

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL CONFINAMIENTO DE LA CIUDAD DE
SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

PRