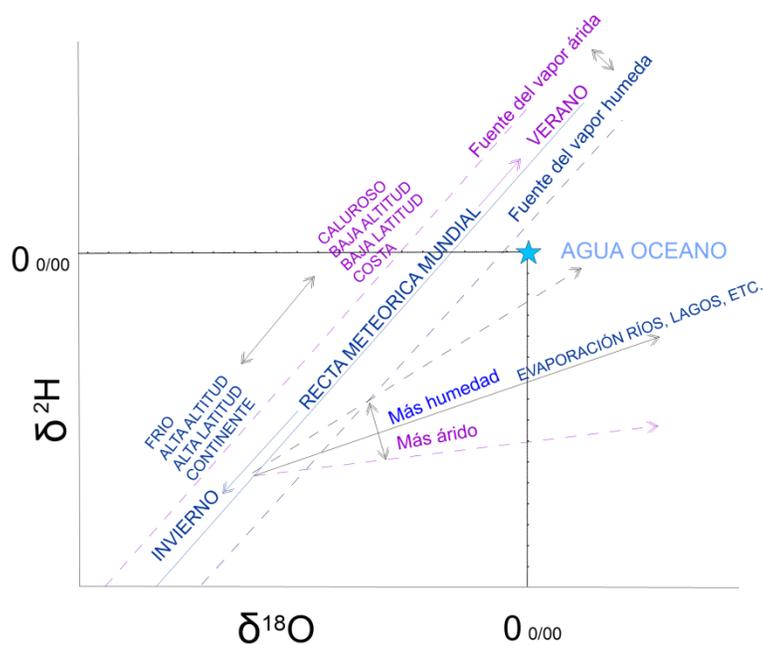


Figura 2.2.- Línea de agua meteórica global (GMWL).

2.3.- Polinización.

El polen es un término que deriva del vocablo latino pollen. El concepto permite mencionar a los granos que se hallan en los órganos masculinos de las flores y que presentan los gametofitos de la planta.

El polen, por lo general, está formado por un par de células recubiertas por membranas. En lo que respecta a la estructura de un grano de polen se compone de dos partes fundamentales: una cubierta externa que es muy dura y que responde al nombre de exina y otra cubierta interna llamada intina. Esta se identifica porque guarda la célula que es la que contiene tanto los gametos masculinos como el núcleo.

La exina, por su parte, está formada de manera fundamental por lo que se conoce

como esporopolenina, que se identifica por ser muy resistente tanto a los distintos agentes químicos como a la descomposición producida por el paso del tiempo.

A través de un proceso conocido como polinización, el polen pasa de los estambres de las flores hasta el estigma, donde se produce la germinación y fecundación de los óvulos que dan lugar a la creación de frutos y semillas.

La polinización de las plantas se puede producir a través de cuatro procesos diferentes (Figura 2.3).

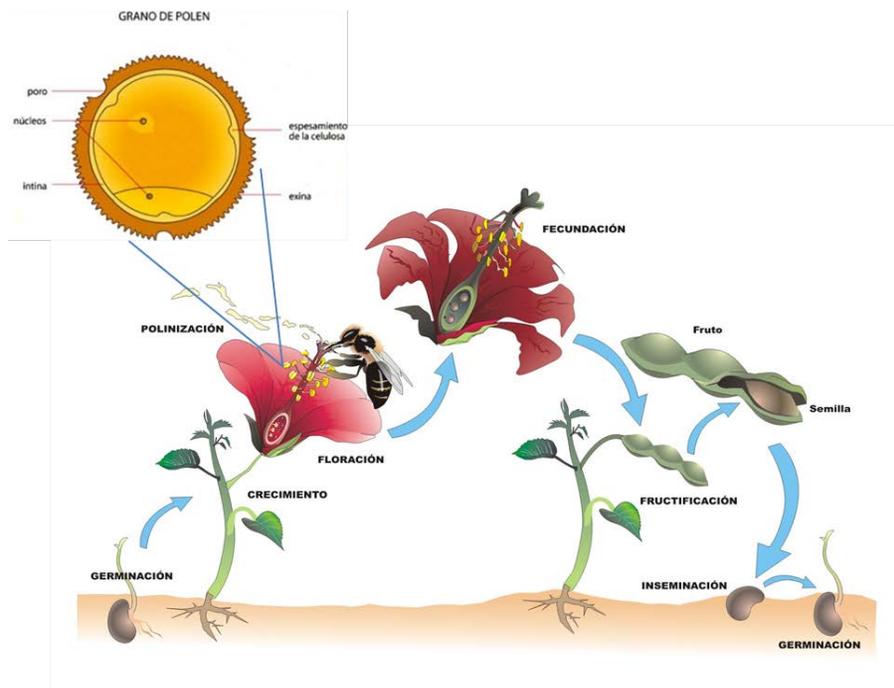


Figura 2.3.- Polinización indirecta: el polen es transportado desde una flor hasta otra por un insecto, viento, agua y el hombre. Figura tomada y editada de. (<https://proyectoeducere.wordpress.com>)

Polinización zoófila: es la que se realiza por animales, es decir, que éstos cuando se sienten atraídos por los colores y olores de la flor se acercan a ella y se impregnan de su polen. Cuando se acercan a otra flor depositan el polen que han recogido

en la anterior. Llamamos entomófila si la polinización se realiza a través de insectos y ornitófila, si se produce con pájaros.

Polinización anemófila: este tipo se produce cuando es el propio viento el que transporta el polen y se suele dar en árboles más grandes como los pinos, coníferas, chopos, etc.

Autopolinización: en este caso no entra en juego ningún animal ni otros factores, sino que es la propia flor la que se auto fertiliza sola cuando el polen de los estambres cae en sus propios ovarios.

Polinización hidrófila: se realiza a través del agua.

La época de floración depende principalmente de la especie, pudiendo desarrollarse más temprana o tardíamente según la variedad cultivada.

Convencionalmente se considera que una planta está en inicio de floración cuando alrededor del 10 % de las flores están abiertas; en plena floración, cuando aproximadamente el 50 % de las flores están abiertas; y en fin de floración, cuando todos los pétalos se han caído (Agustí, 2004).

La floración dura como término medio, 15 días, aunque el período de floración varía con la variedad cultivada, con la cantidad de flores, las condiciones meteorológicas de la estación y la topografía del lugar. Las temperaturas que se producen antes y durante la floración afectan la duración del período de floración.

3.- MATERIALES Y METODOS

En el presente trabajo se utilizaron dos metodologías la primera documenta otro caso de flujo de agua subterránea con condiciones distintas a la segunda metodología, en las subcuencas de Santa Catarina y Ocampo-Paraíso, en la zona media de San Luis Potosí, 40 km al sur de Joya de Luna, donde la caracterización hidrogeoquímica ha permitido hacer un análisis preliminar cerca del área de estudio, los tipos de aguas subterráneas y diversos procesos de interacción agua-roca. En la segunda metodología, de mayor peso para este documento fue la metodología MEPAM (Metodología Polínica Ambiental) para el estudio de la conectividad de acuíferos en medios cársticos. En especial en la identificación de la conectividad entre la zona de recarga y de descarga, utilizando granos de polen como trazadores. De manera complementaria, para dar validez a este método se emplearon isotopos estables de Deuterio y Oxígeno-18. Además el exceso de deuterio se empleó como un factor para el análisis hidrogeológico.

3.1.- Metodología de la hidrogeología en San Nicolás Tolentino

Se inicia en el laboratorio colocando los envases de polietileno en extran (jabón libre de fosfatos) durante 7hrs. Después del tiempo transcurrido se da un enjuague 7 veces con agua destilada con la finalidad de eliminar residuos presentes posteriormente se pasan al ácido clorhídrico al 10% (HCl al 10%) una vez que el recipiente

cumplió con el tiempo indicado se lleva el mismo procedimiento antes mencionado, enjuague, en seguida se colocan los envases en HCL al 10% con una duración de 30 minutos, nuevamente se procede a enjuagar 7 veces con agua destilada, una vez finalizando el lavado se procede al secado.

Para prevenir confusiones en la identificación de las muestras, se etiquetaron los frascos previamente lavados con etiquetas adhesivas en las que se anotó la siguiente información: número de muestra, nombre (ion-cación o anión), fecha y lugar de recolección y con guantes de nitrilo, con unas pinzas y con mucho cuidado se colocan filtros de 0.45μ en porta-filtros tratando de que queden estos filtros bien centrados y colocados en el porta filtro.

La planeación de muestreo fue en Agosto del 2013 y se realizó una recopilación, análisis y depuración de la información (Anexo).

Para realizar la actividad de campo se tomó en cuenta la topografía la cual puede marcar una alternancia de regiones de recarga y descarga de agua subterránea, la geomorfología nos permitió observar y diferenciar las diferentes zonas como Joya de Luna, Guaxcamá y San Nicolás Tolentino la cual dio una idea de la distribución espacial.

En estas zonas se muestrearon un total de 41 sitios, la selección Joya de Luna (5 norias), Guaxcamá (10 manantiales) y San Nicolás Tolentino (10 norias, 2 manantiales y 14 pozos), las cuales se representan en la (Tabla 2) (anexo).

Tabla 2.- Toma de muestra de agua subterránea en los diferentes aprovechamientos: Joya de Luna, Buenavista/Puerta del río, Guaxcamá y San Nicolás Tolentino.

	SITIO	APROV	X	Y
1	GUAXACAMÁ LA MINA (INICIO)	MANANTIAL	368569	2453468
2	GUAXACAMÁ LA MINA (MEZQUITE)	MANANTIAL	368560	2453477
3	GUAXCAMÁ LA MINA (ARROYO)	MANANTIAL	368624	2453495
4	GUAXACAMÁ LA MINA (CONGLOMERADO CALIZAS)	MANANTIAL	368668	2453434
5	LA MINA (ESCURRIMIENTO PARED SOBRE EL ARROYO)	MANANTIAL	368741	2453481
6	OJO DE AGUA (LAVADERO)	MANANTIAL	362880	2459558
7	LA CUEVA	MANANTIAL	368689	2456955
8	BUENAVISTA	MANANTIAL	370294	2456169
9	BUENAVISTA (AZUFROSA)	MANANTIAL	366995	2456279
10	PUERTA DEL RIO	MANANTIAL	370294	2459992
11	JOYA DE LUNA (NORIA ACORRALADA)	NORIA	353663	2483188
12	JOYA DE LUNA (NORIA CON BOMBA)	NORIA	353461	2483733
13	JOYA DE LUNA (NORIA NUEVA CON MEZQUITE)	NORIA	353433	2483672
14	JOYA DE LUNA (NORIA DEL CAMINO PASO REAL)	NORIA	353422	2483583
15	JOYA DE LUNA (NORIA CARRETERA CHILLADORA)	NORIA	354422	2482572
70	LOS NOGALES	NORIA	352289	2451018
56	SAN MIGUEL	NORIA	346530	2436218
54	ARMADILLO DE LOS INFANTES	POZO	329595	2461276
57	ARROYO HONDO	NORIA	333540	2463344
77	OJO DE AGUA DE SAN JUAN	POZO	355531	2439024
49	LA VENTILLA	POZO	357991	2432359
78	RANCHO NUEVO	POZO	353583	2440094
73	EL PARAISO	NORIA	361491	2445091
65	BARRANCAS	NORIA	340094	2457536
7	OCAMPO	POZO	355733	2542767
76	MOJARRAS DE ARRIBA	POZO	368907	2451178
53	ATONILCO	POZO	358939	2448158
79	SANTA CATARINA	POZO	351118	2439280
71	GOLONDRINAS	NORIA	356400	2469557
75	EL SERMON	POZO	364583	2442136
74	EL SAUCILLO	POZO	362817	2442680
72	ALLENDE	NORIA	357092	2449836
67	LOS MORENO	NORIA	343634	2456423
69	JAGUEY	POZO	350157	2458697
51	SEMINARIO	POZO	354255	2437436
50	PUENTE PRIETO	POZO	346530	2436218
52	GASOLINERA	POZO	353725	2436270
55	ARMADILLO (MANANTIAL)	MANAN	329883	2459551
64	PASO DEL AGUILA	MANAN	336324	2464003
66	SAN NICOLAS TOLENTINO	NORIA	339983	2461812
68	OJO DE AGUA	NORIA	345422	2454806

En la cuenca de San Nicolás Tolentino, las profundidades van de 25 metros hasta 300 m, en tanto que la región de Joya de Luna, la profundidad del nivel estático va de 5 a 8m. En Buenavista, Puerta del Río, el agua se encuentra a nivel del terreno

debido a que solo se encuentran manantiales. Cabe mencionar que debido a las condiciones hidrogeológicas la zona de Joya de Luna-Guaxcamá fue elegida para llevar a cabo las pruebas de conectividad hidráulica. La Figura 3.1 muestra las direcciones de flujo de agua subterránea.

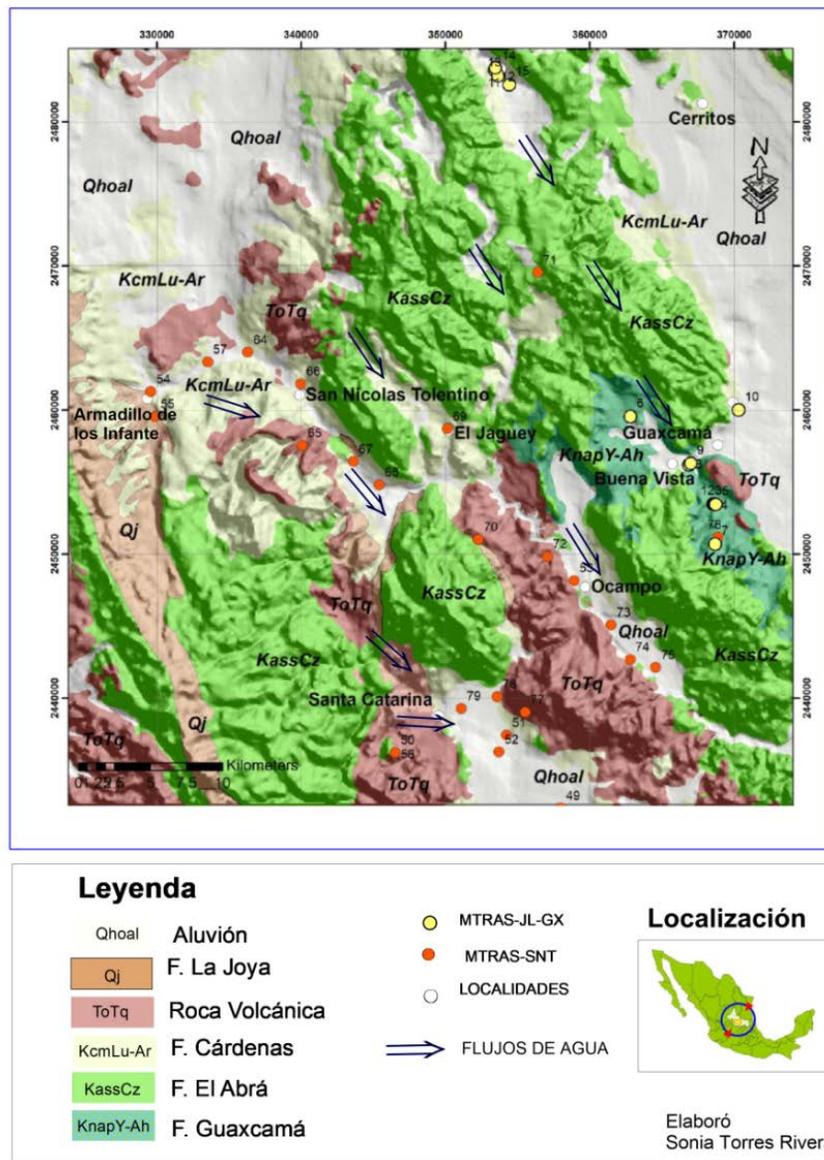


Figura 3.1.- Análisis preliminar de las direcciones de flujo en Joya de Luna, Buenavista/Puerta del río, Guaxcamá y San Nicolás Tolentino.

3.2.- Metodología de polínica ambiental (MEPAM).

MEPAM es una metodología que se divide en tres etapas. La primer etapa **(3a)** se refiere a hacer una caracterización de polínica ambiental la cual es cosechada directa de la flor, segunda etapa **(3b)** es hacer la captura de polen que se encuentra suspendido en el agua subterránea. Para dar validación a los resultados polínicos se emplearon isotopos estables la cual se refiere a la tercer etapa **(3c)** de esta metodología (Figuras 3.2 y 3.3).

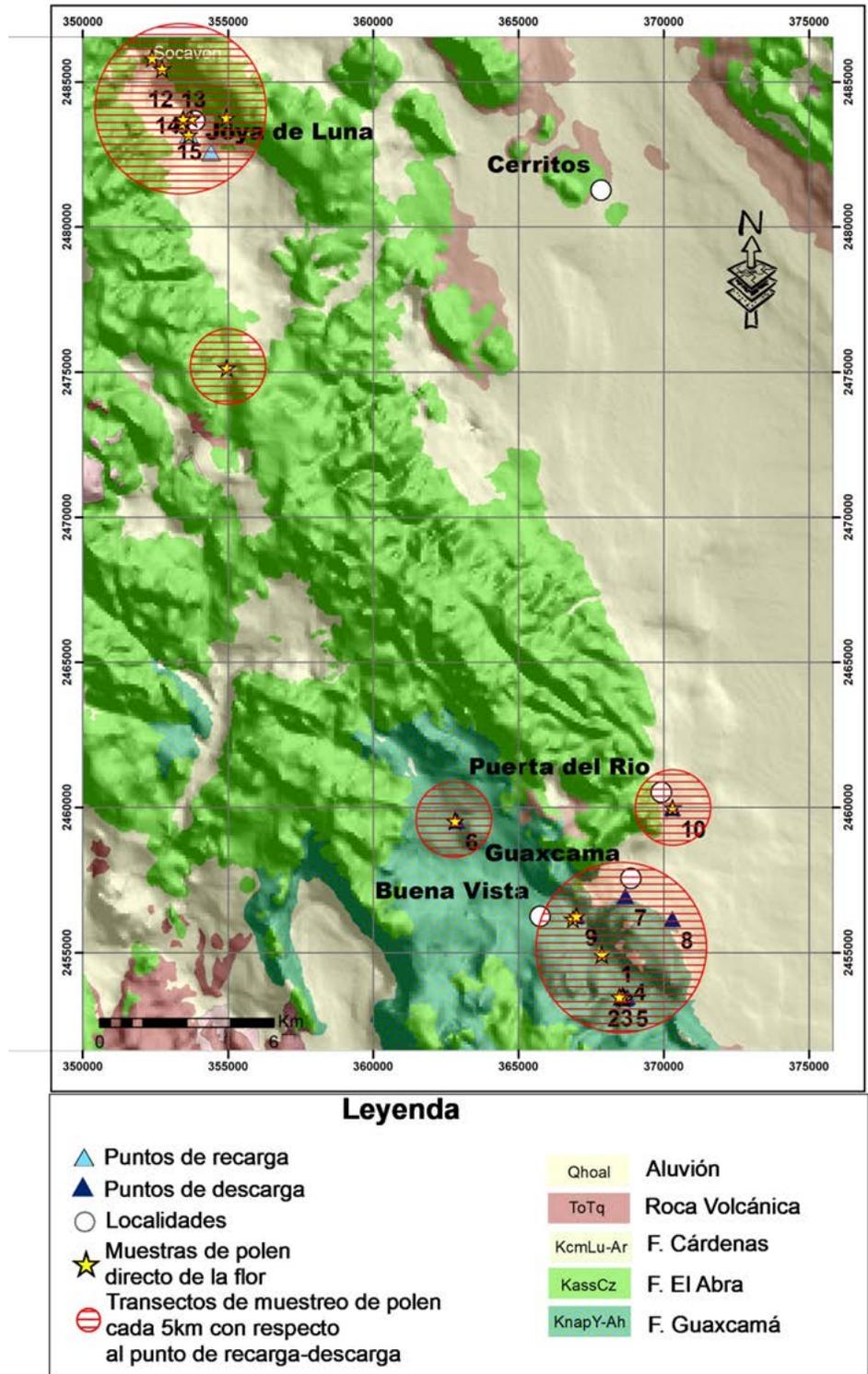


Figura 3.2.-Geología y localización de los puntos de muestreo de agua y polen en

3a).- Polínica ambiental directamente de la vegetación.

1.- Preparación de material dentro de laboratorio en una mesa limpia se seleccionan viales.

2.- Se prepara una solución con: 3 gotas de hidróxido de potasio al 10%, 3 gotas de formol al 35% y 2gr de urea para sedimentar los sólidos suspendidos. (Leibundgut *et al.*, 2009).

3.- Tomando en cuenta los transectos altitudinales de vegetación de 5 km circundantes a los puntos de muestreo como se observa en la (Figura 3.3), se cosechó polen de las especies directamente de la flor (Figuras 3.4A y 3.4B), en cada transecto y depositándolos en los viales con la solución preparada antes mencionada, (Figuras 3.4C y 3.4D).

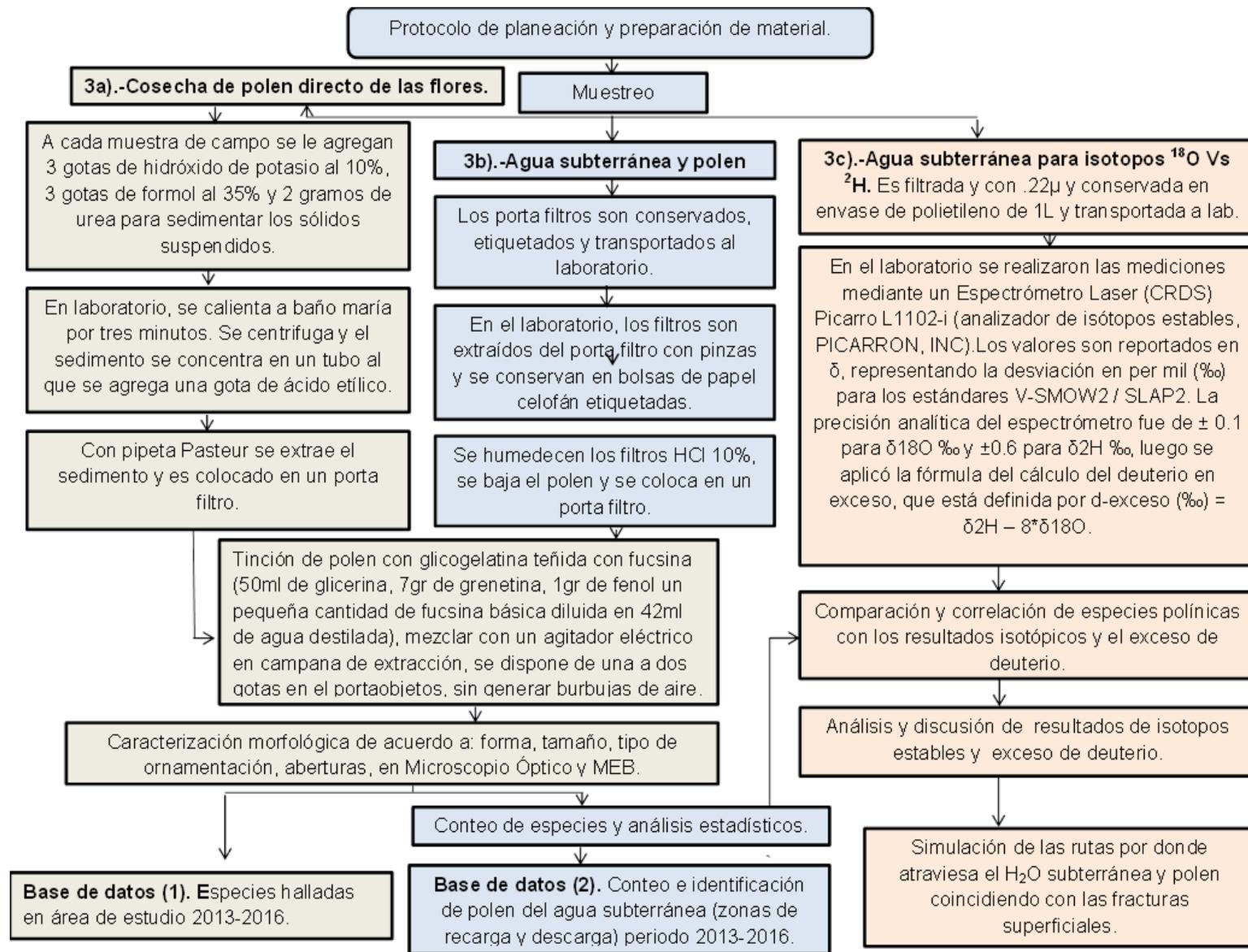


Figura 3.3.- Diagrama de flujo de la metodología MEPAM: 3a) cosecha directo de las flores, 3b) captura de polen en el agua subterránea y 3c) agua subterránea para isotopos estables.



A)



B)



C)



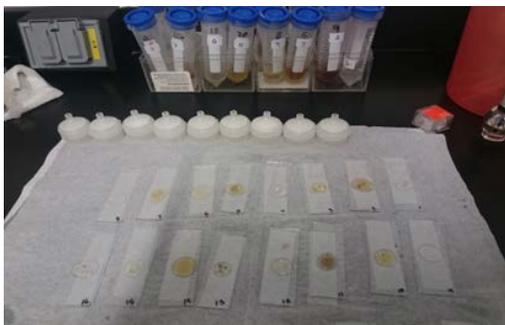
D)

Figura 3.4.- Cosecha de polen directo de la flor.

4.- Con información descriptiva referente al sitio de la cosecha, a cada muestra se le dio un tratamiento en el laboratorio. Los viales son calentados en baño maría por tres minutos, se centrifuga y el sedimento se concentra en un tubo al que se le se añade una gota de ácido etílico.

5.- Con pipeta Pasteur se extrae el sedimento y se coloca una tercera parte de la preparación en portaobjetos biológicos (Figura 3.5A y 3.5B) y son identificados con una etiqueta en la que se anota: nombre o iniciales del sitio de muestreo, el número de muestra y la fecha. Los granos de polen se marcan con glicogelatina teñida con fucsina.

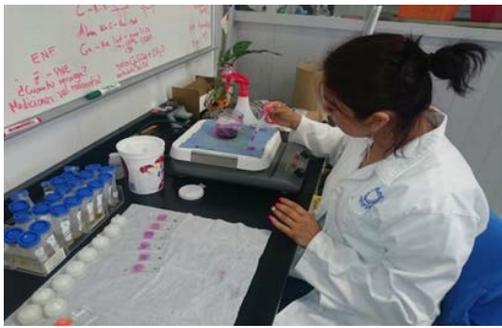
6.- Para la **preparación de glicogelatina teñida con fucsina** se utilizan 50ml de glicerina, 7gr de grenetina, 1gr de fenol un pequeña cantidad de fucsina básica diluidos en 42ml de agua destilada, mezclada con un agitador eléctrico en campana de extracción debido al carácter tóxico del fenol, esta mezcla de fucsina facilita una mejor identificación y recuento de los granos de polen con un dispensador de gotas se dispone de una a dos gotas en el portaobjetos, sin generar burbujas de aire al depositarla (Figura 3.5C). Se recomienda el sellado de las muestras por el borde del cubre objeto con una sustancia que permanezca inalterable a lo largo del tiempo para ello se utiliza laca-esmalte transparente de baja toxicidad y rápido secado (Figura 3.5D). Una vez montadas las muestras, es prudente esperar un cierto tiempo antes de proceder a su lectura al microscopio. De esta manera, la glicogelatina se solidificará actuando como adhesivo entre el portaobjetos y el cubreobjetos. Este tiempo también favorecerá el que los distintos tipos polínicos se colorean, siendo más evidentes sus características morfológicas externas.



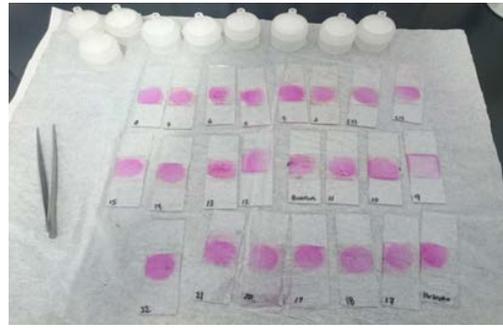
A)



B)



C)



D)

Figura 3.5.- Preparación de las muestras de polen cosechado directo de la flor.

7.- El análisis palinológico se llevó a cabo en el laboratorio de microscopía óptica del laboratorio de petrografía marca Nikon Eclipse CiPOL con cámara integrada Nikon DS-Fi2 con un campo óptico de $20\times = (0.24\mu\text{m}/\text{px})$ a resolución de 2560×1920 y $100\times = (.05\mu\text{m}/\text{px})$ a resolución de 2560×1920 . Las lecturas al microscopio se realizan de izquierda a derecha (Figura 3.6A y 3.6B) y en el (MEB) microscopio electrónico de barrido sus especificaciones son: alto vacío con recubrimiento de oro a una $I=40\text{mA}$ en un tiempo de 30seg. (Figura 3.7A), este puede aumentar hasta 300,000 veces el tamaño real de un objeto y nos da la oportunidad observar nuevos caracteres morfológicos o más exactamente micromorfológicos que de otra forma son imposibles de analizar (Figura 3.7B).

8.- Las descripciones están constituidas por los valores taxonómicos como: descripción de la forma, ornamentación y abertura de la exina de los granos de polen y esporas, tamaño, contornos en vista polar y ecuatorial.

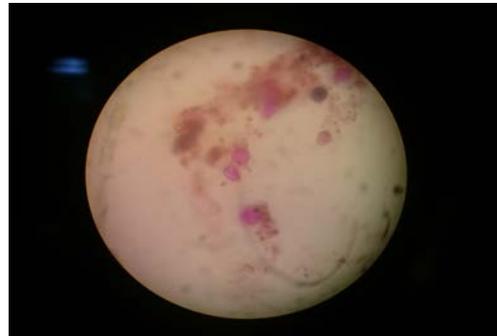
9.- Una vez realizada la caracterización se genera una clasificación de especies.

10.- Se genera una base de datos taxonómica de polen cosechado directo de la

flor. (anexo).



A)



B)

Figura 3.6.- Caracterización morfológica de polen en el microscopio.



A)



B)

Figura 3.7.- Microscopio electrónico de barrido (MEB); A) muestras de polen a alto vacío con recubrimiento de oro, B) imagen aumentada 3,000 veces el tamaño real de polen.

3b).- Captura de polen en agua subterránea.

1.- Preparación de material. Se inicia en el laboratorio colocando los envases

de polietileno en extran durante 7hrs después del tiempo trascurrido se da un enjuague 7 veces con agua destilada con la finalidad de eliminar residuos presentes posteriormente se pasan al ácido clorhídrico al 10% (HCL al 10%) una vez que el recipiente cumplió con el tiempo indicado se lleva el mismo procedimiento antes mencionado, enjuague, en seguida se colocan los envases en HCL al 10% con una duración de 30 minutos, nuevamente se procede a enjuagar 7 veces con agua destilada, una vez finalizando el lavado se procede al secado.

2.- Para prevenir confusiones en la identificación de las muestras, se etiquetaron los frascos antes del muestreo, etiquetas adhesivas en las que se anotó la siguiente información: número de muestra, nombre (ion-cación), fecha y lugar de recolección y con guantes de nitrilo, con unas pinzas y con mucho cuidado se colocan filtros de 0.45μ en porta-filtros tratando de que queden estos filtros bien centrados y colocados en el porta filtro.

3.- En estas zonas se realizaron un total de 135 muestreos en 15 sitios (5 norias en zona de recarga Joya de Luna a una profundidad de 6 a 10m y 10 manantiales en zona de descarga Guaxcamá).

4.- Campaña de muestreo se realiza una descripción del sitio que se muestrea comenzando con Fecha, coordenadas del sitio, Tipo de vegetación, el clima (seco o húmedo), se toma en cuenta la formación geológica donde se encuentra, tipos de flujos laminar o turbulento y si son ascendentes, descendentes u horizontales, se toman los niveles freáticos o piezométrico y tipo de suelo.

5.- En este método de muestreo de partículas biológicas en el agua subterránea es necesario llevar una bitácora para el registro de muestras que se recolectaran

cada mes durante época de lluvia y época de estiaje.

6.- Para captar las partículas suspendidas en el agua subterránea en norias y manantiales en la zona de recarga Joya de Luna y zona de descarga Guaxcamá (Figuras 3.8A, B y C). Utilizamos una bomba peristáltica (Figura 3.8D), (bomba con desplazamiento positivo usada para bombear variedad de fluidos). La bomba peristáltica contiene un tubo flexible empotrado dentro de una cubierta circular la cual está integrada a un rotor que da vueltas, el tubo flexible de la bomba peristáltica tiene dos extremos uno de ellos se introduce directo al agua subterránea de los aprovechamientos muestreados, para succionar la muestra de agua subterránea pasando por el tubo flexible empotrado hasta llegar al otro extremo donde se filtra la muestra con filtro de $.45\mu$ y es contenida en un envase de polietileno de 1Lt. La (Tabla 3) muestra los diferentes puntos de muestreo.



A)



B)



C)



D)

Figura .3.8.- Diferentes aprovechamientos: A) Joya de Luna, B) Buenavista, C) Puerta del río y D) Guaxcamá.

Tabla 3.- Puntos de muestreo de agua subterránea y captura de polen.

PUNTO	SITIO	APROV	X	Y	Z
1	GUAXACAMÁ LA MINA (INICIO)	MANANTIAL	368569	2453468	1222
2	GUAXACAMÁ LA MINA (MEZQUITE)	MANANTIAL	368560	2453477	1224
3	GUAXCAMÁ LA MINA (ARROYO)	MANANTIAL	368624	2453495	1231
4	GUAXACAMÁ LA MINA (CONGLOMERADO CALIZAS)	MANANTIAL	368668	2453434	1230
5	LA MINA (ESCURRIMIENTO PARED SOBRE EL ARROYO)	MANANTIAL	368741	2453481	1223
6	OJO DE AGUA (LAVADERO)	MANANTIAL	362880	2459558	1273
7	LA CUEVA	MANANTIAL	368689	2456955	1211
8	BUENAVISTA	MANANTIAL	370294	2456169	1197
9	BUENAVISTA (AZUFROSA)	MANANTIAL	366995	2456279	1192
10	PUERTA DEL RIO	MANANTIAL	370294	2459992	1005
11	JOYA DE LUNA (NORIA ACORRALADA)	NORIA	353663	2483188	1245
12	JOYA DE LUNA (NORIA CON BOMBA)	NORIA	353461	2483733	1245
13	JOYA DE LUNA (NORIA NUEVA CON MEZQUITE)	NORIA	353433	2483672	1244
14	JOYA DE LUNA (NORIA DEL CAMINO PASO REAL)	NORIA	353422	2483583	1243
15	JOYA DE LUNA (NORIA CARRETERA CHILLADORA)	NORIA	354422	2482572	1157

Estas muestras de agua subterránea son conservadas dependiendo del análisis a realizar y son transportadas al laboratorio a una temperatura de 4°C (anexo).

7.- Para la preparación de las muestras con unas pinzas y guantes de nitrilo se

extraen los filtros de las bolsas de papel celofán, con un dispensador se añaden de dos a tres gotas de ácido clorhídrico al 10% para que se humedezcan.

8.- Los portaobjetos biológicos son identificados con una etiqueta en la que se anota: nombre o iniciales del sitio muestreo, el número de muestra y la fecha. Los granos de polen se marcan con glicogelatina teñida con fucsina la preparación de esta se ve en el apartado de la metodología de polínica ambiental (ver punto 6).

9.- Una vez húmedos los filtros, se hace un raspado con un aplicador de madera tratando de bajar todo el material orgánico y polen contenido en el papel filtro, La muestra debe disponerse sobre el portaobjetos con la glicogelatina y cubrir con un cubre objeto y se hace el sellado del borde del cubre objeto (ver punto 6) del apartado de polínica ambiental.

10.- En el análisis palinológico, las descripciones taxonómicas y la caracterización de polen toma en cuenta la estructura externa del grano como se indica en el punto del apartado de la metodología de polínica ambiental, la (Figura 3.9) muestra un ejemplo de la descripción morfológica de algunos granos de polen.

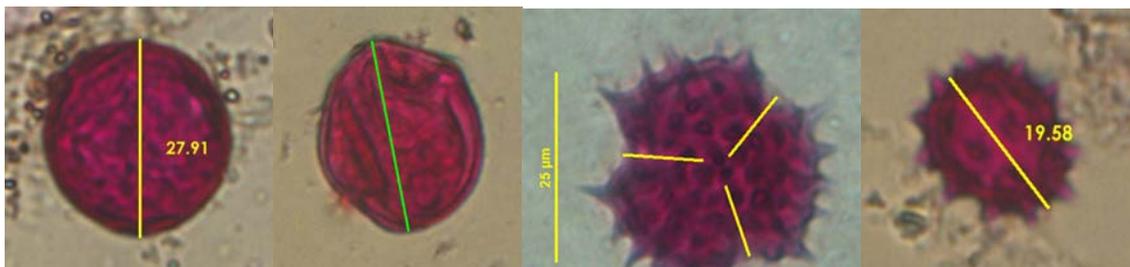


Figura 3.9.- Descripción morfológica de polen: 1) *Poaceae*: Monoporado, visión polar; forma elíptica. Tamaño de 27.91 μ . Exina de 1.5 μ de grosor, con ornamentación fosulada (superficie lisa con endiduras diminutas); 2) *Poaceae*: Monoporada vista ecuatorial monosulcada, polen colgado, con ornamentación psilada; 3) vista polar, con grosor de exina de 2 μ m, tamaño 22 μ m., teicolporado exina granulosa con ornamentación equinada; 4) vista ecuatorial, tricolporado, tamaño 19.58 μ m, exina granulosa con ornamentación equinada.

11.- Se genera una base de datos taxonómica del polen suspendido en las aguas subterráneas.

3c).- Caracterización de isótopos hidrológicos de ^{18}O y ^2H .

1.- Para dar sustento a la aplicación polínica ambiental, por otro lado se realiza la toma de muestras de agua subterránea de los 15 aprovechamientos de Joya de Luna y en Guaxcamá siguiendo el mismo procedimiento del apartado de la metodología de captura de polen en agua subterránea, para realizar el análisis isotópico de ^{18}O y ^2H del mes de Noviembre 2013.

2.- Las mediciones se realizaron mediante un Espectrómetro Laser Isotópico (CRDS) (Figura 3.3). Se estandarizaron las muestras isotópicas con la porción de abundancia isotópica de una muestra R, se da con respecto a la norma V-SMOW aceptada internacionalmente con la relación de abundancia isotópica Rstandar (Ecuación 4). Para las muestras de agua y muchos isótopos ambientales es conveniente y común multiplicar los valores de $\delta^{18}\text{O}$ o $\delta^2\text{H}$ por un factor de 1000 como

‰ con respecto al estándar que se utiliza. En la notación δ , los valores positivos indican un enriquecimiento de ^{18}O o ^2H en comparación con el estándar utilizado, mientras que los valores negativos significan un agotamiento de los isótopos más pesados en la muestra. (Leibundgut *et al.*, 2009).

$$\delta = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{standar}}}{R_{\text{standar}}} (1000) = \text{‰} \quad \text{Ecuación 4}$$

Luego se aplica la fórmula del exceso de deuterio " δ ", $\Delta\text{D} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$ que se obtienen por calculo a partir de los valores de ^{18}O y ^2H , deben corresponder a una misma muestra de agua y no a valores medios, para evitar introducir errores. El exceso de deuterio más negativo indica que hubo poca interacción agua-roca la cual está asociada a las muestras en la zona de recarga, por el contrario cuando existe interacción agua-roca el exceso de deuterio es más positivo y las muestras están asociadas a la zona de descarga. Estos gráficos permitieron hacer una comparación y correlación de las especies de polínica ambiental e hidrogeología isotópica en la zona de recarga-descarga.

3.- Se realizó el análisis de comparación y correlación de especies polínicas e hidrogeología isotópica en zona de recarga y descarga. En la (Figura 3.3) se muestra el diagrama de flujo de la metodología.

4.- Análisis y discusión de resultados.

5.- Simulación de las rutas de flujo de agua y emigración de polen coincidiendo con las fracturas superficiales.

4.- MARCO GEOLOGICO

4.1.- Marco Geológico Regional.

El área de estudio forma parte de la provincia geológica de la Sierra Madre Oriental (Ortega-Gutiérrez, 1981), la cual es una cadena montañosa de aproximadamente 1350 kilómetros de longitud que se extiende desde el sur del río Bravo y corre paralela al Golfo de México hasta unirse con la Faja Volcánica Transmexicana, que separa América del Norte de América Central (Figura 4.1). La Sierra Madre Oriental, es una cordillera cuyo relieve se debe a la deformación de rocas mesozoicas y de su complejo basal, que fueron levantados, comprimidos y transportados hacia el noreste, formando un cinturón de pliegues y cabalgaduras durante la orogenia Laramide. (Eguiluz *et al.*, 2000)

El área de estudio forma parte de la porción occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, elemento paleogeográfico que forma parte de la Sierra Madre Oriental (Carrillo-Bravo, 1971) de edad mesozoica estas rocas afloran en los núcleos de los anticlinales de Santo Domingo y Guaxcamá y en margen poniente de la Sierra de Guadalcazar y en la zona de la mina Vía Láctea, situada al poniente del poblado de Núñez, S.L.P. donde se presenta como yeso y anhidrita (Carrillo-Bravo, 1971). PEMEX perforó varios pozos en esta región de la PVSLP; en Guaxcamá localidad tipo se cortaron 500 m de evaporitas, el Guaxcamá No 1, se cortaron 3009 m de esta formación, en las cercanías de la localidad de la Mina Vía

Láctea se cortaron 200 m y en el pozo Agua Nueva No 1, se cortó una sección de evaporitas de 1987 m.

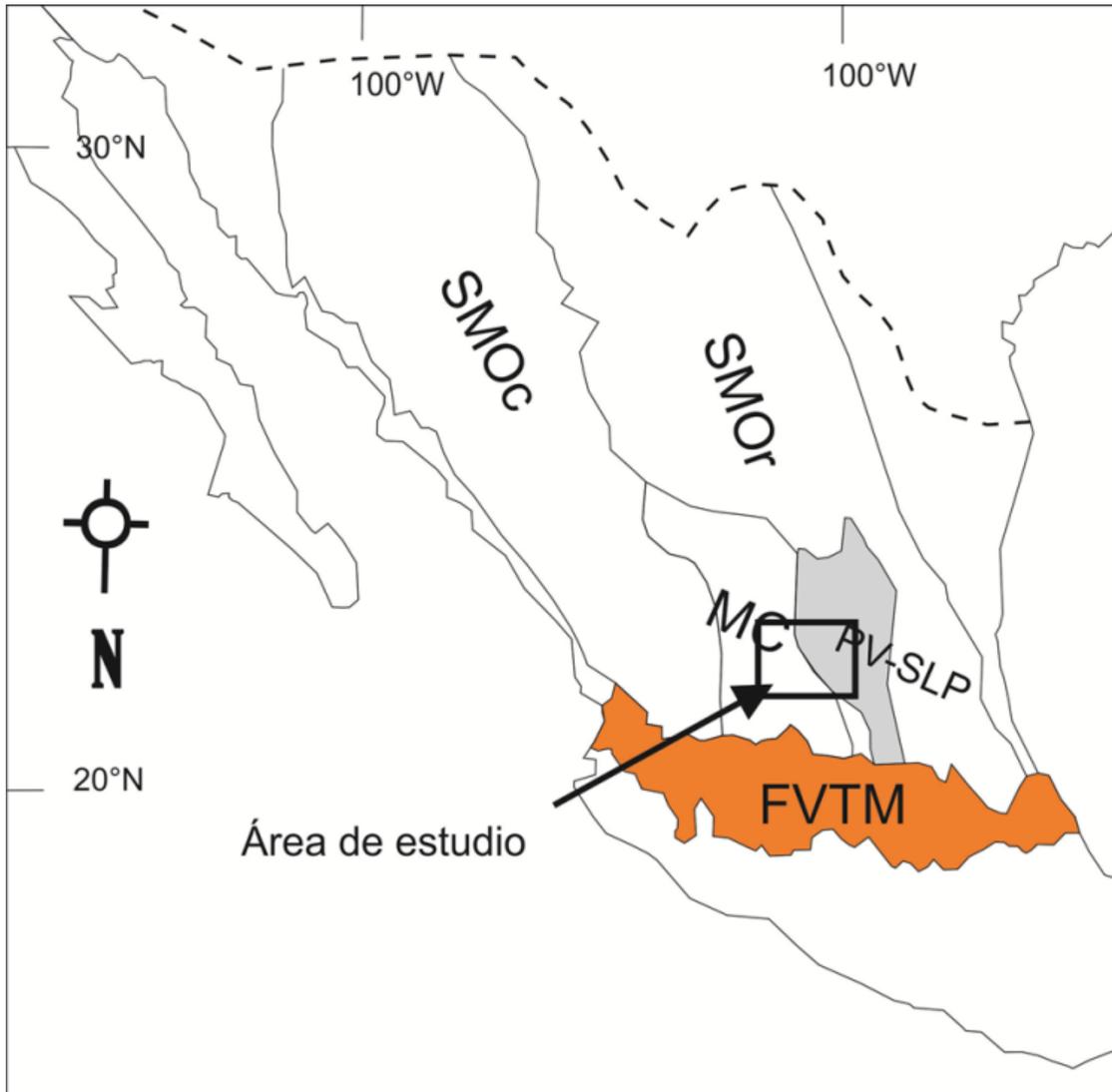


Figura 4.1.- Localización del área de estudio, con respecto a la Sierra Madre Oriental y Plataforma Valles San Luis Potosí (modificado de Alaniz-Alvarez y Nieto-Samaniego, 2005). FVTM-Faja Volcánica Transmexicana; SMO-Sierra Madre Occidental; MC- Mesa Central; PV-SLP-Plataforma Valles-San Luis Potosí; SMOR- Sierra Madre Oriental.

Las rocas con mayor cobertura es un complejo calcáreo de tipo de plataformade

edad Albiano-Cenomaniano, que en esta región corresponden las tres facies de la Formación El Abra (pre-arrecifal o Tamabra, arrecifal o Tanilul y post-arrecifal o facie El Abra; (Figura 4.2). El nombre de esta formación fue tomado de su localidad tipo en el Cañón del Abra, al oriente de Ciudad Valles, S.L.P.,(Muir,1934).

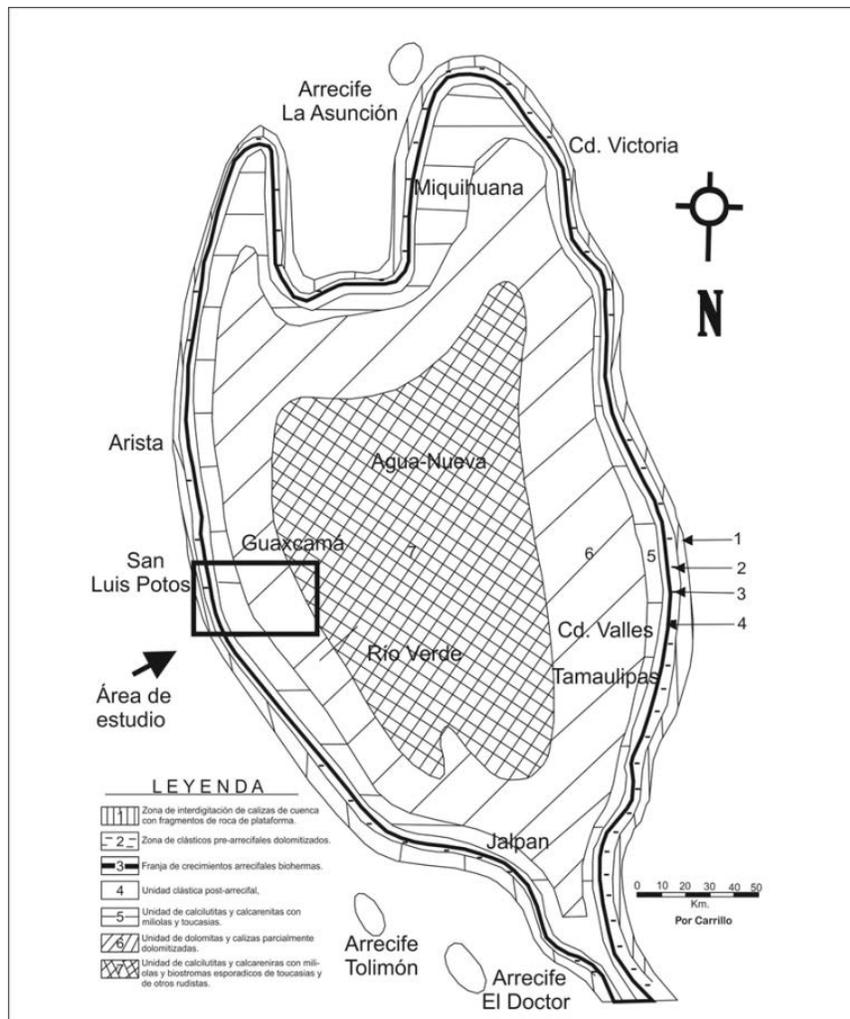


Figura 4.2.- Distribución de las facies de la Formación El Abra (Tomado de Carrillo, 1971).

De manera general esta formación está formada por calizas masivas (bancos arre-

cifales) separados por horizontes de calcarenitas oolíticas. Las calizas son compactas, con porosidad secundaria producto de lixiviación, con fracturamiento importante desarrollando grietas y cavernas. Su espesor puede alcanzar los 2000 m (Carrillo, 1971). En la zona de Arroyo Seco, S.L.P., afloran un poco más de 200 m. En el pozo Tolentino No 1 perforado por PEMEX cortó 3125 m. Tomando en cuenta su contenido faunístico se le ha asignado una edad Aptiano. La facie post-arrecifal de la Formación El Abra, su localidad tipo se localiza en la estación El Abra, al oriente de Ciudad Valles S.L.P.

En la porción occidental de la PVSLP, sobre la plataforma hay presencia de rocas volcánicas de edad Oligoceno sobre todo hacia su porción sur occidental en los límites de los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, donde se localiza el Campo Volcánico del Río Santa María (Figura 4.3); (Labarthe *et al.*, 1984), el cual está compuesto por una secuencia de lavas andesíticas, flujos piroclásticos y lavas de composición riolítica a dacítica que se esparcieron por todo el límite suroccidental de esta plataforma, detectándose afloramientos hasta la parte central poniente, sobre todo de los flujos piroclásticos que arribaron desde el sur. En la zona de Santa Catarina, S.L.P., se localiza el volcán de Atotonilco que arrojó flujos piroclásticos que generaron avalanchas y que se extendieron por todo el valle de Santa Catarina (Labarthe *et al.*, 1999). En la porción central en las localidades de Cárdenas, Río verde, Ciudad del Maíz, Cerritos, San Ciro hay afloramientos de basaltos fisúrales que se encuentran alineados en patrones NW-SE, así como cráteres de explosión (Maares), con edades que varían desde el Cuaternario hasta el Mioceno tardío (Sánchez, 1998).

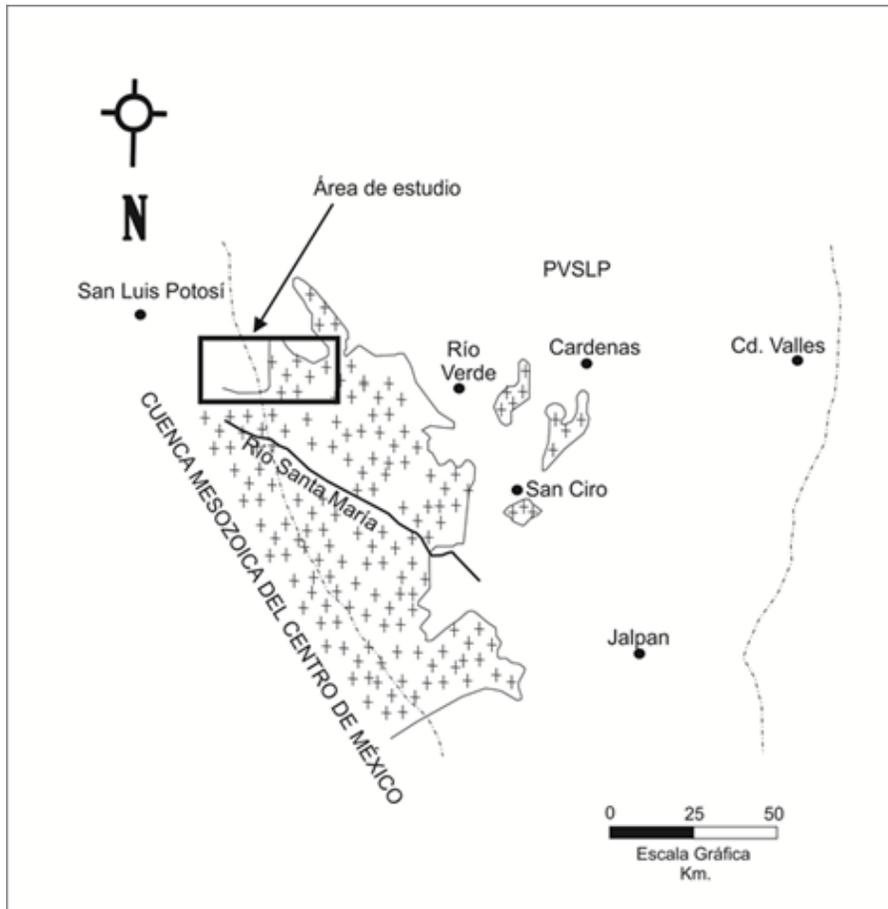


Figura 4.3.- Localización del área de estudio como parte del Campo Volcánico del Río Santa María (CVRSM) y dentro de la plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP) (Modificado de Labarthe *et al.*, 1989)

4.2.- Estratigrafía.

4.2.1.- Formación Guaxcamá (Aptiano)

Los primeros reportes sobre esta secuencia fueron publicados por Del Castillo, (1869). Posteriormente, Seitz (1906), White (1909), Wittch (1920) y Goldschmid (1933), hacen referencia a una “zona de yeso” en las minas de Guaxcamá, locali-

zada cerca del poblado de Guaxcamá, S. L. P., (Martínez, 1965), estudio esta secuencia evaporítica del Cretácico Temprano y la definió formalmente con el nombre de Formación Guaxcamá (Figura 4.4 y 4.5).

Litología: la secuencia estratigráfica del área está representada desde el Aptiano; compuesta de capas medianas (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 blanco lechoso, frecuentemente laminado y con intercalaciones de capas de anhidrita de forma bandeada la cual se presenta en forma de diapiros con alto contenido de azufre en forma diseminada y en otras partes concentrada que formó yacimientos explotables como es el caso de la mina Guaxcamá.

Espesor: El espesor de esta formación se desconoce, como se dijo antes se presenta en forma de diapiros teniendo como roca encajonante a la caliza arrecifal de la Formación El Abra, sin embargo de acuerdo a la que perforó PEMEX (CRM, 1992) un pozo exploratorio en el Pozo San Nicolás, ubicado al sur de la rancharía Valle de Los Fantasmas, donde se han cortado secuencias de la Formación Guaxcamá, de 3009 m, este, sin duda es un espesor tectónico (Carrillo, 1971).

Correlación estratigráfica: Esta formación se correlaciona 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 de la Cuenca Mesozoica del Centro de México (López, 2003).

Edad: la edad de esta formación, con base en su posición estratigráfica es Aptiano,

sin embargo, (Carrillo, 1971) le asignó una edad Neocomiano-Aptiano

4.2.2.- Formación El Abra (Albiano-Cenomaniano)

Los primeros reportes sobre la Formación El Abra provienen de Garfias (1915) y Powers (1925), quienes hacen referencia a la “Caliza El Abra”, la cual se encontraba en los campos petroleros de la Faja de Oro. Otros estudios sobre esta formación fueron realizados por Díaz (1927), Heim (1925), Baker (1926), Adkins (1930), pero fue Muir (1934), quien la definió separándola en dos facies una denominada Taninul, la cual comprende las zonas arrecifales compuesta por rudistas y la facies El Abra que corresponden a las zonas detrás del margen arrecifal incluyendo ambientes lagunares, rica en fauna bentónica (miliolidos). Trabajos posteriores sobre esta formación han sido realizados por Bonet (1952), Carrillo (1971), Alencaster *et al.*, (1999), Pichardo (2006). La localidad tipo para esta formación se encuentra en el Cañón El Abra, sobre la carretera Ciudad Valles-Tampico (Torres, 1994; López, 2003) (Figura 4.4 y 4.5).

Litología: 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 cársticidad. En algunas partes, se presenta dolomitizada, lo cual se distingue por su aspecto sacaroide, un tono de gris más oscuro que los estratos normales de la caliza. Estas calizas arrecifales se encuentran aflorando extensamente, constituyendo casi un 95% del área de estudio presentando la secuencia sedimentaria más importante, esta formación se encuentra aflorando de bancos de 6 a 3m de espesor y en algunas partes con líneas estilolíticas.

La secuencia calcárea que constituye la Formación El Abra se depositó en un ambiente de aguas someras, y cubre un espectro de facies de margen de arrecife (con construcciones biógenas compuestas predominantemente por rudistas, y escasos corales) y post-arrecife. Esta unidad muestra facies 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 (grandes componentes 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. (Salas, 2017)

Espesor: El espesor de esta secuencia es muy variable, mencionan hasta 1,800 m, en la carta Peotillos, en tanto que Pichardo (2006), reporta un espesor de 401 m en un perfil medido en la porción central de la misma carta (López, 2009). Basado en métodos geofísicos (Magnetoteluricos) Salas (2017) reporta un espesor estimado en Villa Juárez de aproximadamente 2300 m. Sobreyace concordantemente a la Formación Guaxcamá y subyace concordantemente a la secuencia de caliza-lutita de la Formación Soyatal y/o a lutita-areniscas de la Formación Cárdenas.

Correlación estratigráfica: Es correlacionable 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 al occidente de dicha plataforma.

Fósiles: la facies lagunar está bien representada en el área de trabajo por mudstone y wackestone con fauna especializada de zonas restringidas hipersalinas, donde dominan los foraminíferos bentónicos así como asociaciones de requiéndidos de conchas delgadas. Macrofauna de facies lagunares está representada por gasterópodos y es especialmente abundante en zonas como el valle de Los Fantasmas en la Sierra de Álvarez. Rudistas de concha delgada (“Toucasias”) están presentes sobre todo en la Sierra de Trejo.

Edad: de manera general, se ha considerado la edad de la Formación El Abra como Albiano-Cenomaniano (Carrillo, 1971), sin embargo, si se considera a esta formación como “el complejo calcáreo de tipo plataforma” (Carrillo, 1971), ésta tiene un rango estratigráfico 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, 1994; Alencaster *et al.*, 1999, Pichardo, 2006).

4.2.3.- Formación Cárdenas (Campaniano–Maastrichtiano).

Esta unidad fue definida por Imlay (1944), como Formación Cárdenas y re-definida años más tarde por Myers (1968), teniendo su localidad tipo en las cercanías de la estación de ferrocarril de Cárdenas, S. L. P., donde se compone de una alternancia de capas de lutita, arenisca y caliza de texturas variadas, las cuales se

presentan en paquetes, por lo que fue dividida en tres miembros Myers (1968). En la carta Formación Cárdenas, 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 inmediaciones del Picacho Los Dolores. Otros afloramientos más restringidos se encuentran en el extremo norte de la sierra de Trejo (Figura 4.4 y 4.5).

Litología: consta de capas delgadas y medias de arenisca rojiza a ocre y café oscura, en horizontes medios a finos (Fotografía 5). La arenisca es impura, pobremente clasificada, cuyos granos se componen en un 90% de líticos y el resto de cuarzo y feldespatos de formas angulosas a sub-redondeada, los cuales están en una matriz calcáreo-arcillosa (“grauwacas”). Rítmicamente las capas de arenisca gradúan a limolita, lutita y lutita calcárea. La secuencia en general muestra series repetitivas con gradación normal lo que produce una litología típica de arenisca media, fina, limolita y lutita en forma de depósitos tipo flysch. **Espesor:** No fue posible medir su espesor en el área estudiada debido a que su cima está erosionada.

Estratigrafía y correlación: Descansa concordantemente sobre la Formación Soyatal al oriente de la Sierra de Álvarez (Formación Tamabra; López, 2003), 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 discordante por de-

pósitos continentales terciarios o Plio-cuaternarios. Es correlacionable lateralmente al oeste con la Formación Caracol de la Cuenca Mesozoica del Centro de México y al norte y este de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, con la Formación Méndez de la cuenca de Tamaulipas.

Por su litología, en el área de estudio se considera que el ambiente de depósito fue marino somero, en una zona de aguas poco profundas cercana a la línea de playa. Su depósito estuvo controlado por el aporte de material terrígeno clástico generado desde el oceánico del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano que funcionó al poniente de México hasta su acreción contra el continente americano a fines del Cenomaniano (Campa, 1985; Monod *et al.*, 1990; Tardy *et al.*, 1991). La transgresión de los terrígenos sobre la plataforma fue tardíamente hasta el Campaniano Tardío (Torres, 1994).

Por su contenido faunístico y por posición estratigráfica, se le asigna una edad Campaniano–Maastrichtiano (Myers, 1968). Torres (1984) le estimó una edad Campaniano Tardío Maastrichtiano

4.2.4.- Basalto (Pleistoceno Tardío).

Esta unidad fue descrita por Garza (1978), en la cartografía geológica de la Hoja Santa Catarina, sin definirla formalmente, ubicándola en el Pleistoceno. Está distribuida de manera muy aislada al suroriente del poblado de Armadillo de Los Infante y al oriente de San Nicolás Tolentino (Figura 4.4 y 4.5).

La parte pre-volcánica está representada por un conglomerado formado por clastos de caliza, pedernal y rocas volcánicas félsicas (Aranda *et al.*, 1993) llamada como Formación La Joya, se le asigna una edad Pleistoceno superior por estar encima del basalto que se han podido datar en 0.6 Ma (Ferrusquia, 2011).

4.2.6.- Aluvión (Holoceno).

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 de la carta (Figura 4.4 y 4.5).

1. **Litología:** deposito compuesto por clastos arredondados a subredondados del tamaño de grava. Los clastos están compuestos por diferentes litologías, procedentes de las rocas aflorantes en las sierras y lomas que circundan a las depresiones o valles que los contienen.

Espesor y edad: 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.

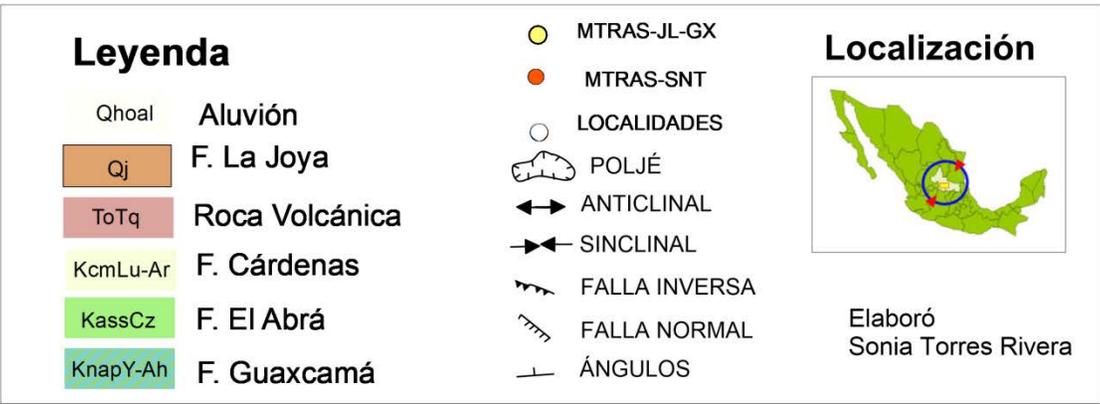
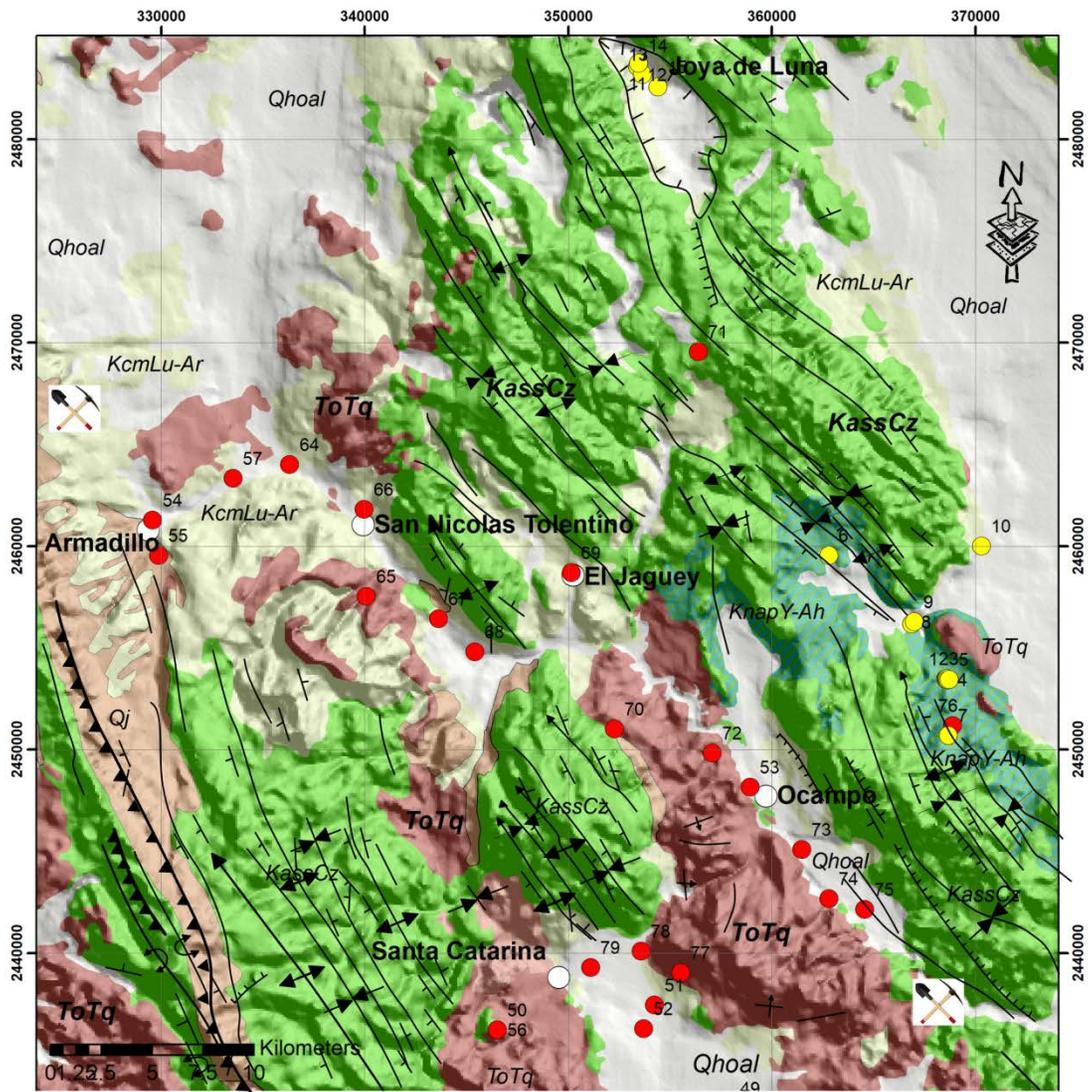


Figura 4.4.- Geología local y estructural de Joya de Luna-Guaxcamá.

Porción occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí

PERIODO		ÉPOCA	EDAD	LITOLOGIA		
CUATERNARIO		Reciente	Aluvión			
		Pleistoceno	Rocas volcánicas			
TERCIARIO	Neógeno	Plioceno				
		Mioceno				
		Oligoceno				
	Paleógeno	Eoceno	Cárdenas			
		Paleoceno				
		Maastrichtiano				
CRETÁCICO	Tardío	Senoniano	Campaniano	El Abra (Pre-arrecifal - Pos-arrecifal)		
			Santoniano			
			Coniaciano			
		Turoniano				
		Cenomaniano				
		Temprano	Albiano			Tardío
						Medio
	Temprano					
	Aptiano		Guaxcamá			
	Neocomiano				Barremiano	
					Hauteriviano	
					Valanginiano	
		Berriasiano				

Figura 4.5.- Columna estratigráfica de Joya de Luna-Guaxcamá.

4.3.- Geología Estructural

La geología estructural del área está representada por anticlinales, sinclinales, recostados hacia el oriente, de rumbo preferencial NW-SE con ejes estructurales doblemente buzantes hacia el SE y NW, constituidas principalmente por calizas de la Formación El Abra. Así mismo, tenemos estructuras diapiricas de composición anhidritica las cuales afloran entre Buenavista y Guaxcamá, reportan también fallas longitudinales con rumbo NE-SW, transversales a los pliegues de la Sierra El Tablón. También tenemos discordancias de tipo erosional entre la Formación Cárdenas y Formación El Abra.

Las estructuras que dominan al área de estudio son las siguientes: *a) Anticlinorio Las Víboras*, es una de las estructuras simétricas más grandes que se localizan cerca del área de estudio, su eje está localizado aproximadamente N30°W, siendo sus echados de 40° a 60°. Está formada por rocas de la Formación El Abra, afectada en su flanco NE, por una falla longitudinal, *b) sinclinorio El Conejo*, el área de estudio se encuentra ubicada sobre el sin-clinorio El Conejo el cual está conformado por rocas de la Formación el Abra que han sido erosionada y posteriormente sepultadas por conglomerados de material aluvial. El rumbo de su eje esta aproximadamente N35°W. *C) Sinclinal Cabezón*, se localiza hacia la parte NE Y SE de la área estudiad y se encuentra conformada por la formación El Abra, y la dirección de su eje es N30°W (Pérez, 2011).

Fallas y fracturamiento

En la zona montañosa que bordea a Joya de Luna, se identificaron dos sistemas principales de fracturamiento y fallamiento que se encuentran afectando a los sedimentos marinos (Zapata *et al.*, 1979). Uno es longitudinal y el otro perpendicular a los ejes de los plegamientos. Los fracturamientos y fallas longitudinales son los que han provocado el desarrollo de estructuras cársticas (dolinas, úvalas y polje) a lo largo de estos. Los ejes mayores están en dirección N40°W y el otro es de N60°W. El principal tiene una orientación NE-SW y el secundario NW-SE.

Las fallas están localizadas paralelamente hacia el NW-SW y NE-SE del Polje de Joya de Luna (Figura 4.4) y se encuentran afectando el flanco oriental del anticlinorio Las Víboras y porción Occidental del anticlinal El Cabezón respectivamente. Teniendo un rumbo aproximado de N30°W (Pérez, 2011).

5.- HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA.

Los hidrogeólogos durante mucho tiempo han observado que el flujo de agua subterránea a menudo no está relacionado con los límites de las unidades estratigráficas estándares. Los términos hidrogeológicos “acuífero” y “unidad hidroestratigráfica” son comúnmente utilizados para subdividir el subsuelo en unidades relacionadas con la hidrología de agua subterránea. Sin embargo, el término “acuífero” comúnmente se usa para definir el abastecimiento de agua en términos económicos como un adjetivo erróneo. En México, “acuífero” es comúnmente definido por convención administrativa y aparece en leyes y reglamentos locales de tal forma que hace difícil utilizar “acuífero” como un término técnico y menos aún científico, además de que, en ocasiones, es confundido con el término de “cuenca” (NRC, 1995; Antuna, 2004; Badan *et al.*, 2006; Herrera *et al.*, 2007). Por ejemplo, en la Ley de Aguas Nacionales (Artículo 3, fracción II) un acuífero se define como “cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo”. Sin embargo, no define el término de unidad hidroestratigráfica y probablemente la Ley de Aguas Nacionales considera acuífero y unidad hidrogeológica como sinónimos. El conocimiento y uso de un sistema de aguas subterráneas requiere una comprensión de

los factores hidrogeológicos que controlan el almacenamiento y transporte en el subsuelo del agua subterránea. Sin embargo, sabemos que los medios saturados se encuentran en cuencas rellenas por sedimentos que constituyen medios geológicos heterogéneos, por lo que la comprensión de transporte y almacenamiento subterráneo del agua es una difícil tarea. Por ello es importante el conocimiento de la estratigrafía (en este caso la hidroestratigrafía) de la cuenca en donde se encuentra el acuífero que es materia de estudio, y ayuda en la comprensión del movimiento del flujo y almacenamiento del agua subterránea. Sin embargo, existen muy pocos trabajos que utilicen el término de unidad hidroestratigráfica (Monreal *et al.*, 2001; Copeland *et al.*, 2009; Sanz *et al.*, 2009).

5.1.- Unidades Hidroestratigráficas.

El concepto de unidad hidroestratigráfica fue originalmente definido por Maxey (1964) como un cuerpo de roca de extensión considerable que forma parte de un esquema geológico con un sistema hidrológico distintivo, y como unidad fundamental para describir sistemas hidrogeológicos en el campo basada en las propiedades de las rocas que afectan las condiciones del agua subterránea. Maxey (1964) identificó la necesidad de definir unidades de agua subterránea basadas, no sólo en las características litológicas específicas, sino también en la dinámica del régimen hidrogeológico incluyendo parámetros aplicables especialmente al movimiento de agua, su ocurrencia y almacenamiento. Sin embargo, debido a que estos atributos no son propiedades materiales de las rocas, la definición de Maxey

(1964) no puede ser usada en concordancia con el Código Estratigráfico Norteamericano (NACSN, 2005), ya que éste estipula que las unidades litoestratigráficas deben estar basadas en contenido, límites y atributos físicos, como características líticas y posición estratigráfica. Es de gran importancia describir las formaciones geológicas que conforman la región, desde el punto de vista de su grado de permeabilidad.

a).- Formación Guaxcamá (Knap Y-Ah).

Formada por yeso y anhidrita, constituye la unidad más antigua de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (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), por lo cual llega a presentar cavidades.

b).- Formación El Abra (KassCz).

Esta unidad cubre la mayor parte del área del acuífero. En la mitad poniente de la área del acuífero Joya de Luna Guaxcamá, donde está encimada tectónicamente sobre la Formación Cárdenas, o en pliegues anticlinales y sinclinales muy amplios y con inclinación suave en sus flancos. Presenta permeabilidad primaria y secundaria.

Esta unidad cubre un 60% 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 "*carst*" se expresa en la formación de depresiones cársticas o dolinas, cuya mayor concentración está en Valle de Los Fantasma" 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.

c).- Formación Cárdenas (KcmLu-Ar).

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.

d).- Rocas Basálticas (ToTq).

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 de ellos están intercalados con sedimentos lacustres y solo afloran en las barrancas. En general tienen poca importancia hidrogeológica.

e).- Aluvión (Qhoal).

Esta unidad está formada por material suelto o semi-consolidado 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 Joya de Luna; con lutitas y areniscas en las inmediaciones de Villa Juárez y con yesos en las inmediaciones de Guaxcamá.

5.2.- Unidades permeables.

La unidad más extendida, la caliza de la formación El Abra, se considera como permeable sobre todo por su condición fracturada cárstica. 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 son de naturaleza muy permeable, pero no tienen ninguna incidencia en el sistema de aguas subterráneas.

5.3.- Unidades de escasa permeabilidad y no permeables.

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

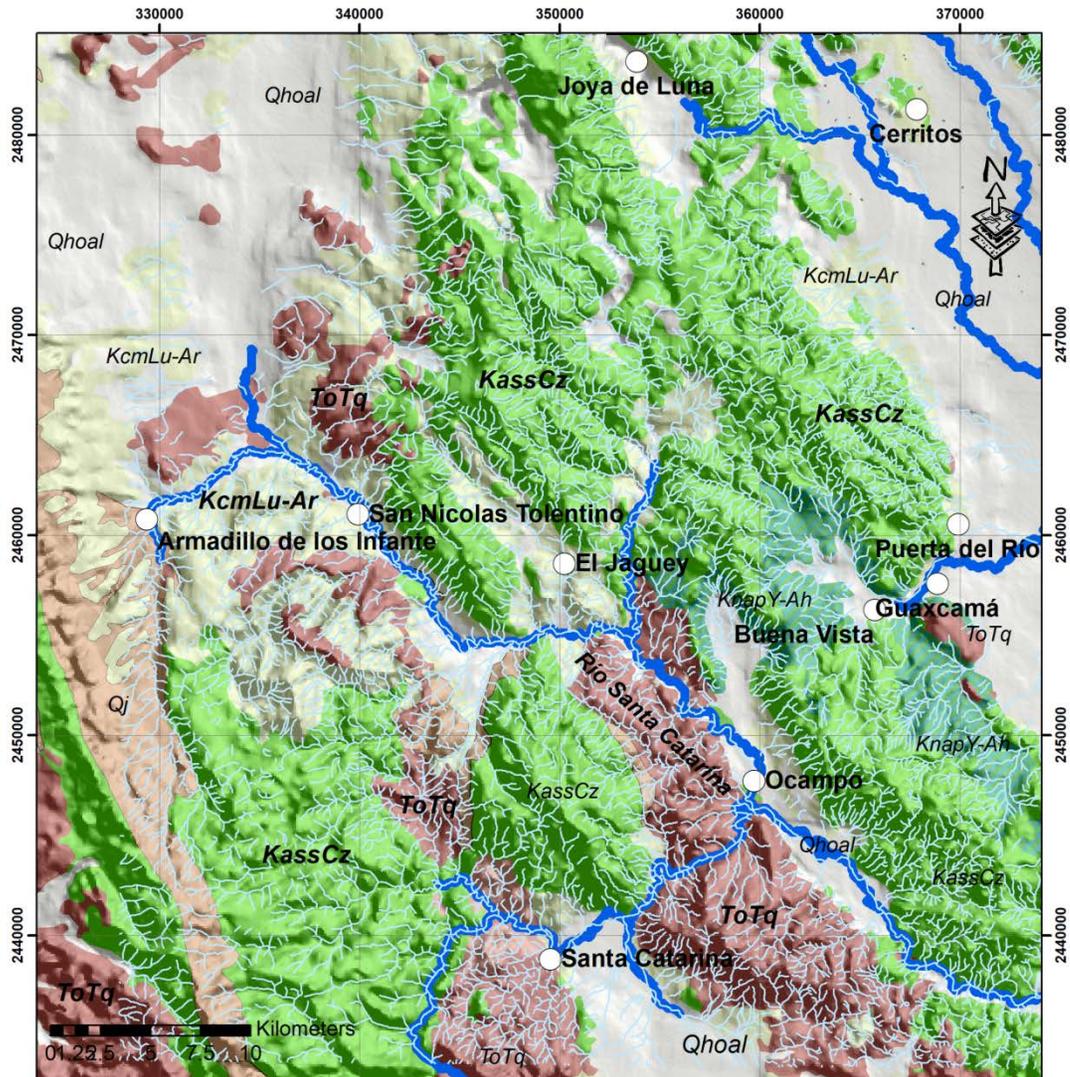
La unidad de depósitos lacustres de naturaleza arcillo-limosa aflorantes en las inmediaciones del valle Joya de Luna es de naturaleza poco permeable.

5.4.- Comportamiento hidrogeológico.

El comportamiento hidrogeológico dentro de la zona de estudio, es controlado por las condiciones estructurales (pliegues, fallas y fracturas), y por la distribución de materiales geológicos (unidades permeables e impermeables) en la región como se muestra en la (Figura 5.1). Los sistemas de fallas y fracturas pueden actuar como conductos hidrológicos o como zonas permeables que facilitan la recarga subterránea del sistema acuífero. Así mismo, en la zona de recarga en Joya de Luna, existen cavidades de disolución, típico de un ambiente cárstico (dolinas); como es el caso del Socavón al NW de la cuenca. Es posible que existan un gran número de fracturas y cavidades en el subsuelo, como lo evidencian las estructuras de colapso y disolución (dolinas) alineadas en los bordes de la Sierra del Tablón (Ramos *et al.*, 2012).

Las principales zonas de recarga de la región se ubican en las sierras, la recarga que recibe el acuífero en los sedimentos granulares que conforman el valle, ocurre por flujo horizontal principalmente en su parte occidental, por las calizas, por infiltración en los conglomerados de los escurrimientos que descienden de las sierras calcáreas sobre las que lateralmente descansan estas rocas y por infiltración en los sedimentos aluviales de la precipitación que ocurre sobre la llanura, así como por recarga inducida por retornos de riego y fugas en los sistemas de distribución

de agua potable y red de alcantarillado



Leyenda

- Qhoal Aluvión
- Qj F. La Joya
- ToTq Roca Volcánica
- KcmLu-Ar F. Cárdenas
- KassCz F. El Abrá
- KnapY-Ah F. Guaxcamá

- LOCALIDADES
- RIOS

Localización



Elaboró
Sonia Torres Rivera

Figura 5.1 Corrientes superficiales en San Nicolás Tolentino y Joya de Luna-Guaxcamá.

cuando la Formación El Abra se encuentra expuesta a la intemperie. Otra posible zona de recarga, es la cuenca cerrada de Joya de Luna. La zona de descarga se ubica en las partes bajas al sur de la zona de estudio, en el contacto de la Formación El Abra y Formación Guaxcamá (Figura 5.1), a mayor distancia en los manantiales de la Media Luna, la descarga ocurre por flujo horizontal, por extracción de agua subterránea, a través de pozos y norias. El fracturamiento y lineamientos estructurales (fallas y hundimientos de dolinas) están alineadas con orientación de NW-SE y NE-SW, se encuentran conectados superficialmente. Es probable que el Socavón de Joya de Luna (con una altura de 1230 msnm) y las dolinas alineadas estén conectados por cavidades bajo la Sierra El Tablón hasta la zona de descarga en Guaxcamá con una altura de 1112 msnm, generándose una diferencia de elevación de 118m. Se considera que las unidades estratigráficas establecidas previamente, forman un acuífero constituido en el medio granular que varía de libre a confinado, constituido por sedimentos granulares de granulometría predominantemente fina de baja permeabilidad en la parte central del valle, en sus porciones occidental y nororiental; y hacia su porción suroriental por sedimentos yesíferos de la Formación Guaxcamá, también de baja permeabilidad. Las rocas calcáreas fracturadas y plegadas, que presentan en algunas zonas cársticas, presentan continuidad hidráulica con el medio granular. La dirección preferencial del flujo subterráneo muestra una trayectoria de norte a sur, para la porción norte del acuífero, y de oeste a este para la porción sur. La aplicación de la relación de isotopos permite caracterizar las zonas de recarga y descarga, también se utiliza el exceso de

deuterio como un índice de evaporación del agua.

El acuífero Cerritos-Villa Juárez se tiene la presencia de dos acuíferos uno contenido en material granular heterogéneo localizado en la parte central de la región, con espesor mayor a 300 m y permeabilidad que varía de baja a alta debido a la ocurrencia de yesos y rocas calcáreas; y otro acuífero contenido en calizas del Cretácico Inferior, con permeabilidad secundaria debido a fallas, fracturas y alto grado de disolución Ramos *et al.*, (2012).

Hacia el valle de Cerritos, el acuífero de material granular es de tipo libre y la profundidad del nivel estático varía de 5 y 40 m, teniendo un flujo subterráneo que se dirige del borde occidental de la zona hacia el centro y sureste de la misma, en donde llega a brotar en forma de manantiales. El acuífero de calizas es de tipo semiconfinado y presenta comunicación hidráulica al ceder grandes volúmenes de agua por flujo horizontal al conglomerado y depósito aluvial.

6.- RESULTADOS.

6.1.- Sistema San Nicolás Tolentino.

El análisis preliminar indica que las direcciones de flujo del acuífero de SNT tiene una profundidad de 1 m aumentando hacia el norte 14 m al sur Los Morenos 24 m, Ocampo Paraíso con una profundidad de 3 m aumentando a 10m al centro de la cuenca y Santa Catarina mayor cantidad de pozos los valores fluctúan de sur a norte de 25 m a 300 m como lo vemos en la (Figura 6.1).

En el valle de Santa Catarina la familia de aguas predominante es la Calco-Sódica-Bicarbonatada, y, en segundo lugar, Bicarbonatada-Cálcica (Figura 19A). En esta subcuenca se han detectado dos acuíferos (Torres, 2013), uno de tipo libre y otro confinado; la recarga de agua al acuífero libre tiene la influencia de los ríos Santa Catarina y San Martín. Las familias de agua mencionadas reflejan que la alimentación principal corresponde al río Santa Catarina y su principal contenido de sales corresponde a la interacción del agua con rocas calcáreas familia Bicarbonatada-Cálcica y el movimiento de las aguas en el material granular, el cual consiste predominantemente de los productos de la Avalancha San Martín (Torres *et al.*, 2010). (Figura 6.2B).

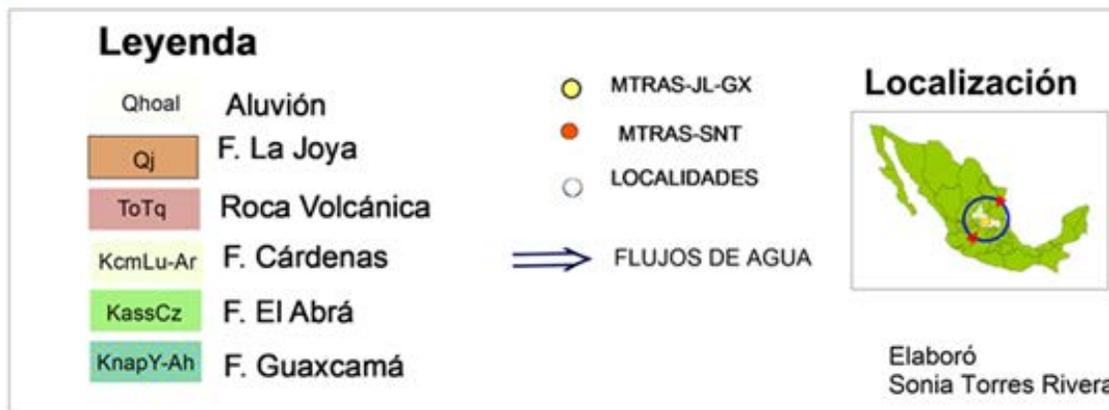
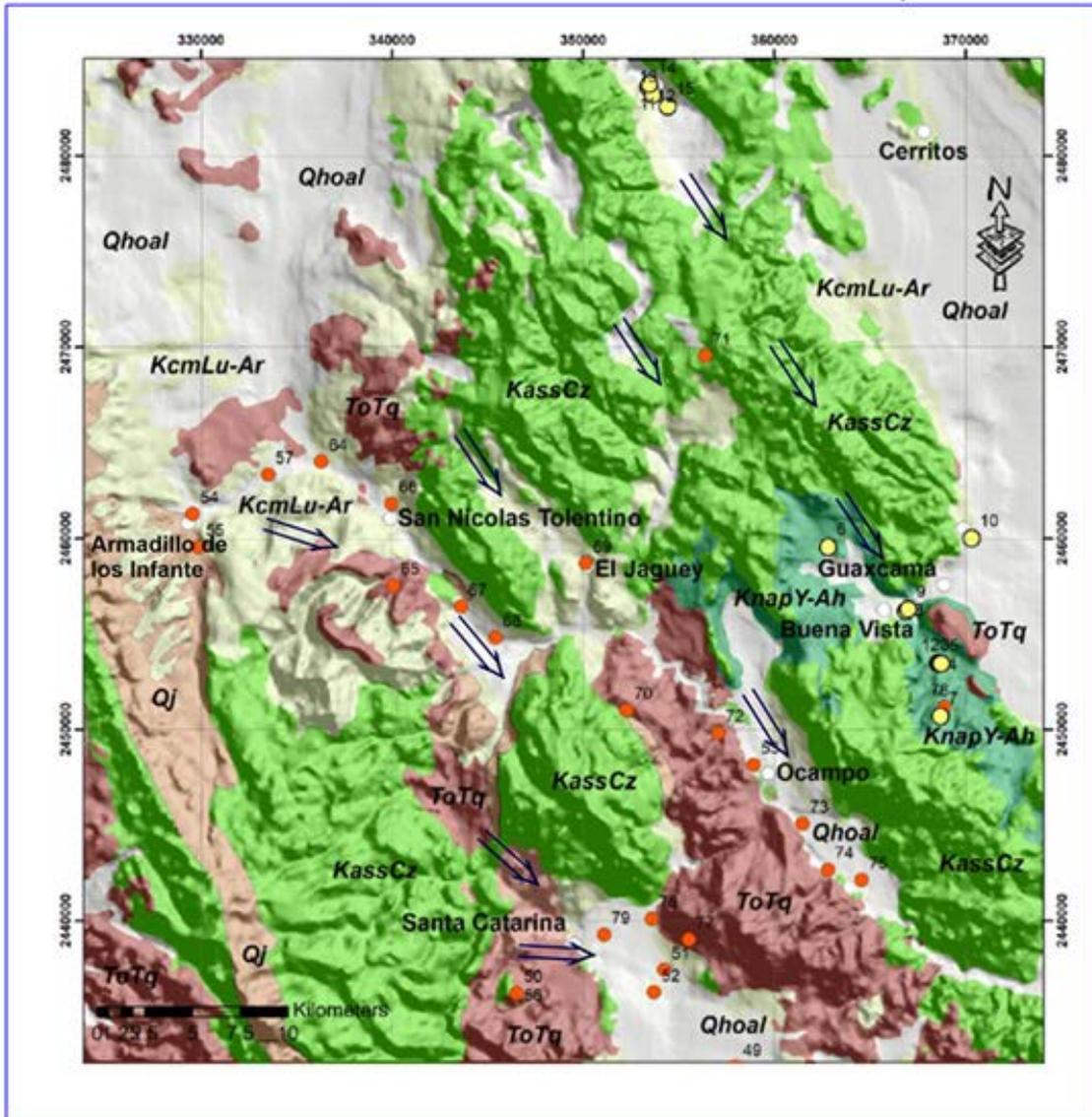


Figura 6.1.- Direcciones de flujo subterráneo de San Nicolás Tolentino

y Joya de Luna-Guaxcamá.

6.1.1.- Hidrogeoquímica y calidad del agua del sistema San Nicolás Tolentino.

La familia Calco-Sódica-Bicarbonatada puede representar la interacción de las aguas bicarbonatadas cálcicas con el material granular y/o refleja la mezcla de aguas por influencia de los ríos que recargan el acuífero, donde el Río San Martín, aportaría un contenido resultante de su interacción con rocas volcánicas.

Sólo una muestra de composición Sulfatada-Bicarbonatada-Cálcica Magnésica, tiene 1290 mg/L de STD; reflejando sobre todo un enriquecimiento en sales mucho mayor que todas las demás muestras analizadas en este valle. Esto se ha considerado como evidencia de que refleja un flujo subterráneo regional (Torres, 2012). Esta familia de agua también representa un acuífero confinado, ya que el pozo que capta estas aguas penetró debajo de una gruesa capa ignimbrítica (Ignimbrita Santa María) la cual funciona como roca sello del mismo.

En la subcuenca III de San Nicolás se documentaron las familias Bicarbonatadas-Cálcicas-Sódicas, y Bicarbonatado-Sulfatado-Calco-Sódica al sur del poblado de Morenos. La Familia de aguas en la subcuenca II de Ocampo-Paraíso, es Bicarbonatada-Calco-Sódica (Figura 6.2 B).

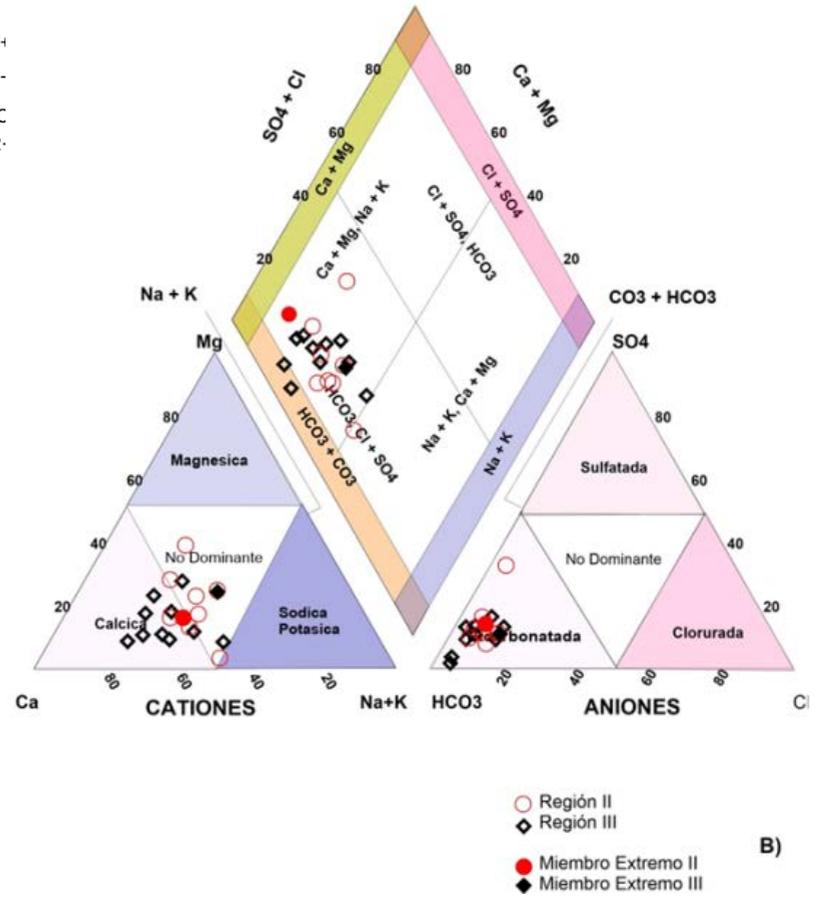
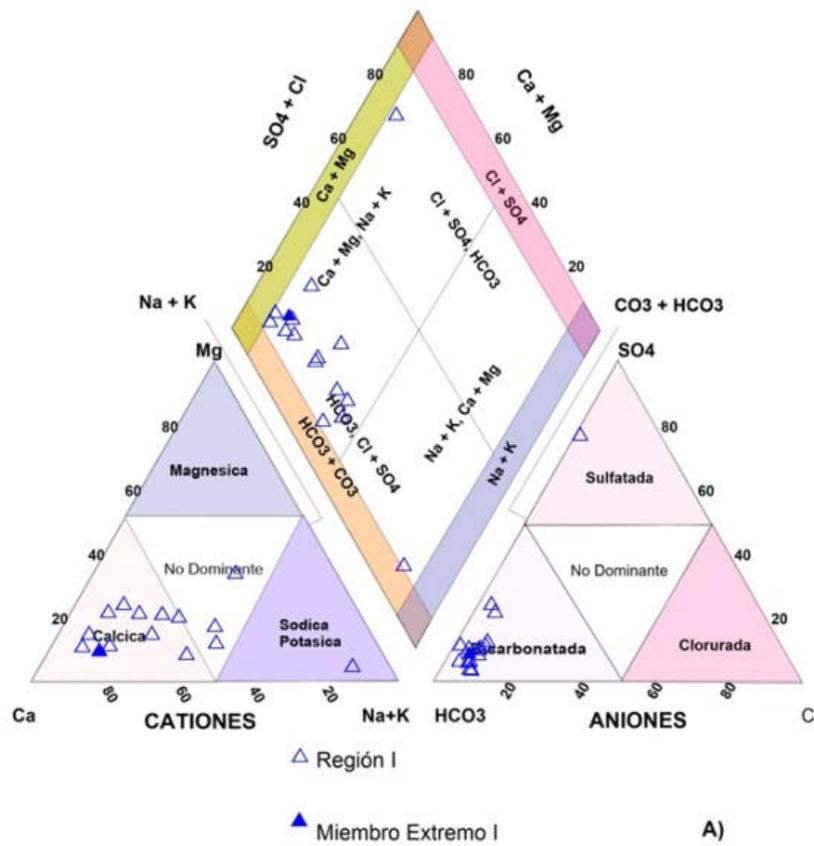


Figura 6.2.- Diagramas de Piper (1944): A) subsecuencia I Santa Catarina y B) subsecuencias II Ocampo Paraíso y III San Nicolás Tolentino.

La trayectoria de las aguas que drenan las subcuencas de San Nicolás Tolentino y Ocampo Paraíso está controlada por el curso del río San Nicolás, y refleja la interacción agua roca en su curso. Para la primera subcuenca, las aguas Bicarbonatadas-Cálcicas-Sódicas reflejan la interacción primeramente con las rocas calcáreas de la Formación El Abra que aflora en la Sierra de Álvarez, las cuales están parcialmente dolomitizada; es decir que contienen cantidades variables de magnesio en su composición dominante de Ca-CO_3 . Su tránsito por el material granular que rellena el Graben de Peotillos (López *et al.*, 2001) le pudo imprimir su contenido de sodio, dado que ese relleno fue depositado como material fluvio lacustre, que por tener un tirante de agua poco profunda, y la ubicación del valle en un ambiente con evaporación media a intensa, pudo incluir en alguna medida, sodio. Otra posible fuente de ese sodio sería la descomposición de plagioclasas sódicas en las rocas ignimbríticas que afloran en la región y tienen interacción con las corrientes de agua que alimentan al río San Nicolás Tolentino.

Al sur del poblado de Morenos, donde el curso del río San Nicolás da un quiebre en su trayectoria, las aguas de la primer familia mencionada adquieren un carácter Bicarbonatado-Sulfatado, quizá por la cercana influencia de los yesos que afloran en el anticlinal El Potrero.

La Familia de aguas en la subcuenca II de Ocampo-Paraíso, es Bicarbonatada Calco-Sódica, reflejando sobre todo la interacción de las corrientes con rocas calcáreas y la incorporación del sodio con el medio granular.

Durante su recorrido el agua subterránea interacciona con los diferentes materiales del subsuelo, lo cual da como resultado el incremento de los componentes químicos y en algunos casos la disminución de estos mismos, debido a la mezcla con agua de reciente infiltración. Para poder corroborar la interacción agua-roca y mezclas se elaboró una sección hidrogeológica-hidrogeoquímica. (Figura 6.3).

La sección hidrogeoquímica tiene 40.5 Km, inicia en Armadillo de los Infante, donde afloran las rocas volcánicas, pasa por calizas de la Formación El Abra, atraviesa el valle de Ocampo en rocas volcánicas y al final corta un valle donde los yesos de la Formación Guaxcamá se encuentran a pocos metros de profundidad (Figura 6.4). (Esta sección solo es para los valles de San Nicolás Tolentino y Ocampo Paraíso).

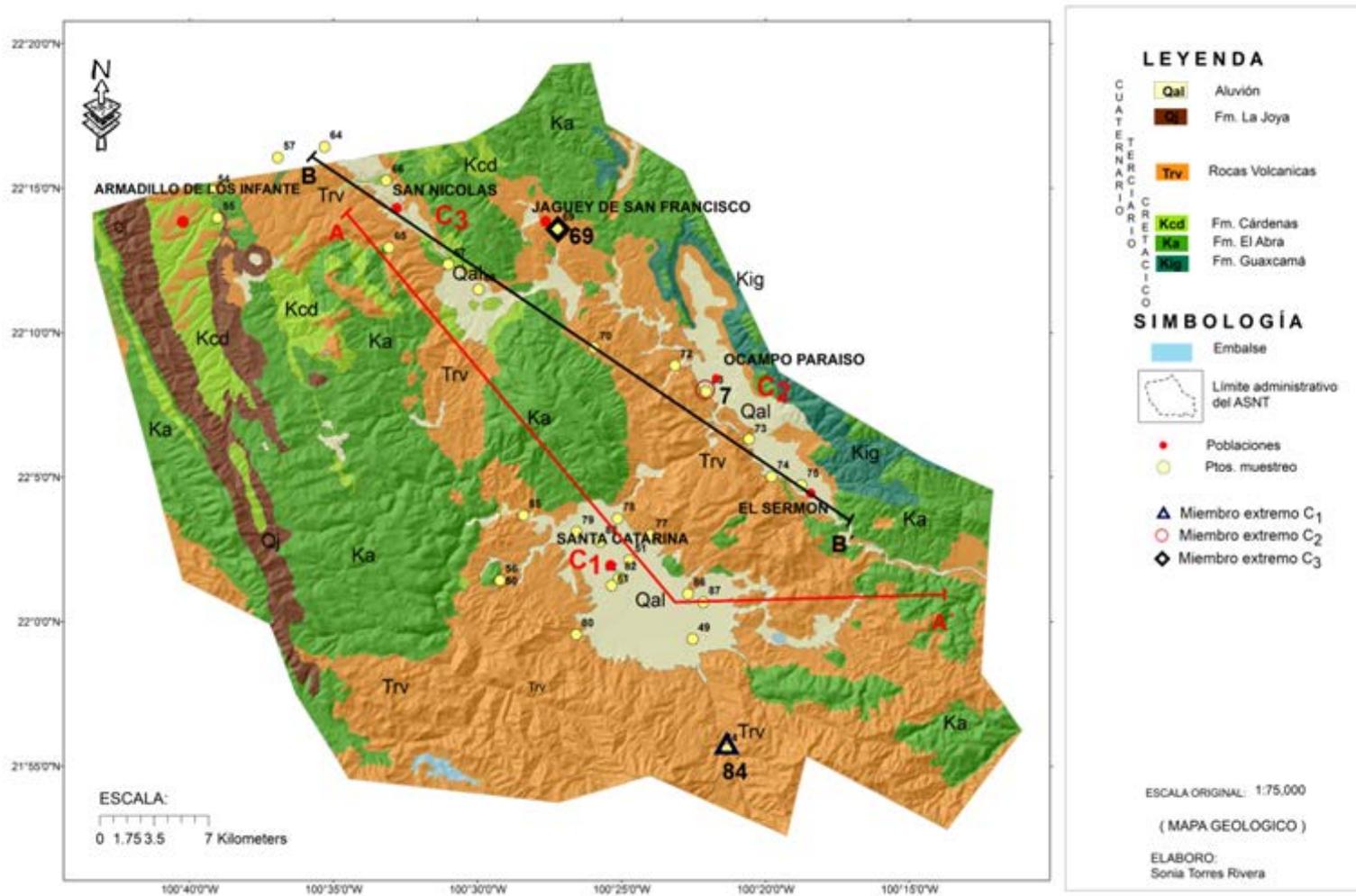


Figura 6.3.- Secciones: secci3n hidrogeoquímica AA' y secci3n geol3gica BB'.

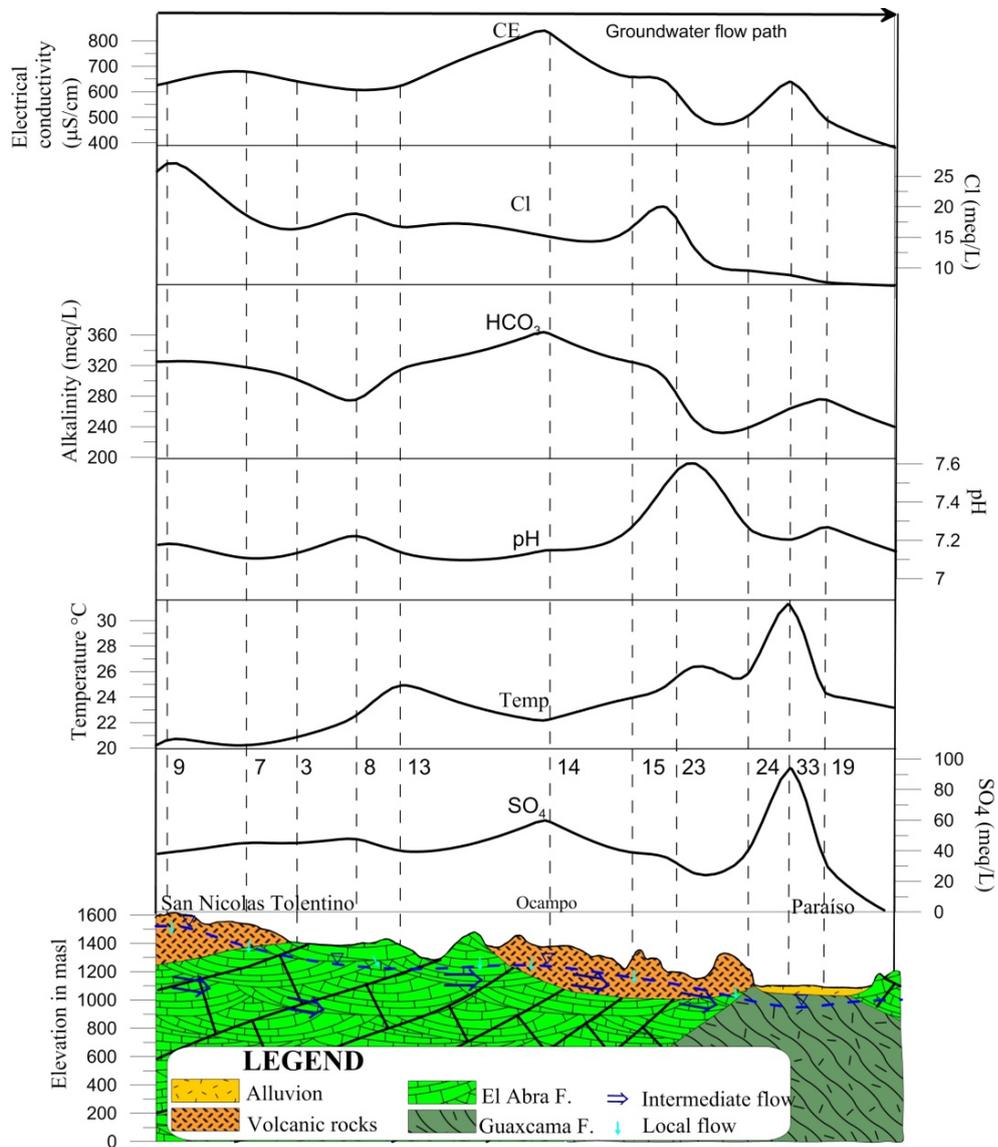


Figura 6.4.- Sección hidrogeoquímica de Armadillo de los Infante a Paraiso, los números se refieren al número de aprovechamiento, la línea azul discontinua indica el nivel piezométrico.

En cuanto a los parámetros físicos, para las subcuencas II y III, iniciando en Armadillo de los Infante y puede observarse que la conductividad eléctrica en las aguas es de aproximadamente 650 MS/cm, a lo largo de la sección hidrogeoquímica. El punto más alto se localiza al centro de la sección en Paraiso, debido a la interacción del agua subterránea con las calizas; y baja el valor al final de la

sección en Ocampo Paraíso, debido a que hay mezcla de agua de recarga local a través de las rocas volcánicas.

La concentración de cloruros es alta al inicio de la sección con valores de 25 mg/L debido a la actividad agrícola que se desarrolla en esa zona. Las concentraciones tienden a disminuir hacia Ocampo Paraíso en donde es posible que el agua subterránea se mezcle con aguas de reciente infiltración. La alcalinidad inicia con valores de 320 mg/L en Armadillo de los Infante y se incrementa en la zona de Ocampo debido a la interacción del agua con las calizas, disminuye a 240 mg/L al final de la sección debido a mezcla con agua de reciente infiltración (Figura 6.4).

El pH es de 7.2 al inicio, mantiene poca variación hasta Ocampo; sin embargo, aumenta y alcanza valores de 7.6, al final alcanza valores de 7.2. La temperatura inicia con 20°C y a lo largo de la sección aumenta hasta alcanzar los 31°C hacia al final de la sección en Paraíso. Los sulfatos inician con valores cercanos a los 40 mg/L, aumentan ligeramente hacia Ocampo (60 mg/L) y en Paraíso aumenta para llegar a 100 mg/L este incremento puede estar relacionado a la interacción del agua con los yesos, lo cual genera una reacción exotérmica y esto es congruente con la anomalía de temperatura en Paraíso.

6.2.- Discusión.

La composición química del agua subterránea es el resultado de procesos continuos de interacción entre el agua meteórica que se infiltra en el terreno y que

circula por los diferentes materiales del subsuelo. Parte de los componentes químicos son adquiridos en la zona de recarga, mientras que otros se adquieren a lo largo del recorrido y son captados por pozos, norias y manantiales en la zona de descarga, dando como resultado diferentes firmas hidrogeoquímicas, conocidas como familias (tipos) de agua, las cuales son representadas en los diagramas de Piper (1994), (Figura 6.2A y 6.2B).

Para identificar algunos procesos que ocurren en el agua subterránea de una región, se utilizan diagramas como el de Gibbs (1970), el cual fue desarrollado para los estudios de agua superficial; sin embargo, en las últimas décadas se ha utilizado para el estudio de las aguas subterráneas, como se puede observar en la (Figura 6.5), durante su evolución el agua está influenciada por la interacción agua roca y un poco de evaporación, solo en dos muestras la evaporación es dominante. Cuando el agua se infiltra en el subsuelo, inicia la interacción roca agua, por lo que el agua de reciente infiltración tiene menos componentes químicos y a mayor distancia recorrida, mayor tiempo de residencia, los componentes físicos y químicos se incrementan; esto se puede ver en la (Figura 6.5). El miembro I se encuentra muy cerca del eje vertical con el agua de la zona de recarga en tanto que el miembro II se ubica más alejado del eje vertical, es decir, tiene mayor evolución.

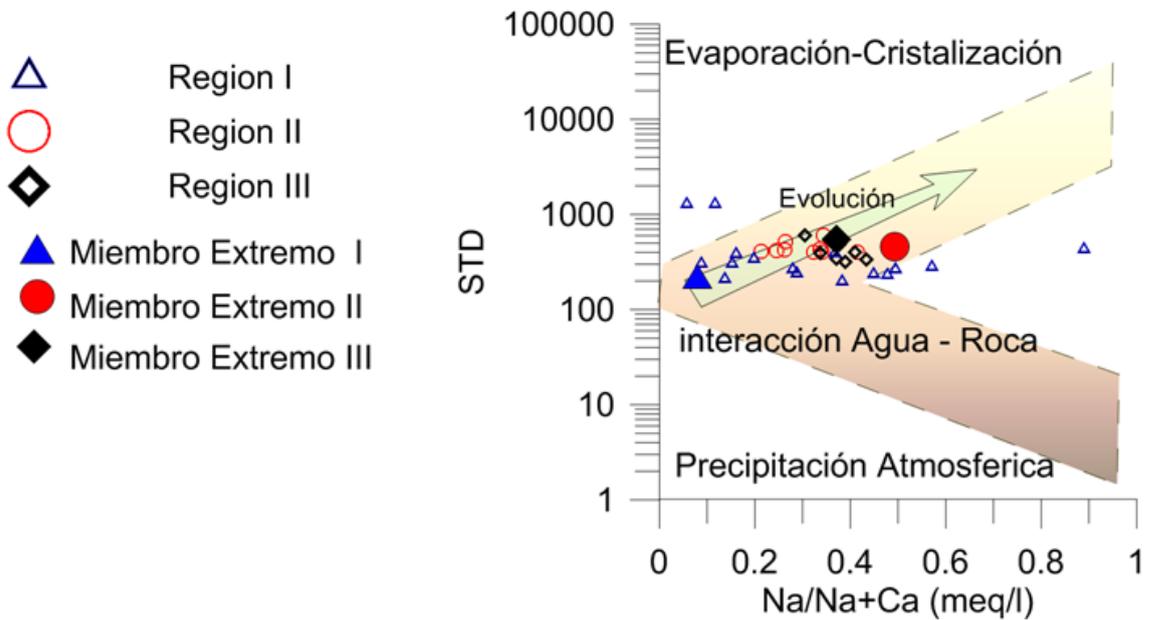


Figura 6.5.- Esquema de Gibbs (1970), muestra el principal proceso evolutivo que identificando el intercambio agua-roca, la flecha amarillo paja indica el sentido de la evolución del agua subterránea. STD (sólidos totales disueltos).

Para entender la evolución del agua subterránea y establecer los diferentes tipos de flujos de agua, se utiliza el diagrama de Mifflin (1968), el cual utiliza indicadores hidrogeoquímicos ($\text{Na}^{++} \text{K}^{+}$ vs $\text{Cl}^{-} + \text{SO}_4^{2-}$) y se divide en tres zonas: la zona más cercano al origen se debe a la poca circulación y/o poco tiempo de residencia del agua, las muestras en esta zona, están asociados con la recarga (flujo local). En la siguiente zona, las concentraciones aumentan y pueden estar asociados con una distancia mayor o tiempo de residencia más largo (de flujo intermedio) y finalmente, la concentración más alta se asocia con una mayor interacción agua-roca y de alta evolución de las aguas subterráneas (flujo regional). En el área de estudio se presentan dos tipos de flujo de agua, el 94% es de tipo local y el 6% es intermedio (Figura 6.6).

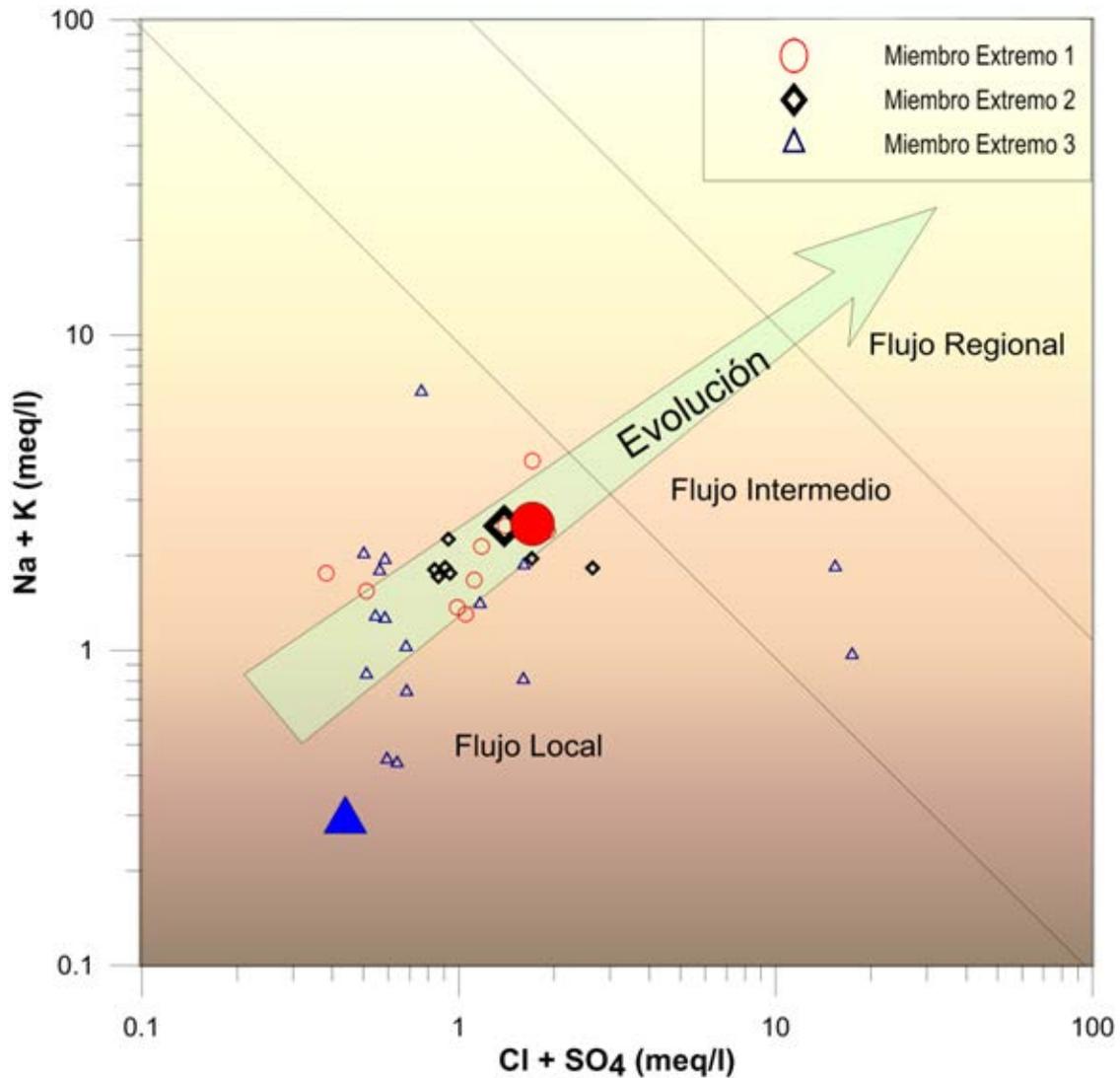


Figura 6.6.- Esquema de Mifflin (1968), clasifica el agua de acuerdo a su evolución, los aprovechamientos de agua de la zona, el 94% pertenece a un flujo local y solo el 6% a un flujo intermedio.

6.3.- Sistema Joya de Luna–Guaxcamá.

El total de muestras de agua subterránea en estos periodos fue de 135, en 15 sitios del área de estudio (5 norias de Joya de Luna a una profundidad de 6 a 10m y 10 manantiales en la zona de descarga Guaxcamá).

La Tabla 4, muestra un resumen de los parámetros fisicoquímicos de campo

del mes de Julio 2013 a Mayo 2014.

Tabla 4.- Resumen del resultado de los parámetros de campo in-situ.

PUERTA DEL RIO								
	Tamb °C	Tmtra °C	PH	C.E μS/cm	O.D %	STD mg/L	ALK	ORP mV
MINIMA	23.00	22.20	6.42	1642.60	16.90	982.50	281.70	-274.00
MEDIA	26.14	24.89	6.73	2528.89	41.65	1325.61	373.60	49.81
MAXIMA	30.87	27.00	7.00	3312.30	60.40	1577.40	535.50	205.20

JOYA DE LUNA								
	Tamb °C	Tmtra °C	PH	C.E μS/cm	O.D %	STD mg/L	ALK	ORP mV
MINIMA	18.90	19.40	7.26	435.91	33.10	220.69	372.80	165.80
MEDIA	20.31	20.98	7.65	534.24	41.61	282.10	409.69	188.17
MAXIMA	21.90	22.64	8.14	656.27	53.00	385.60	435.80	259.40

GUAXCAMÁ								
	Tamb °C	Tmtra °C	PH	C.E μS/cm	O.D %	STD mg/L	ALK	ORP mV
MINIMA	20.30	21.00	1.18	5790.10	25.10	3207.60	0.00	291.30
MEDIA	22.35	25.01	2.70	29727.33	47.29	15110.46	0.00	389.64
MAXIMA	23.90	29.00	6.71	41151.50	64.40	21775.00	596.10	472.40

Tabla 5. Resumen de las principales características fisicoquímicas de agua subterránea (n=165). Base de Datos (anexo)

Tabla 5.- Resumen de análisis químicos de Julio 2013 a Mayo 2014.

JOYA DE LUNA											
	Unidades meq/l										
	Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	N-NO ₃	F	
MINIMA	0.8	0.09	5.5	1.3	0	4.11	0.45	2.68	0.13	0.01	
MEDIANA	1.1	0.3	6.2	1.8	0	4.3	0.6	3.7	0.5	0.0	
MAXIMA	1.5	0.6	8.3	2.9	0	4.38	0.72	5.46	1.07	0.02	

PUERTA DEL RÍO											
	Unidades meq/l										
	Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	N-NO ₃	F	
MINIMA	0.4	0.08	33.8	8.5	0	2.1	0.75	28.71	0.13	0.06	
MEDIANA	0.73	2.41	41.87	91.88	0	2.74	0.90	54.36	0.31	0.08	
MAXIMA	1.1	18.47	71	402	0	3.21	1.09	85.33	0.64	0.14	

GUAXCAMÁ											
	Unidades meq/l										
	Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	N-NO ₃	F	
MINIMA	3	2.23	67.5	560.9	0	0	0	594.85	0.31	0.21	
MEDIANA	7.60	6.88	122.17	1772.67	0	0	0	1865.71	0.57	0.40	
MAXIMA	12.2	18.47	142	2825.1	0	2.03	0.15	2857.91	0.91	0.59	

Las muestras del mes de Diciembre 2013 fueron tomadas para realizar el balance iónico para elementos mayores de aniones y cationes (anexo), para este balance se han considerado la mayoría de los iones presentes, expresado (meq/L). Para verificar lo anterior, se calcula el porcentaje de error analítico, se recomiendan que 5% de error es un límite razonable para que los análisis físico-químicos sean válidos; sin embargo, se pueden aceptar hasta errores menores al 10 % (Freeze y Cherry, 1979). A cada muestra se le comprueba la exactitud del resultado con relación a los aniones y cationes utilizando la siguiente formula:

$$\%E = \left(\frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \right) \times 100$$

La gráfica de la (Figura 6.7) 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.

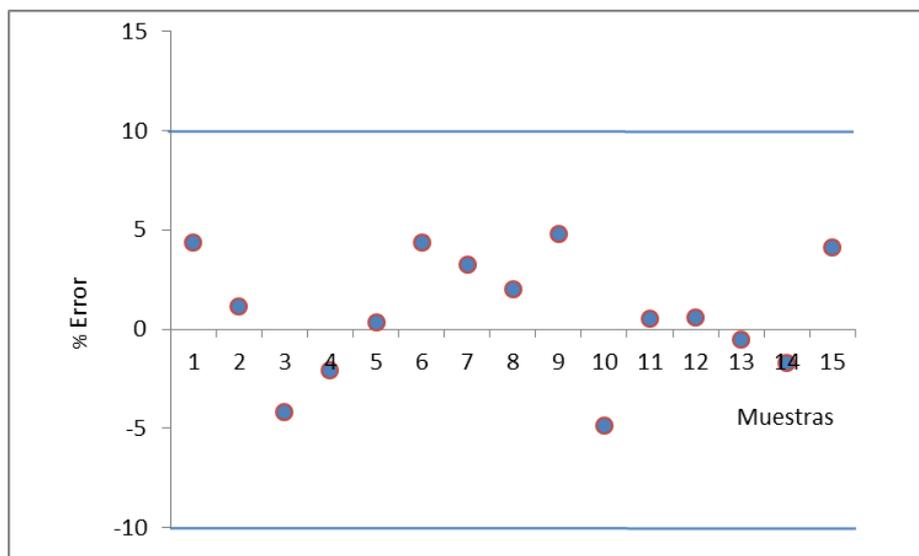


Figura 6.7.- Gráfica de balance iónico.

6.3.1.- Hidrogeoquímica y calidad del agua del Sistema

Joya de Luna-Guaxcamá.

Considerando los parámetros químicos integrados en la NOM-127-SSAI-1994 de los resultados de las muestras colectadas (Tabla físico-químicos anexo).

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 (que incluyen las concentraciones de los principales aniones (CO_3 , HCO_3 , SO_4 , Cl^-) y aniones (Na^+ , Ca^+ , Mg^+ , K^+) diagramas modificados de Piper (1944) y Stiff (1951); 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 cómo interactúan los diferentes sistemas de flujo.

En base a la composición química de las muestras de agua subterránea se identificaron 4 familias principales; estas son: Bicarbonatada-Cálcica-Sódica (HCO_3 -Ca-Na), Sulfatada-Cálcica-Magnésica (SO_4 -Ca-Mg), Sulfatada-Magnésica (SO_4 -Mg) y Sulfatada-Cálcica (SO_4 -Ca) ver Tabla 6.

Tabla 6.- Familias de agua subterránea.

MTRA	APROVECHAMIENTO	TIPO DE AGUA
1	GUAXCAMÁ LA MINA(INICIO)	SO ₄ -Mg
2	GUAXCAMÁ LA MINA(MEZQUITE)	SO ₄ -Mg
3	GUAXACAMÁ LA MINA (ARROYO)	SO ₄ -Mg
4	GUAXCAMÁ LA MINA (CONGLOMERADO CALIZAS)	SO ₄ -Mg
5	GUAXCAMÁ LA MINA(ESCURRIMIENTO DE PARED SOBRE EL)	SO ₄ -Mg
6	OJO DE AGUA (LAVADERO)	SO ₄ -Ca-Mg
7	LA CUEVA	SO ₄ -Ca
8	BUENAVISTA	SO ₄ -Ca
9	BUENAVISTA (AZUFROSA)	SO ₄ -Ca-Mg
10	PUERTA DEL RIO	SO ₄ -Ca-Mg
11	JOYA DE LUNA (NORIA ACORRALADA)	HCO ₃ -Ca-Na
12	JOYA DE LUNA (NORIA CON BOMBA)	HCO ₃ -Ca-Na
13	JOYA DE LUNA (NORIA NUEVA CON MEZQUITE)	HCO ₃ -Ca-Na
14	JOYA DE LUNA (NORIA DEL CAMINO PASO REAL)	HCO ₃ -Ca-Na
15	JOYA DE LUNA (NORIA CARRETERA CHILLADORA)	HCO ₃ -Ca-SO ₄

En la (Figura 6.8) el diagrama de Piper muestra tres zonas totalmente diferentes. Joya de Luna con rocas carbonatadas a la cual pertenecen las muestras de agua bicarbonatadas cálcicas con un ligero intercambio iónico, en la zona Buena-vista/Puerta del Río existe una disolución de roca caliza provocando una reducción de yesos y una oxidación de sulfatos y en la zona Guaxcamá las muestras de agua están totalmente oxidadas por el alto contenido de sulfatos que existen en los yesos.

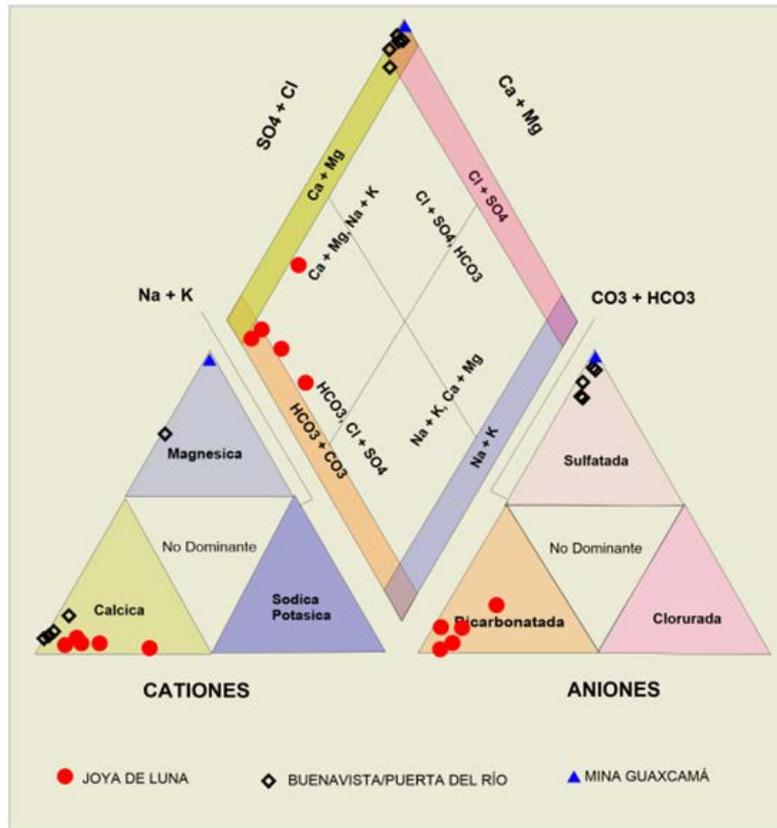


Figura 6.8.- Diagrama de Piper (1944), muestra tres zonas con calidad de agua muy diferente.

La ubicación de los puntos muestreados y la clasificación de las familias de agua por su ubicación en los diagramas modificados de Stiff, (Custodio, 1976) se presenta además en la (Figura 6.9) la configuración espacial. En términos generales sólo la familia Bicarbonatada-Cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$) y Sulfatada-Magnésica ($\text{SO}_4\text{-Mg}$) pueden considerarse como principales aguas subterráneas, ya que abarca el 33.3% cada una del total de todos los aprovechamientos muestreados dentro del acuífero; y en un número menor, pero también importante, aparecen las de tipo Sulfatada-Cálcica-Mg ($\text{SO}_4\text{-Ca-Mg}$) abarcando 20% y la Sulfatada-Cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$) con el 13.33%.

El predominio del ion HCO_3 , Ca^+ y Mg en las muestras de Joya de Luna sugiere una precipitación de reciente infiltración y el recorrido del agua subterránea es a través de rocas calcáreas que se encuentran en la zona de recarga de mayor elevación de la sierra de Peotillos o El Tablón con una elevación de hasta 1400 msnm, de la Formación El Abra y lutitas presentes en centro del valle con una elevación de 1230 msnm (Figura 6.9). El predominio del ion SO_4 y Mg del otro porcentaje importante de las muestras sugieren que tuvieron un recorrido por Yesos (evaporitas y anhidritas) de la Formación Guaxcamá la cual se encuentra en la zona de descarga y su surgencia es en forma de manantiales, lo cual indica una zona de descarga con una elevación de 1200 msnm. Buena vista y Puerta del Río con una elevación de 1112 msnm sugiere que estos manantiales están siendo recargados con agua subterránea que atraviesa por calizas de Joya de Luna y por anhidritas de la mina Guaxcamá. Considerando los parámetros físico-químicos, la calidad del agua y observando el diagrama de Piper estamos demostrando y confirmando que el área de estudio está dividida en tres partes diferentes; Joya de Luna, Buenavista/Puerta del Río y Guaxcamá.

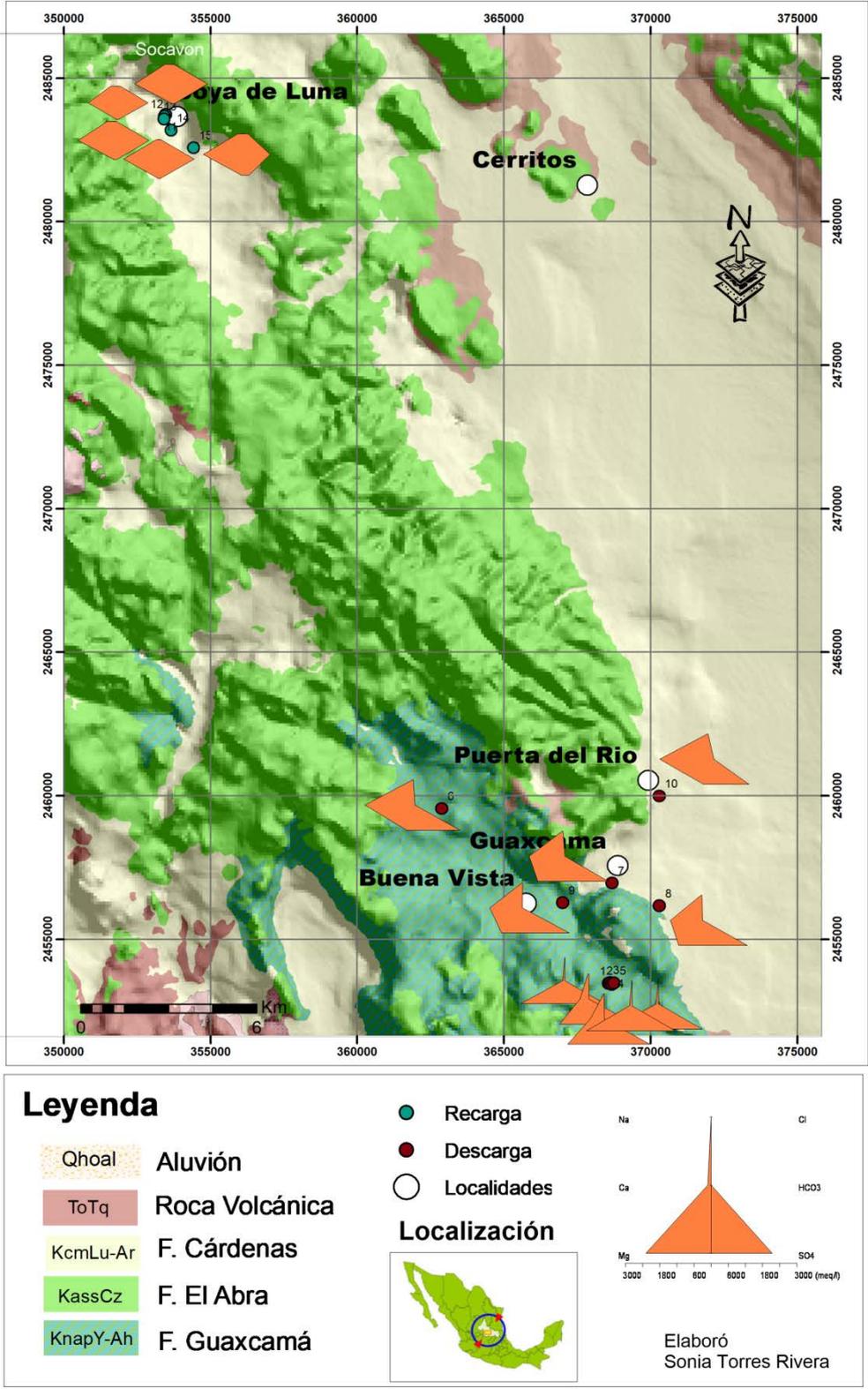


Figura 6.9.- Distribución espacial de los diagramas de Stiff según la familia química.

Las muestras de la zona de recarga en Joya de Luna presentan concentraciones bajas de sólidos totales disueltos la concentración mínima es de 220.69 mg/L y una concentración máxima 385.6 mg/L, dentro de los que predominan los bicarbonatos (HCO_3) de concentración mínima 4.11 meq/L a una concentración máxima de 4.38 meq/L. Su conductividad eléctrica resultan también baja con una mínima de 435.91 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una máxima de 656.27 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las aguas subterráneas de las norias sugieren que están siendo recargadas con una precipitación de reciente infiltración y el recorrido del agua subterránea es a través de rocas calcáreas que se encuentran en la zona de recarga de mayor elevación de la sierra de El Tablón con una elevación de hasta 1400 msnm, de la formación El Abra y lutitas presentes en centro del valle con una elevación de 1230 msnm. La roca acuífera en Joya de Luna es la Formación El Abra del Albiano Cenomaniaco. Joya de Luna no presenta irregularidades por lo que en términos generales en todos los casos el agua subterránea puede clasificarse de buena calidad.

Las muestras de la zona de descarga en Buenavista/Puerta del Río presentan concentraciones elevadas de sólidos totales disueltos con una concentración mínima de 982.50 mg/L y una concentración máxima 1577.40 mg/L, dentro de los que predominan los sulfatos (SO_4) de concentración mínima 28.71 meq/L a una concentración máxima de 85.33 meq/L. Su conductividad eléctrica resultan contrastantes respecto de los otros aprovechamientos muestreados con una mínima de 1642.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una máxima de 3312.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las aguas subterráneas de los manantiales sugieren que están siendo recargados con agua subterránea que atraviesa por calizas de Joya de Luna y por sulfatos y sales que se encuentra

sobre yesos (anhidritas) en Guaxcamá. La roca acuífera en Joya de Luna es la Formación El Abra del Albiano Cenomaniano y en Guaxcamá la Formación Guaxcamá de edad Cretácico Temprano. Sus aguas se clasifican como aguas de mediana calidad, usadas solo para algunos cultivos específicos tolerantes a sales y algunos otros minerales.

Las muestras de la zona de descarga en Guaxcamá presentan concentraciones elevadas de sólidos totales disueltos con una concentración mínima de 3207.60 mg/L y una concentración máxima 21775 mg/L, dentro de los que predominan los sulfatos (SO_4) de concentración mínima 594.85 meq/L a una concentración máxima de 2857.91 meq/L. Su conductividad eléctrica resultan contrastantes respecto de los otros aprovechamientos muestreados con una mínima de 5790.10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una máxima de 41451.50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Durante todo el tiempo de monitoreo se observó una muestra que presentaba conductividades eléctricas de 2500 a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sulfatos (SO_4) de concentración mínima de 177 a una concentración máxima de 777 meq/L y bicarbonatos (HCO_3) de una concentración mínima de 1.6 a una concentración máxima de 3.3 meq/L, esto se debe a que las aguas subterráneas sulfatadas atravesaban por un conglomerado de calizas, disminuyendo la acidez del agua, la conductividad eléctrica además de observar bicarbonato. En general las aguas subterráneas de los demás manantiales sugieren el enriquecimiento de sulfatos y abundancia de sales porque se encuentran sobre yesos. La roca acuífera es la Formación Guaxcamá de edad Cretácico Temprano, sus aguas se clasifican como aguas de mala calidad. El modelo conceptual de la (Figura 6.10) muestra las zonas de recarga y descarga lo que

da idea de los resultados de la calidad del agua y los parámetros fisicoquímicos.

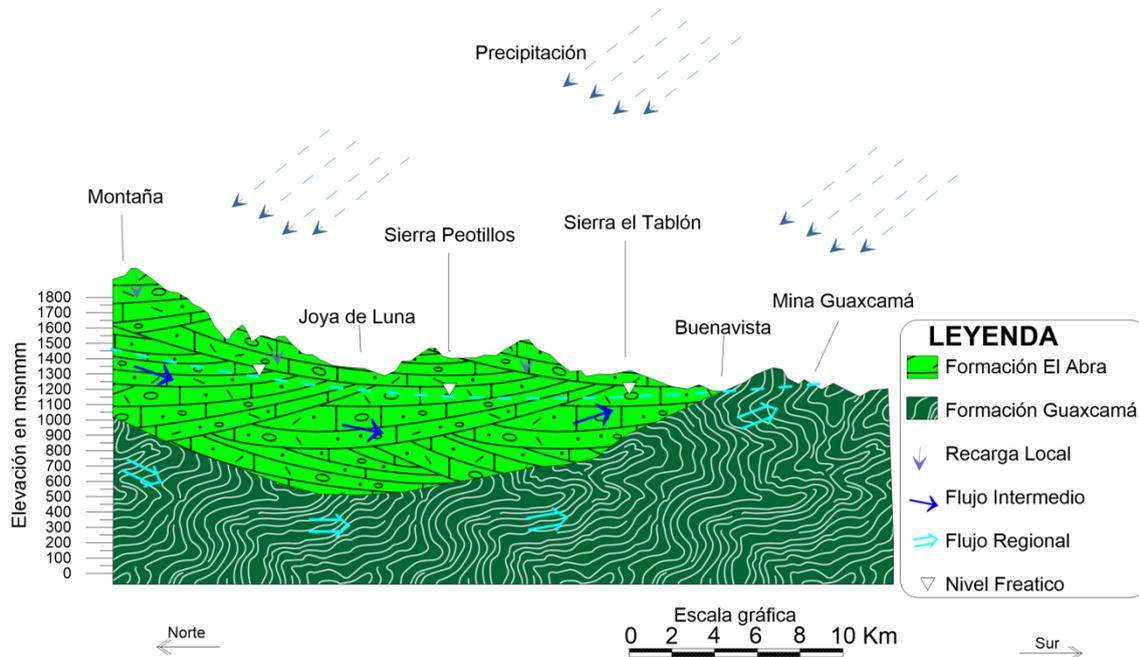


Figura 6.10.- En el modelo conceptual se puede apreciar las alturas donde el flujo de agua subterránea de Joya de Luna y Guaxcamá descarga hacia los manantiales de Buenavista, este modelo coincide con la calidad de aguas y sus parámetros físicos en cada punto.

Por lo general, las aguas que se captaron en esta área, son de tipo (bicarbonatadas cálcicas, sulfatada cálcica magnésica y sulfatada magnésica) el enriquecimiento de sales y sulfatos es porque se encuentran en contacto con las diferentes formaciones geológicas las aguas subterráneas; por lo que, se quiere conocer con mayor precisión, si existe conexión entre dos puntos del acuífero, la hidrogeoquímica no es muy clara para este objetivo y se deben utilizar otras técnicas como los trazadores.

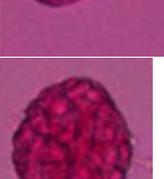
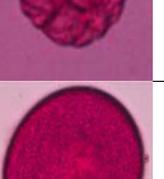
6.3.2.- Palinología Sistema Joya de Luna-Guaxcamá

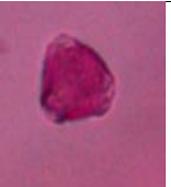
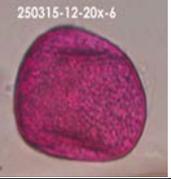
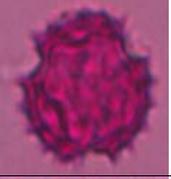
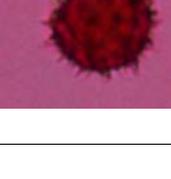
El presente trabajo estudia la conectividad hidráulica entre la zona de recarga y descarga de un sistema cárstico en la zona media de San Luis Potosí, se implementó una metodología a base de esporas de *Lycopodium clavatum* y esferas de unicel teñidas; ambas zonas fueron monitoreadas durante un año; sin embargo, no se obtuvieron los resultados esperados, debido a que las esporas y esferas quedaron retenidas en las paredes de la roca carbonatada o posiblemente se perdieron en el medio cárstico. Como una alternativa se aplicó una tercera variante o metodología MEPAM, la cual consiste en caracterizar polínicamente la zona de recarga-descarga siguiendo un gradiente altitudinal de la vegetación para demostrar la conexión entre ambas zonas. Para validar esta metodología, se utilizó la herramienta de isotopos estables como trazadores naturales (^2H y ^{18}O).

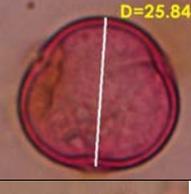
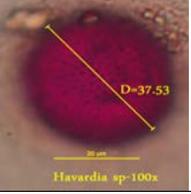
6.3.3.- Polínica ambiental directamente de la vegetación

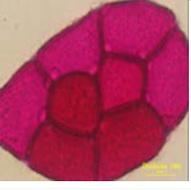
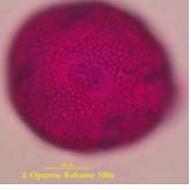
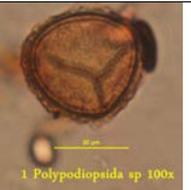
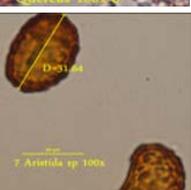
Debido a que las condiciones físicas, climáticas, geológicas y de altitud son diferentes entre la zona de recarga y descarga, se desarrollan diferentes tipos de especies. La zona de estudio se identificó y se caracterizó por 41 familias en total, la zona de recarga Joya de Luna con vegetación de matorral submontano (MSM), cultivo de temporada (RA) y bosque de encina (BQ), se caracterizó por 21 especies en la (Tabla 7) se muestra la taxonomía de las plantas.

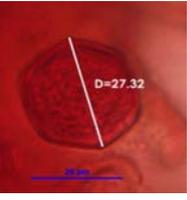
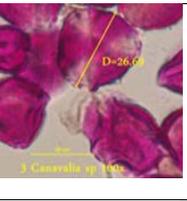
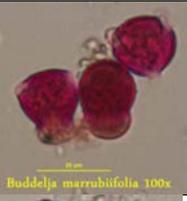
Tabla 7.- Taxonomía de las plantas.

Lugar	X	Y	Z	Familia	Género	Morfología	Microscopio
Socavón JL	352397	2485844	1241	Leguminosae	<i>Acacia berlandieri</i>		
Socavón JL	352397	2485844	1241	Rutaceae	<i>Helietta pervifolia</i>		
Socavón JL	352397	2485844	1241	Sapindaceae	<i>Neopringlea integrifolia</i>		
Socavón JL	352397	2485844	1241	Rhamnaceae	<i>Karwinskia mollis</i>		
Socavón JL	352397	2485844	1241	Rutaceae	<i>Zanthoxylum Fagara</i>		
Socavón JL	352397	2485844	1241	Leguminosae	<i>Prosopis Laevigata (Mezquite)</i>		
Socavón JL	352397	2485844	1241	Leguminosae	<i>Acacia Farnesiana (Huizache)</i>		
2do. Socavón JL	352737	2485467	1245	Gramínea	<i>Zea mays</i>		

2do. Socavón JL	352737	2485467	1245	Leguminosae	<i>Cicer Arietinum</i> (Garbanzo)		
JL en medio del valle	353760	2483742	1247	Herbaceae	<i>Avena Sativa</i>		 250315-12-20x-6
El Lavadero	362827	2459557	1262	Compositae	<i>Fleischmannia Pycnocephala</i>		
El Lavadero	362827	2459557	1262	Compositae	<i>Calypticarpus Vialis</i> Less		
La Mina	367881	2454952	1225	Sapindaceae	<i>Dodonaea Viscosa</i>		
La Mina	367881	2454952	1225	Compositae	<i>Thymophylla Sentifolia</i> Laa		
La Mina	367881	2454952	1225	Compositae	<i>Tridax Candidissima</i>		
La Mina	367881	2454952	1225	Compositae	<i>Castilleja Lanata</i>		
La Mina	367881	2454952	1225	Compositae	<i>Pluchea Carolinensis</i>		

La Mina	367881	2454952	1225	Anacardiaceae	<i>Rhus Pachyrrhachys</i>		
La Mina	367881	2454952	1225	Verbenaceae	<i>Lantana Hispida</i>		
JL (Noria Acorralada)	368569	2453468	1245	Poaceae(2) (1)	<i>Bouteloua repens</i>		
JL (C. Paso Real)	368666	2453434	1245	Ranunculaceae	<i>Delphinium madrese</i>		
JL (Noria c mezquite)	368627	2453500	1243		<i>Havardia pallens</i>		
JL (Noria c bomba)	368591	2453489	1244	Verbenaceae(Lantana Hispida) (1) (2)	<i>Latana hispida</i>		
JL (Noria c bomba)	368591	2453489	1244	Apiaceae	<i>Eryngium heterophyllum</i>		
JL (Noria c bomba)	324299	2482729	1157	Leguminosae o fabacea	<i>Havardia sp.</i>		

JL (Noria con bomba)	324299	2482729	1157	Sapindaceae	<i>Dondonea sp.</i>		
JL (Noria con bomba)	324299	2482729	1157	Cactaceae	<i>Opuntia robusta</i>		
JL (Noria con bomba)	324299	2482729	1157	Cactaceae	<i>Cylindropuntia imbricata</i>		
JL (Noria con bomba)	324299	2482729	1157	Polypodiopsida sp.			
Zona de descarga	354972	2475158	1475	Quercus (11), Botella (17)	<i>Quercus sp.</i>		
La Cueva	368689	2450696	1211	Poaceae	<i>Nephrolepis biserrata</i>		
La Alberca	366894	2456171	1197	Malvaceae fam.			
Azufrosa	367008	2456285	1192	Asteraceae fam.			

Puerta del Río	370322	2460003	1005	Rubiaceae	<i>Bouvardia ternifolia</i>		
Jales de la mina	368485	2453490	1239	Canavalia sp.			
Río de la mina	353422	2483583	1224	Poaceae	<i>Bouteloua sp.</i>		
Río de la mina	353663	2483188	1231	Compositae	<i>Buddleja marrubiifolia</i>		
Río de la mina	353461	2483733	1230	Poaceae Muestra	<i>Pennisetum sp.</i>		

La zona de descarga Guaxcamá con vegetación de MSM, RA, y VSa/MSM, matorral submontano, cultivo de temporada y vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano, se caracterizó por 20 especies (Tabla 8 y Soporte 1).

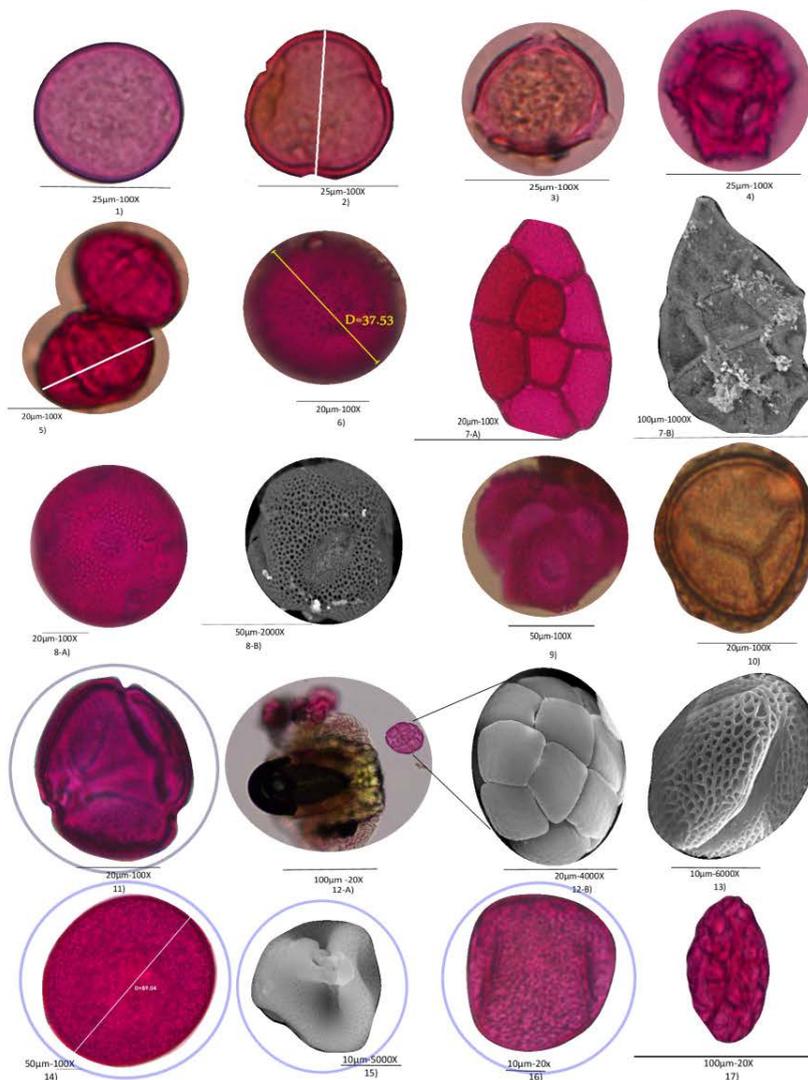
6.3.4.- Captura de polen en agua subterránea

La toma de muestras de agua subterránea en el sistema, se realiza en el periodo de Agosto 2013- Abril 2014 y en Junio de 2016, se identificaron 14 especies polínicas, del conteo total de especies de 22 familias polínicas (Tabla 10, Figura 6.11) entre estos dos periodos de polen algunas familias se repetían. La especie de las *Poaceae* (245 pólenes), *Nepbi* (74 pólenes) y *Zeama* (65 pólenes) son las que reportaron mayor número de granos en la zona de recarga-descarga. Algunas especies propias de Agricultura temporal anual (TA) en la zona de recarga fueron identificadas en la zona de descarga (Tabla 10, Figura 11). Como el *Cicar* que se identificó en los puntos 12, 13, 14, 15 de la zona de recarga y en los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 7, de la zona de descarga. La *Avesa* se encontró en los puntos de la zona de recarga 11, 12, 13, 14, 15 y en los puntos de la zona de descarga 6, 7, 9 y 10. La especie *Zeama* se identificó en de recarga 11, 13, 14, 15 y descarga 1, 2, 4, 5, 6, 9 y 10 (Tabla 10, Figura 6.11).

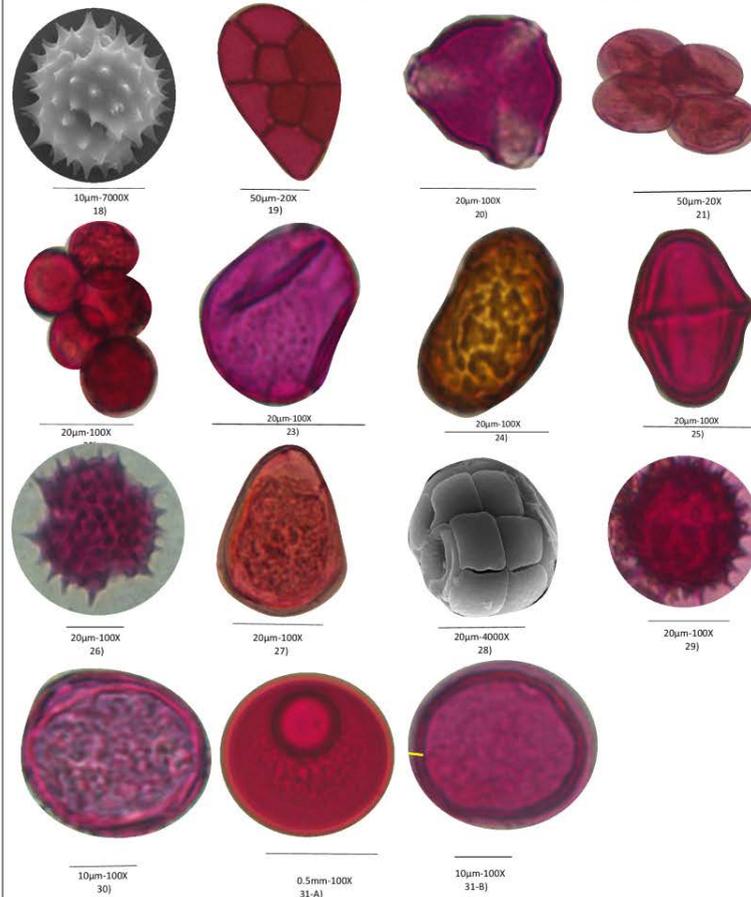
Tabla 8.- Base de datos de las especies halladas en el área de estudio 2013- 2016

LUGAR	X	Y	ALTURA	Clave
	352397	2485844	1241	<i>Acabe (Acacia berlandieri)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Helpe (Helietta pervifolia)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Neoin (Neopringlea integrifolia)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Karmo (Karwinskia mollis)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Zanfa (Zanthoxylum fagara)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Prola (Prosopis laevigata)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Acafa (Acacia farnesiana)</i>
	352737	2485467	1245	<i>Zeama (Zea mays)</i>
Z	352737	2485467	1245	<i>Cicar (Cicer arietinum)</i>
O	353760	2483742	1247	<i>Avesa (Avena sativa)</i>
N	368569	2453468	1245	<i>Boure (Bouteloua repens)</i>
A	368666	2453434	1245	<i>Delma (Delphinium madrense)</i>
D	368627	2453500	1243	<i>Havpa (Havardia pallens)</i>
E	368591	2453489	1244	<i>Lanhi (Lantana hispida)</i>
	368591	2453489	1244	<i>Eryhe (Eryngium heterophyllum)</i>
R	324299	2482729	1157	<i>Havardia sp.</i>
E	354962	2483788	1157	<i>Dondonea sp.</i>
C	354962	2483788	1157	<i>Opuro (Opuntia robusta)</i>
A	354962	2483788	1157	<i>Cylim (Cylindropuntia imbricata)</i>
R	354962	2483788	1157	<i>Polypodiopsida sp.</i>
G	354962	2483788	1157	<i>Quercus sp.</i>
A	355004	2483859	1475	<i>Solni (Solanum nigrescens)</i>
	362827	24599557	1262	<i>Flepy (Fleischmannia pycnocephala)</i>
	362827	24599557	1262	<i>Compositeae</i>
	362827	24599557	1262	<i>Calvi (Calypticarpus vialis less)</i>
	367881	2454952	1225	<i>Dodvi (Dodonaea viscosa)</i>
	367881	2454952	1225	<i>Leguminosae</i>
Z	367881	2454952	1225	<i>Thyse (Thymophylla sentifolia laa)</i>
O	367881	2454952	1225	<i>Trica (Tridax candidissima)</i>
N	367881	2454952	1225	<i>Casla (Castilleja lanata)</i>
A	367881	2454952	1225	<i>Pluca (Pluchea carolinensis)</i>
D	367881	2454952	1225	<i>Rhupa (Rhus pachyrrhachys)</i>
E	367881	2454952	1225	<i>Lanhi (Lantana hispida)</i>
	368689	2450696	1211	<i>Nepbi (Nephrolepis biserrata)</i>
D	366894	2456171	1197	<i>Malvaceae</i>
E	367008	2456285	1192	<i>Asteraceae</i>
S	370322	2460003	1005	<i>Boute (Bouvardia ternifolia)</i>
C	368485	2453490	1239	<i>Canavalia sp.</i>
A	353422	2483583	1224	<i>Bouteloua sp.</i>
R	353663	2483188	1231	<i>Budma (Buddleja marrubiiifolia)</i>
G	353461	2483733	1230	<i>Pennisetum sp.</i>

Joya de Luna (Zona de recarga)



Guaxacamá (Zona de descarga)



Morfología de las diferentes especies caracterizadas en la zona de recarga, vistas en Microscopio Óptico (MO) con magnificación de 100X y Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) con magnificaciones de 1000, 2000, 4 000 y 6 000X, son: 1) *Bouteloua spicata* (Bourc), 2) *Lantana hispida* (Lamb.), 3) *Harvardia palmeri* (Ruspe), 4) *Pithecolobium madroense* (Palm), 5) *Eryngium heterophyllum* (Engelm), 6) *Harvardia* sp., 7A y 7B) *Dodonaea viscosa* (Poir.), 8A y 8B) *Opuntia robusta* (Opunt), 9) *Cylindropuntia imbricaria* (Cylind), 10) *Polypodiopsis* sp., 11) *Quercus* sp., 12A y 12B) *Acacia berlandieri* (Acab), 13) *Zanthoxylum fagara* (Zanth), 14) *Zea mays* (Zeam), 15) *Cicor arcticum* (Cicor), 16) *Arcaea sativa* (Avesaly 17) *Acacia farnesiana* (Acab).

Morfología de las especies de polen en la zona de descarga en Microscopio Óptico (MO) en magnificación de 20X y 100X, Microscopio Electrónico de Barrido (MEB): 18) *Ficthmannia pygmaea* (Feip), 19) *Dodonaea viscosa* (Poir.), 20) *Canavalia* sp., 21) *Bouteloua* sp., 22) *Buddleia maritima* (Budda), 23) *Panicum* sp., 24) *Nephrolepis bicornata* (Nepht), 25) *Muhlenbergia* sp., 26) *Asteraceae* fam., 27) *Bouteloua tenuifolia* (Bourc), 28) *Acacia berlandieri* (Acab), 29) *Pluchea carolinensis* (Pluca), 30, 31-A y 31-B) *Panicum*.

Figura 6.11.- Polen encontrado en Joya de Luna y Guaxacamá.

Tabla 9.- Conteo e identificación de polen en el agua subterránea (zona de recarga-descarga) periodo 2013-2016. Las especies utilizadas como trazadores están marcadas con negritas.

FAMILIA Agosto 2013-Junio 2016	Zona de recarga Joya de Luna					Zona de descarga Guaxcamá										
	Aprov.	11	12	13	14	15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a) <i>Acafa (Acacia Farnesiana)</i>		2		4		6	2			6			1	1	3	
b) <i>Acaba (Acacia berlandieri)</i>		1	5		2		1	2	2		2	2	5	4		1
c) <i>Zanfa (Zanthoxylum Fagara)</i>			6	5	6						3			8	3	12
d) <i>Prola (Prosopis Laevigata)</i>		0	0	0	0	3	2	2	4	3	1	4	1	1	0	0
e) <i>Cicar (Cicer Arietinum)</i>			1	1	4	3	3	2	3	2	1		2			
f) <i>Avesa (Avena Sativa)</i>		1	7	1	7	2						2	1	1	1	1
g) <i>Flepy (Fleischmannia Pycnocephala)</i>		0	0	0	3	0	0	0	0	0	2	2	1	2	1	0
h) <i>Calvi (Calypticarpus Vialis Less)</i>			2			2		1				2	2			
i) <i>Dodvi (Dodonaea Viscosa)</i>				1				5		9	7	3	1		18	7
j) <i>Trica (Tridax Candidissima)</i>			3	1					5			3		3		1
k) <i>Pluca (Pluchea Carolinensis)</i>			1	6				1			2			2	2	1
l) <i>Lanhi (Lantana Hispida)</i>		8	2	2	5		2	2			1		2	1	1	3
m) Poaceae		11	14	11	13	6	36	16	14	13	2	24	14	16	15	40
n) <i>Zeama (Zea Mays)</i>		2		3	8	25	2	6		2	5	1			4	7
ñ) <i>Nepbi (Nephrolepis biserrata)</i>		15	30				2				17					10
o) <i>Boute (Bouvardia ternifolia)</i>						1						1				1
p) <i>Eryhe (Erygium heterophyllum)</i>									1						1	
q) <i>Quercus sp.</i>		1					1					1			2	3

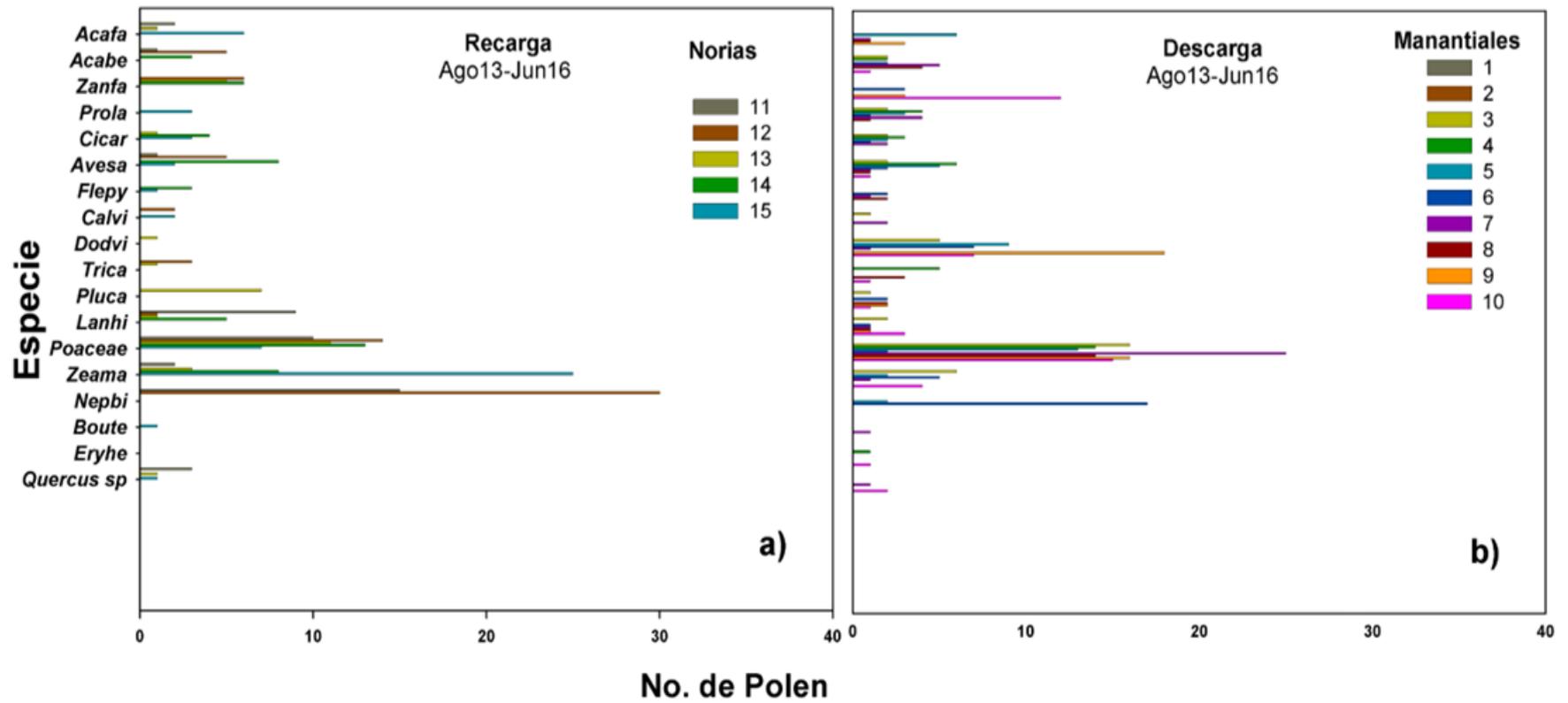


Figura 6.12.- Especies Vs número de polen a) zona de recarga y b) zona de descarga.

Cabe mencionar que el *Quercus sp.*, característico de la zona de recarga montañosa (BQ) que se encuentra en la zona de recarga en los puntos de muestreo 11, los granos de polen se detectaron en los puntos 1, 6, 9 y 10 de la zona de descarga (Tabla 9 y Figura 1 y 6.12). Considerando las cuatro especies antes mencionadas, realizó un análisis de presencia/ausencia de la especie en espacio y tiempo, tomando en cuenta el tiempo de cosecha y fenología para cada especie (Tabla 10).

Aplicando el análisis de frecuencias, pudimos identificar la presencia de los granos de polen para cada aprovechamiento. Hemos identificado que la zona de recarga cuenta con menor número de presencia de polen en la zona de descarga (243 vs 447, Figura 6.11), los cuales se distribuyen de la siguiente manera en la zona de recarga Poaceae (55), Nepbi (45), Zeama (38), Zanfa (17), Avesa (18), Cicar (9) y *Quercus sp.* (1) (Figura 26a). Para la zona de descarga se tiene que: Poaceae (190), Dodvi (50), Nepbi (29), Zeama (25), Avesa (6), Cicar (13) y *Quercus sp.* (7), Eryhe (2), (Figura 6.12b).

Tabla 10.- Presencia y ausencia de especies en diferentes puntos de muestreo siguiendo la ruta (G2). Las celdas con achurado indican las especies que fueron utilizadas como trazadores.

		Z. Recarga	Z. Descarga																															
P. Muestreo		15	5 7 10	15	5 7 10	15	5 7 10	15	5 7 10	15	5 7 10	15	5 7 10	15	5 7 10	15	5 7 10																	
Periodo		Ago 13			Sep 13			Oct 13			Nov 13			Dic 13			Ene 14			Feb 14			Mar 14			Abr 14								
	<i>Acafa</i>	■																																
	<i>Acabe</i>																																	
E	<i>Zanfa</i>		■																															
	<i>Prola</i>																																	
S	<i>Cicar</i>	■																																
P	<i>Avesa</i>	■																																
	<i>Flepy</i>																																	
E	<i>Calvi</i>																																	
	<i>Dodvi</i>																																	
C	<i>Trica</i>																																	
	<i>Pluca</i>																																	
I	<i>Lanhi</i>																																	
E	<i>Poaceae</i>		■																															
	<i>Zeama</i>																																	
S	<i>Quercus sp.</i>																																	

6.3.5.- Isotopos estables hidrológicos del Sistema

Joya de Luna-Guaxcamá.

El análisis de isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ / $\delta^2\text{H}$ en muestras de agua subterránea marcan una línea de evolución de los procesos de fraccionamiento químico, de interacción agua-roca y de evaporación ($\delta\text{D} = 4*\delta^{18}\text{O}-53.1$), formando cuatro grupos de agua subterránea con firmas isotópicas particulares, asociados a los diferentes aprovechamientos; como norias y manantiales (Figura 1 y 6.13). El grupo 1 (G1) se colectó en la muestra 11 de la zona de recarga y en las muestras 1, 4, 6 de la zona de descarga, siendo el grupo de menor evaporación ($\delta^{18}\text{O} -10.20$ y $\delta^2\text{H} -97.15$). Las muestras antes mencionadas reflejan un proceso isotópico similar de fraccionamiento químico y de evaporación lo cual indica que las muestras de este grupo corresponden a la misma firma de agua en zona de recarga Joya de Luna y emerge en la de descarga de Guaxcamá. Las muestras del grupo 2 (G2) se colectaron en el sitio 15 de la zona de recarga y en los sitios de la zona de descarga 5, 7, 10 es más evaporado que G1 ($\delta^{18}\text{O} -9.11$ y $\delta^2\text{H} -92.45$, Figura 27). Su firma isotópica es diferente a los grupos G1 ($\delta^{18}\text{O} -10.20$ y $\delta^2\text{H} -97.15$), G3 ($\delta^{18}\text{O} -9.43$ y $\delta^2\text{H} -84.83$) y G4 ($\delta^{18}\text{O} -6.20$ y $\delta^2\text{H} -79.67$), y sugiere otra ruta de circulación subterránea que conecta hidráulicamente las zonas de recarga-descarga. Para el grupo 3 (G3), los puntos de aprovechamiento 3, 2 y 9 muestran condiciones de evaporación muy similares al grupo G2 (G3: $\delta^{18}\text{O} -9.43$ y $\delta^2\text{H} -84.83$ vs G2: $\delta^{18}\text{O} -9.11$ y $\delta^2\text{H} -92.45$), considerándose como un flujo local, la diferencia de altitudes es pequeña (de 35 m) y su conexión hidráulica es corta

(Figura 6.13). Las muestras del grupo 4 (G4) colectadas en los puntos de recarga 12, 13,14, y el punto de descarga 8, presenta una mayor evaporación de agua ($\delta^{18}\text{O}$ -6.20 y $\delta^2\text{H}$ -79.67). La diferencia de elevaciones entre zona de recarga-descarga es de 118 m y están separadas por 26 km, evidenciando una conectividad hidráulica entre ambas zonas siguiendo una ruta de fracturamiento subterráneo por donde circula el agua (Figura 1 y 6.13).

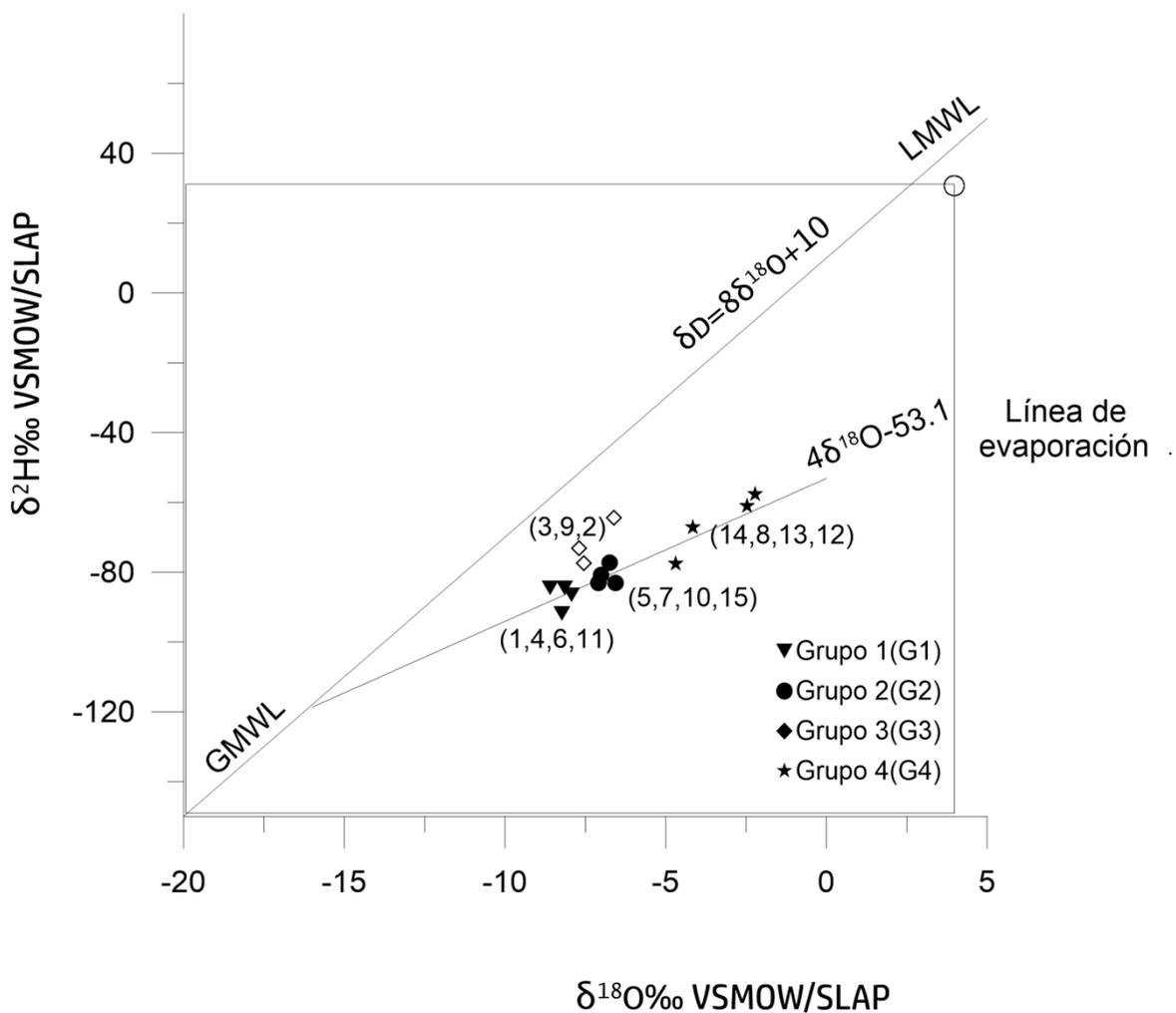


Figura 6.13.- Relaciones isotópicas del polen obtenido de las muestras de agua subterránea.

6.4.- Discusión.

6.4.1.- Polínica ambiental en agua subterránea y captura de polen.

De las 41 especies polínicas caracterizadas en la región, en el periodo de Agosto 2013- Junio 2016, sólo 22 se identificaron en las muestras de agua subterránea de la zona de recarga y descarga. Los granos de polen coinciden con el periodo fenológico de las especies y los meses de cultivo por ejemplo para el grano de polen *Cicar* la preparación del terreno es en primavera y se cosecha en Octubre, los granos de esta especie se encuentran en el mes de Agosto 2013, Octubre 2013 y Abril 2014 (3, 6 y 10 meses después), la siembra del *Zeama* es en Octubre y la cosecha en Abril, estos granos se encuentran en Agosto 2013, Noviembre 2013, Enero 2014 y Febrero 2014 (4, 7, 9 y 10 meses después), después de la siembra del maíz se prepara el terreno para *Avesa* la cual se cosecha en primavera (Marzo), los granos de esta especie se encuentran en Agosto 2013, Noviembre 2013 y Febrero 2014 (5, 7 y 11 meses después), el *Quercus sp.*, sólo se encuentra en la zona montañosa y su tiempo de floración es en Abril, los granos de esta misma especie se identificaron en el mes de Octubre 2013 y Enero 2014 (6 y 9 meses después) en la zona de descarga (Tabla 9). Los pólenes de cultivo y característicos de la zona de recarga se identificaron en la zona de descarga de seis a siete meses después, lo cual representa un tiempo aproximado de residencia del agua subterránea en el área de estudio (Tabla 9). De acuerdo a los resultados obtenidos y siguiendo el gradiente altitudinal de vegetación significa

que las especies de cultivo y característicos de la zona de recarga se identificaron en la zona de descarga de seis a siete meses después, lo cual representa un tiempo aproximado de residencia del agua subterránea y una velocidad promedio de 124 a 145 m/día en el área de estudio. Los cuatro pólenes característicos y propios de la zona de recarga se presentaron en la zona de descarga (*Quercus sp.*, *Avesa*, *Cicar*, *Zeama*), estas especies fueron tomadas como trazadores clave lo cuales sirvieron de evidencia en la conexión entre zona de recarga-descarga, siguiendo el gradiente de vegetación con BQ, RA, MSM, VSa/BQ y VSa/MSM (ver Figura 1). El utilizar granos de polen naturales como marcadores en estudios hidrogeológicos ha proporcionado resultados muy satisfactorios.

La metodología MEPAM es un método novedoso, que permite obtener información de conexiones hidrológicas, trayectorias de partículas, direcciones de flujo, determinación de velocidades, y además, tiempos de residencia de 6-7 meses con distancias de hasta 26 km en un sistema cárstico. MEPAM puede seguir el monitoreo de polen en trayectos largos en sistemas cársticos por ejemplo para un enfoque más regional, las recargas en las sierras de Álvarez y El Coro (al este y noreste de la ciudad de San Luis Potosí), con sistemas mayores de descarga en la Zona Media del Estado (p.ej. Manantial de la Media Luna, en Rio Verde). Análisis más regionales han sido reportados por algunos autores (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013), utilizando otras técnicas de la Teoría de Sistemas de Flujo (TSF), donde la parte orgánica incluida en el análisis es realmente mar-

ginal y muy solo complementaria en la visión de caracterizar conexión de sistemas de recarga y descarga de agua subterránea.

Una contribución científica del presente trabajo fue exponer la metodología MEPAM, la cual demuestra que la aplicación de la polínica e isotopos ambientales tienen un enorme potencial para resolver problemas de conectividad hidráulica entre zonas de recarga y zonas de descarga o bien para identificar la conexión hidráulica entre dos cuencas hidrogeológicas en medios fracturados.

Por ejemplo, Spandre *et al.*, (2003) utilizaron esporas de la especie *Lycopodium clavatum* pigmentadas para obtiene información de conexiones hidráulicas y puntos de contaminación en las canteras de explotación de los Alpes Apuanos y los manantiales de abastecimiento de agua potable del acueducto, ellos reportaron que estas esporas solo se podían monitorear por distancias y tiempos de residencia de (6 hrs a 3 días).

6.4.2.- Isotopos hidrológicos del Sistema Joya de Luna Guaxcamá.

Los valores de D-excess indican " δ " que las aproximaciones de las diferencias isotópicas asociadas a las agrupaciones de los diferentes aprovechamientos (Figura 6.14).

El grupo G1, empobrecido en isotopos, es el que presenta la más alta diferencia isotópica entre recarga y descarga (7.94‰ de diferencia). Su tiempo de residencia e interacción agua roca refleja un recorrido mucho mayor y/o tiempo de descarga es lento. El alto contenido de sulfato refleja disolución de yesos de la Formación Guaxcamá. Para el grupo G2 enriquecido medianamente por isotopos,

la diferencia entre recarga y descarga es de 6.27‰, diferencia isotópica menor a la de G1 lo que sugiere que: el tiempo de residencia e interacción agua roca es ligeramente menor, por lo tanto, su desplazamiento en el subsuelo es medianamente rápido. Esto se debe a que el agua atraviesa por un medio que está más fracturado y/o poroso debido a la disolución de la roca, y la relación de la mezcla para un aprovechamiento como noria o manantial no es constante como lo indica Solameh (2004). Sólo la recarga local puede explicar el enriquecimiento de isotopos (Solameh, 2004) y su fraccionamiento isotópico bajo. El grupo G3 presenta una diferencia isotópica entre recarga y descarga de 3.99‰, lo cual sugiere que su tiempo de residencia e interacción agua roca es menor y descarga rápidamente. En el grupo G4 la diferencia isotópica es mayor 6.36‰, por lo que se asume que el tiempo de residencia e interacción agua roca es mayor y/o su descarga es menos rápida y de evaporación alta. Los grupos G1 y G2 son los grupos más representativos porque tienen una diferencia isotópica alta y mediana, un tiempo de residencia e interacción agua-roca mayor y el tiempo de descarga lento. Las firmas isotópicas con diferentes grados de fraccionamiento de los diferentes grupos G1 a G4 se muestran en la Figura 6.15, y son coherentes con lo que se muestra en gráfica de D-excess (Figura 6.14), que sugiere la conexión hidráulica entre la zonas de recarga y descarga de agua subterránea. Esto también concuerda con los resultados obtenidos con la MEPAM utilizando los granos de polen referidos en la (Tabla 9 y Figura 6.12). Además, la estructura misma de la sierra donde se ubica Joya de Luna, y la ubicación de la zona de descarga presentan un sistema de fracturamiento asociado a la charnela de un

pliegue mayor de dirección NW-SE, lo que sugiere que ambas zonas están conectadas hidráulicamente a través de dicho sistema de fracturamiento (Figura 6.14 y 6.15).

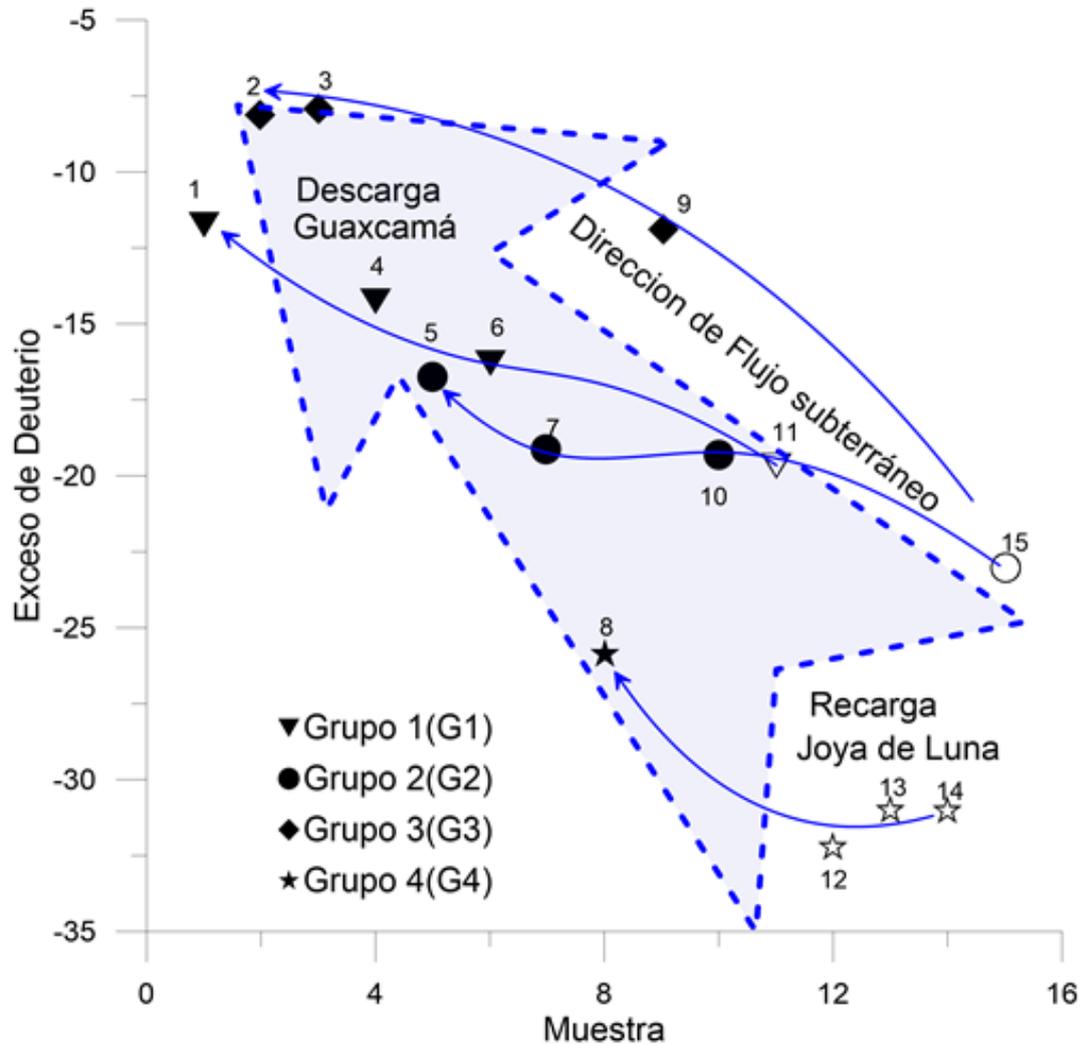


Figura 6.14.- D-exceso (exceso de deuterio) para muestras de agua subterránea de Joya de Luna- Guaxcamá.

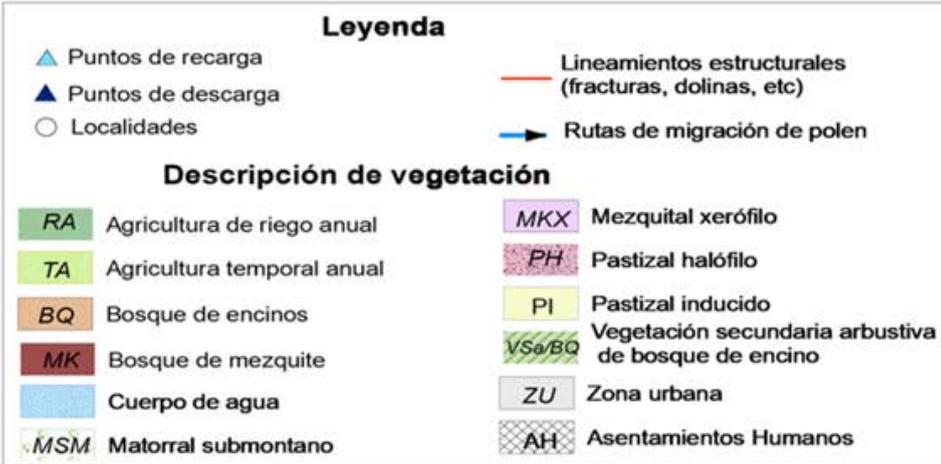
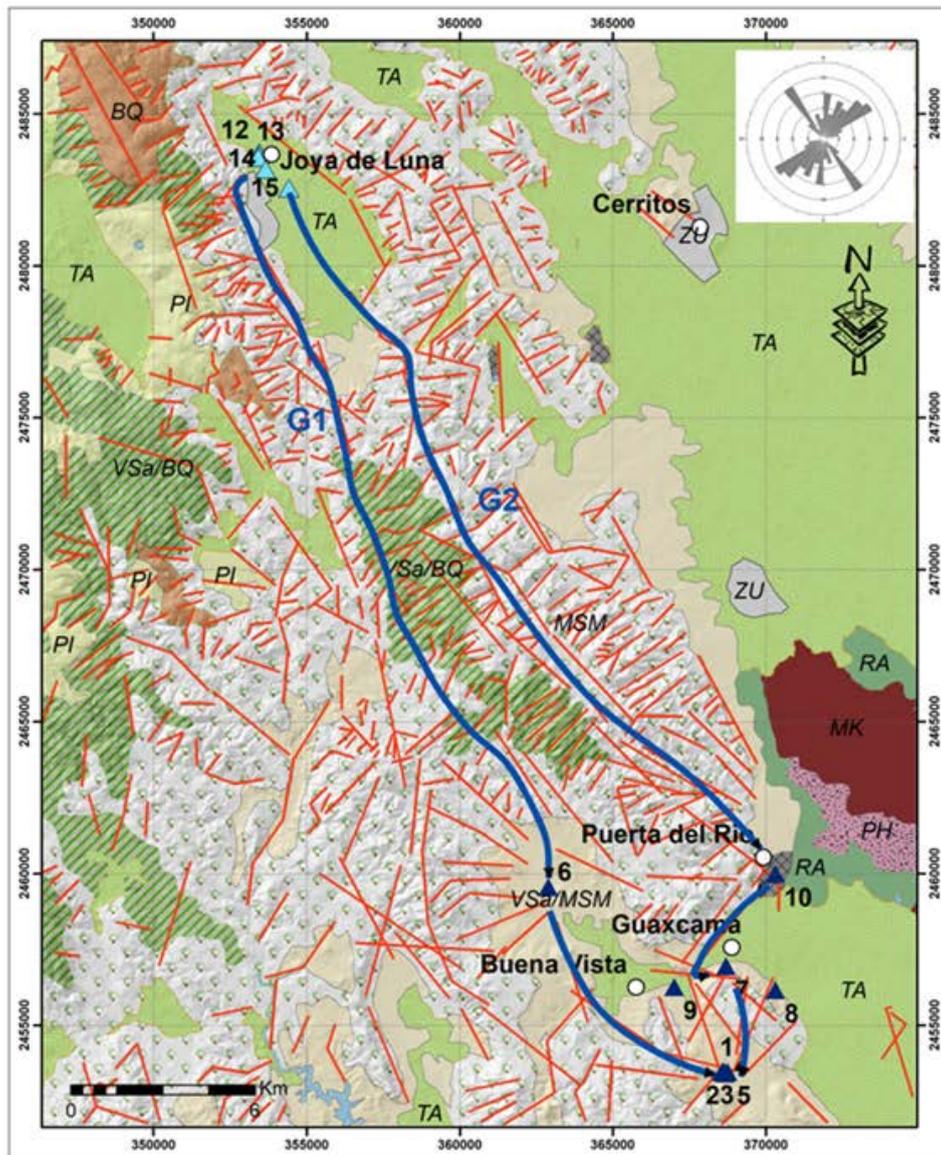


Figura 6.15.- Mapa de lineamientos estructurales y rutas de migración de polen en el área de Joya de Luna-Guaxcamá.

7.- CONCLUSIONES.

7.1.- Conclusiones para San Nicolás Tolentino.

- El acuífero recibe su recarga de agua que drena a través de rocas calcáreas de la formación El Abra, y rocas volcánicas delimitan el acuífero.
- Se obtuvieron 3 diferentes tipos de agua: bicarbonatada cálcica (Ca-HCO_3), bicarbonatada sódica (Na-HCO_3), y una muestra exótica de tipo sulfatada cálcica (CaSO_4).
- Se identificó un flujo local y otro flujo intermedio, en donde cada sistema tiene una muestra representativa utilizada como miembro extremo.
- En el sistema hidrogeológico se identificó una mezcla ternaria, procesos de interacción agua-roca y en menor proporción evaporación.
- El sistema es alimentado por tres regiones importantes, la Región I aporta el 54.6%, la Región II contribuye con un 29.4% y la Región III favorece con un 16.0% de agua al sistema.

7.2.- Conclusiones para Joya de Luna-Guaxcamá.

- Los resultados del presente estudio mediante la metodología MEPAM contrastada o complementada con el uso de isótopos estables, tiene el potencial de contribuir a la caracterización e identificación de la conecti-

vidad hidráulica en zonas de recarga y descarga, rutas de migración (direcciones de flujo) y tiempos de residencia en sistemas cársticos complejos y así, estudiar la relación entre una zona de recarga y la de descarga.

- Con el análisis de frecuencia presencia/ausencia, se determinó que el tiempo fenológico de las especies utilizadas como trazadores en la zona de recarga es de 6 a 7 meses, lo cual equivale al tiempo de respuesta del sistema. Además se dio evidencia de la conexión hidráulica existente entre la zona de recarga Joya de Luna y la zona de descarga en Guaxcamá utilizando las especies de granos de polen *Zeama*, *Avesa*, *Cícar* y *Quercus sp.*, como trazadores.
- Los grupos conformados por firmas isotópicas similares (G1 y G2), pero con diferentes grados de evaporación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, permitieron relacionar sitios específicos de la zona de recarga y de descarga, sobre una línea de evolución del agua subterránea; estos grupos confirman la conectividad entre ambas zonas.
- Los resultados del exceso de deuterio evidenciaron la conectividad hidráulica entre la zonas de recarga y descarga, observándose en los valores de los grupos G1 y G2; esto nos permitió también analizar el tiempo de residencia y la interacción agua-roca. Los valores de ambos grupos nos indican que el tiempo de residencia del G1 es mayor que el de G2, lo cual corrobora los resultados obtenidos con la metodología polínica, permitiendo a demás inferir las direcciones de flujo.
- El mapa geológico-estructural nos muestra que los sistemas de fracturas

asociados al plegamiento que afecta a las rocas calcáreas donde se desarrolla el carst, delinear, de manera general, la dirección de flujo inferida con los trazadores utilizados (Figura 6.15).

- Finalmente, las limitantes reflejadas en el presente estudio son las siguientes: i) están la cantidad de fracturas y porosidad de la roca, ya que el polen puede quedarse atrapado o bien desplazarse en otra dirección que no se ha considerado para el muestro, ii) tiempo empleado (hasta dos años) para crear una guía polínica que sea útil para identificar los granos de polen, ya que lo ideal es contar con una especie clave que esté presente únicamente en la zona de recarga, para que tenga la función de trazador polínico.

REFERENCIAS

1. Abu J. N., (2001), Geochemical evolution and recharge of the shallow aquifers at Tulul al Ashiqif, NE Jordan: *Environmental Geology*, vol. 41, 372-383pp.
2. Aggarwal, P. K., Gat, J., (2005), *Isotopes in the water cycle. Past, present and future of a developing science*, Springer, Dordrecht, Froehlich KFO (eds).
3. Agustí, M. (2004). *Fruticultura*. Madrid: Mundi Prensa Libros, 493pp.
4. Antigüedad, I., Morales, T., Uriarte, J.A., (2008), *Los acuíferos kársticos. Caso del país Vasco*. Grupo de Hidrogeología. Geodinamica Saila. Universidad del país Vasco-Euskal Herriko. 8pp.
5. Andreo, B., Vadillo, I., Carrasco, F., Neukum, C., Jiménez, P., Goldscheider, N., Hötzl, H. Vías, J.M., Pérez I. y Göppert, N., (2004), Precisiones sobre el funcionamiento hidrodinámico y la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero kárstico de la Sierra de Líbar (provincias de Málaga y Cádiz, sur de España) a partir de un ensayo de trazadores: *Revista de la Sociedad Geológica de España*, Vol. 17 (3-4): 187-197pp.
6. Antigüedad, I., Morales, T., Uriarte, J.A., (2008), *Los acuíferos kársticos. Caso del país Vasco*. Grupo de Hidrogeología, Geodinámica Saila, Universidad del país Vasco Euskal Herriko, 8pp.

7. Antuna, I. I., Kretzschmar, T., (2004), Desarrollo hidrogeológico con énfasis en la hidrogeoquímica del acuífero de La Misión, Ensenada, Baja California, México en XXXIII congreso AIH, Groundwater Flow understanding from local to regional scales: Zacatecas, México.
8. Apello, C.A., Postma, D., (1996), *Geochemistry, Groundwater and Pollution*: Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema, 536 pp.
9. Armienta, E.K., Zamora y J. F., (1987), *Manual para el análisis químico de aguas naturales, en campo y laboratorio. Comunidades técnicas. Serie Docencia y Divulgación, Num. 4.* México D.F. Instituto de Geofísica de la UNAM, 86pp.
10. Arrate, I., Antigüedad, I., Llanos, H., Laresgoiti, M. F., Alonso, R., Gallo, B., (1991), *Aporte metodológico de trazaos en sistemas kársticos del país Vasco*, 18pp.
11. Attinger, R., (1988), *Tracerhydrologische Untersuchungen im Alpstein. Methodik des kombinierten Tracereinsatzes für die hydrologische Grundlagen-erarbeitung in einem Karstgebiet.* Geographica Bernensia, Berne. G-29pp.
12. Auckenthaler, A., Raso, G., Huggenberger, P., (2002), *Particle transport in a karst aquifer natural and artificial tracer experiments with bacteria, bacteriophages and microspheres.* *Water Science and Technology*, Vol. 46 (3), 131–138pp.
13. Back, W., Zotl, J., (1974), *Application of geochemical principles, Isotopic Methodology and artificial tracers to karst Hydrology.* In: *Hydrogeology of*

- karstic terrains, I.A.H.
14. Badan, A., Kretzschmar, T., Espejel, I., Cavazos, T., D'Acosta, H., Vargas, P., Mendoza, L., Leyva, C., Arámburo, G., Daesslè, W., Ahumada, B., (2006), Hacia un plan de manejo del agua en Valle de Guadalupe, Baja California, en Memorias del II Seminario Internacional de Vitivinicultura: Ensenada, Baja California, México, INIFAP, 45-64pp.
 15. Benische, R. B., Hötzl, H., Leditzky, H. P., Maurin, V., Ramspacher, P., Zojer, H., Zötl, J. G., (1980), Der Einsatz von Triftstoffen, in Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). Steirische Beiträge zur Hydrogeologie, Vol. 32, 81–86pp.
 16. Benson, R., Yuhr, L., (2016), Site Characterización in Karst and Pseudokarst Terraines. Technos, Inc Miami, FL, USA, Springer, 417pp.
 17. Birks, S., Gibson, J., Gourcy, L., Aggarwal, P., (2002), Maps and animations offer new opportunities for studying the global water cycle, Eos Transactions, American Geophysical Union Electronic Supplement., 83 (37), available at http://www.agu.org/eos_elec/020082e.html (accessed 21 April 2009).
 18. Bowen, J., Wilkinson, B. (2002): Spatial distribution of ^{18}O in meteoric precipitation. *Geology*, 30, 315–318pp.
 19. Carrillo, B. J., (1971), La Plataforma Valles - San Luis Potosí: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Vol. 23, 1-102pp.

20. Clark, I. D., Fritz, P., (1997), Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publ., Boca Raton, FL, 328 pp.
21. Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, (2010), Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Cerritos-Villa Juárez (2414), estado de San Luis Potosí, México, D.F., 32pp.
22. Copeland, R., Upchurch, S.B., Scott, T.M., Kromhout, C., Arthur, J., Means, G., Rupert, P., Bond, P., (2009), Hydrogeological Units of Florida: Tallahassee, Florida, Florida Geological Survey Special Publication 28, 32 pp.
23. Craig, H., (1961), Isotopic variations in meteoric waters. Science, Vol. 133, 1702–1703pp.
24. Dansgaard, W., (1961), The isotopic Composition of natural waters: with special reference to the Greenland Ice Cap. Lunos, Copenhagen, 120 pp.
25. Dansgaard, W., (1964), Stable isotopes in precipitation. Tellus, Vol. 16, 567-584pp.
26. Dansgaard, W., (2004), Frozen Annals – Greenland Ice Sheet Research. The Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Denmark, 122 pp.
27. Deutsch, W.J., (1997), Groundwater Geochemistry: fundamentals and applications to Contamination: New York, CRP-Press 232pp.
28. Dody, A., Adar, E. M., Yakirevich, A., Geyh, M. A., Yair, A., (1995), Evaluation of depression storage in an arid rocky basin using stable isotopes of oxygen and hydrogen. IAHS Publication, 232, 417–427pp.
29. Douglas, M., Clark, I.D., Raven, K., Bottomley, D., (2000), Groundwater mixing dynamics at a Canadian Shield mine: Journal of Hydrology, 235,

- 88-103pp.
30. Drew, D.I., Smith, D.I., (1969), Techniques for the tracing of subterranean drainage. British Geomorphological Research Group Technical Bulletin, Vol. 2, 1–36pp.
 31. Eguiluz de Antuñano, S., Aranda, G. M., Marrett, R., (2000), Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. (53), 1-26pp.
 32. Flury, M., Wai, N. N., (2003), Dyes as tracers for vadose zone hydrology. Review of Geophysics, 41(1). 1002. Doi: 10.1029/2001RG000109.
 33. Freeze, R.A., and Cherry, J.A., (1979), Groundwater: Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 604 pp.
 34. GEOCHIMIA ET COSMOCHIMIA ACTA, (1989), "Report on the International Strípa Project", Vol (53) 8, 1717 -1817 pp.
 35. Genereux, D., (2004), Comparison of naturally-occurring chloride and oxygen-18 as tracers of inter basin groundwater transfer in low land rain forest, Costa Rica: Journal of Hydrology, 295(1-4), 17-27pp.
 36. Gerencia del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), (2005), Subgerencia de Control Estadístico y Cartografía. www.siga.conagua.gob.mx
 37. Gibbs, R.J., (1970), Mechanisms controlling world water chemistry: American Association for the Advancement of Science, New Series, Vol. (170) 3962, 1088-1090pp.
 38. Göppert, N., Goldscheider, N., (2008), Solute and Colloid Transport in

- Karst Conduits under Low- High-Flow Conditions. *Groundwater*, Vol. (46) 1, 61–68pp.
39. Gospodaric, R., Zotl, J., (1976), Markierung unterirdischer Wasser – Untersuchungen in Slowenien. *Steirische Beiträge zur Hydrogeologie*, Vol. (28), 7–257pp.
40. Harpaz, Y., Bear, J., (1963), Investigations on mixing of waters in underground storage operations, *International Association Scientific Hydrology*, Vol. (64), 132-153pp.
41. Herrera, C. S., Villalba, A. A. I., Molinar, T. M. E, (2007), Modelación hidrogeológica y evaluación de la sustentabilidad del acuífero transfronterizo del Río San Pedro en Sonora, México: *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, Vol.(3), 21-30pp.
42. Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, (2002), Estudio Hidrológico del estado de San Luis Potosí.
43. International Atomic Energy Agency (IAEA), (1989), Isotope techniques in the study of the hydrology of fractured and fissured rocks. *Proc. of Advisory Group Meeting, Vienna*, 306 pp.
44. Jiménez-Martínez, J., Custodio, E., (2008), El exceso de deuterio en la lluvia y en la recarga a los acuíferos en el área circum-mediterránea y en la costa mediterránea española. *Boletín Geológico y Minero*, Vol. (119) 1, 21-32pp.
45. Kehew. A. E., (2001), *Applied Chemical Hydrogeology*. Prentice Hall, New Jersey, 368 pp.

46. Käss, W., Reichert, B., (1986), Tracing of karst water with fluorescent spores. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing, Athens, Greece (Morfis, A., Paraskevopoulou, P.), Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, 157–165pp.
47. Kiraly, L., Müller, I., (1979), Heterogeneité de la perméabilité et del alimentation dans le karst, effect sur la variation du chimisme des sources karstiques. Bull. Center Hydrogéol. Neuchatel, Vol. (3), 237-285pp.
48. Laaksoharju, M., Skarman, C., Skarman, E., (1999), Multivariate mixing and mass balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information: Applied Geochemistry, Vol.(14), 861-871pp.
49. Labarthe, H. G., Tristán, G. M., Aranda, G. J. J., (1982), Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí. Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto técnico No. 85, 208pp.
50. Lee, E.S., Krothe, N.C., (2001), A four component mixing model for water in a karst terrain in south central Indiana, USA using solute concentration and stable isotopes as tracers: Chemical Geology, 179, 129-143pp.
51. Leibundgut, Ch., Lüthi, B., (1977), Bestimmung des Seihvermögens von Grundwasserleitern mittels Tracer, In: 3rd International Symposium of Underground Water Tracing, LjubljanaBled, Yugoslavia, Gospodaric, R., Habic, P. (eds.), Institute for Karst Research, Lubljana, 141–148pp.
52. Leibundgut, C., (1987), Hydrökologische Untersuchungen in einem alpinen Einzugsgebiet – Grindelwald, Schlussbericht zum Schweizerischen

- MAB-Programm Nr. 30, unpublished report (German), Institute of Geography, University of Berne.
53. Leibundgut, C., Maloszewski, P., Külls, C., (2009), Tracers in Hydrology, Institute of Hydrology, University of Freiburg, Freiburg, Germany, First Edition, 399 pp.
54. Lesser, I., (1978), Uso y aplicación de trazadores de agua subterránea, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. (2) 39, 71-76pp.
55. López, D. R. A., Soto A. R. G., Dircio C. D., (2001), Carta Geológico Minera, Peotillos F14-A75 San Luis Potosí, Servicio Geológico Mexicano.
56. López D. R.A., 2003. Formación Tamabra del Cretácico Medio de la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, Centro-Noreste de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas Vol. (20) 1: 1-19pp.
57. Luhmann, A. J., Covington, M. D., Alexander, S. C., Chai, S.Y., Schwartz, B. F., Groten, J. T., Alexander Jr., E. C., (2012), Comparing Conservative and non conservative tracers in karst and using them to estimate flow path geometry, Department of Earth Science University of Minnesota, 310 Pillsbury Drive SE. Minneapolis, MN55455, USA., 201-211pp.
58. Mazor, E., (1991), Applied chemical and isotopic groundwater hydrology - Open Univ.
59. Mangin, A., (1975), Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karst-iques. Annales Spéléologie, Vol. (30) 1, 21-124pp.
60. Maxey, G. B., (1964), Hydrostratigraphic units: Journal of Hydrology, Vol

- (2), 124-129pp.
61. Miffilin, M.D., (1968), Delineation of groundwater flow systems in Nevada, Report series H-W., Desert research Institute Technical, Vol. (4), 111 pp.
 62. Monreal, R., Castillo, J., Rangel, M., Morales, M., Oroz, L.A., Valenzuela, H., (2001), La intrusión salina en el acuífero de la costa de Hermosillo, Sonora, en Corona-Esquivel, R., Gómez-Godoy, J., (eds.), Acta de sesiones de la XXIV convención internacional de la asociación de ingenieros de minas metalurgistas y geólogos de México A.C.: Acapulco, Guerrero, México, 93-98pp.
 63. Montoya P. P. M., Leon, B. D., Nates P. G., (2014), Catalogo de polen en mieles de *Apis mellifera* provenientes de zonas cafeteras en la Sierra Nevada de Santa Marta, Magdalena, Colombia, Revista de la academia Colombiana de Ciencias exactas, física y naturales. Bogotá. Vol. (38).140, 364-384pp.
 64. Mook, W. G., (2001), Environmental isotopes in the hydrological cycle, Principles and applications. IHP-V, Technical Documents in Hydrology, UNESCO, Paris, No. 39.
 65. National Research Council (NRC), 1995, Mexico City's water supply. Improving the outlook for sustainability: Washington, D.C., National Research Council-Academia de la Investigación Científica, A.C. Academia Nacional de Ingeniería, A.C.-National Academy Press, 216 pp.
 66. North American Commission on Stratigraphic Nomenclature (NACSN),

- (2005), North American Stratigraphic Code, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Vol. (89), 1547 – 1591pp.
67. Peñuela A. L. A., Carrillo R. J. J. (2013), Instituto de Geografía UNAM, Investigaciones Geográficas No. 81, p. 18 – 32.
68. Pérez, C. F. Y., López, L. H., (2011), Caracterización Geofísica de ambientes cársticos, caso: Poljé Joya de Luna, San Luis Potosí, México, ----pp.
69. Pernía, Ll. J. M., López G. J. A., Grima O. J., Sánchez G. J., Pendás F. F., Martínez Á. A. R., (1991), Aplicación de Técnicas especiales al estudio hidrológico de zonas de baja permeabilidad, Isotopos y trazadores, Instituto Tecnológico Geo Minero de España, 1-361pp.
70. Piper, A. M., (1994), A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Am. Geophysical Union Trans. Vol. 25, 914-923pp.
71. Ramos L. J.A., Martínez R. V.J., Rangel M. J.R. y Alfaro de la T. M.C., (2007), Hydrogeological and mixing process of waters in aquifers in arid regions: a case study in San Luis Potosí Valley, Mexico. Environ Geol 53:325-337pp.
72. Ramos L. J. A., Pérez C. F., Moran R. J., Torres G. D., (2012), Estudio hidrogeológico en las inmediaciones del municipio de Cerritos.
73. Rice, K.C., Hornberger, G.M., (1998), Comparison of hydrochemical tracers to estimate source contributions to peak flow in a small, forested, head water catchment: Water Resources Research, Vol. (34) 7, 1755-1766pp.
74. Rindsberger, M., Margaritz, M., Carmi, I., Giland, D., (1983), The relation between air mass trajectories and the water isotope composition of rain

- in the Mediterranean sea área. *Geophys. Research Lett.*, Vol. (10), 43-46pp.
75. Roback, R.C., Johnson, T.M., McLing, T.L., Murrell, M.T., Luo, S., Ku, T.L., (2001), Uranium isotopic evidence for groundwater chemical evolution and flow patterns in the eastern Snake River Plain Aquifer, Idaho: *Geological Society of America Bulletin*, Vol. (113) 9, 1133-1141pp.
76. Rodgers, P., Soulsby, C., Waldron, S., (2005), Stable isotope tracers as diagnostic tools in upscaling flow path understanding and residence time estimates in a mountainous mesoscale catchment, *Hydrological Processes*, in press,
77. Sabir, I. H., Torgersen, J., Haldorsen, S. y Alestrom, P., (1999), DNA tracers with information capacity and high detection sensitivity tested in groundwater studies, *Hydrogeol. J.*, Vol. (7) 3, 264-272pp.
78. Spandre, G. R., Batisti, E. F. R., Chemas, H. E., Giusti, D. A., (2003), Empleo de esporas de *Lycopodium Clavatum* como marcadores de aguas subterráneas en acuíferos kársticos, *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, Vol. (3), 43-47pp.
79. Salameh, E., (2004), Using environmental isotopes in the study of the recharge-discharge mechanisms of the Yarmouk catchment area in Jordan, *Hydro-geology Journal*, 451–46pp.
80. Sanz, D., Gómez, A. J.J., Castaño, S., De las Heras, J., Martínez, A. P. E., (2009), Hydrostratigraphic framework and hydrogeological behaviour of the Mancha Oriental System (SE Spain): *Hydrogeology Journal*, Vol (17),

- 1375 – 1391pp.
81. Singhal, B. B. S., Gupta, R. P., (1999), Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, Indian Institute of Technology Roorkee Department of Earth Science, Roorkee, India, Springer, Second Edition, 401pp.
 82. Skalbeck, J.D., Shevenell, L., Widmer, M.C., (2002), Mixing of thermal and non thermal waters in the Steamboat Hills area, Nevada, USA: Geothermics, Vol. (31), 60-90pp.
 83. Smart, P. L., Smith, D.I. (1976), Water tracing in tropical regions, the use of fluorometric techniques in Jamaica. Journal of Hydrology, Vol. (30), 179 - 195pp.
 84. Smart, P. L., Laidlaw, I.M.S. (1977), Evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. Water Resources Research, Vol. (13), 15 - 33pp.
 85. Torres H. J.R., Rodríguez R. R., Barboza G. J.R., Saucedo G. R., Tristán C. L.C., García P. K., (2010), Cartografía Geológico Minera Santa Catarina F14-A-85 San Luis Potosí, Servicio Geológico Mexicano.
 86. Torres H. J. R., Siebe, G. C., Aguillón R. A., Rodríguez R., R., (2014), Geocronología y características geoquímicas de un conjunto de domos riolíticos terciarios en el Campo Volcánico de San Luis Potosí, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. (66) 1, 183-197pp.
 87. Torres R. S., (2012), Caracterización hidrogeoquímica y direcciones de flujo de agua subterránea en el acuífero de San Nicolás Tolentino. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias en Geología Aplicada, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 105 pp.

88. Valencia, J., (2013), Significado del exceso de deuterio en la interpretación de isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en estudios hidrogeológicos, Departamento de Hidrología Isotópica, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Informe Científico Tecnológico, Vol. (13), 125-127pp.
89. Valentino, G. M., Stanzione, D., (2002), Source process of the thermal waters from the Phlegraean Fields (Naples, Italy) by means of selected minor and trace elements distribution: *Chemical Geology*, 245-274pp.
90. Vogel, J. C., Lerman J. C., Mook W. G. (1975), Natural isotopes in surface and groundwater from Argentina. *Hydrological Sciences Bulletin*, (20) 2, 203–221pp.
91. Wanner, S. C., Pusch, M., (2000), Use of fluorescently labeled Lycopodium spores as a tracer for suspended particles in a lowland river, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 19, N. 4, 648-658 pp.
92. Wallick, E. I., (1981), Chemical evolution of groundwater in a drainage basin Holocene age, east-central Alberta, Canada: *Journal of Hydrology*, Vol. (54), 245-283pp.
93. Ward R. D., Moreno P. J. E., (1991), Pollen and espores of Barro Colorado Island, *Missouri Botanical Garden, Universidad of Michigan*, Vol. (36), 268pp.
94. Yurtsever, Y., Gat, J., (1981), Atmospheric waters. In: *Stable Isotope Hydrology – Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle*, Gat, J., Gonfiantini, R. (eds.), IAEA, Vienna, 103 - 142pp.
95. Zapata Z. J. L., Pérez V. J. A., (1979), *Cartografía Geológica Hoja Peutillos*,

- S.L.P, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folletos Técnicos N.63, 30pp.
96. Zötl, J., (1974), Karsthydrogeologie. Springer, Vienna, 291 pp.
97. Zvikelsky, O., Weisbrod, N., (2006), Impact of particle size on colloid transport in discrete fractures. *Water Resource Research*, 42 (12), W12S08. Doi: 10.1029/2006WR004873.
98. (sglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM24sanluispotosi/minucios/24051a.html).
99. Agustí, M. (2004). *Fruticultura*. Madrid: Mundi Prensa Libro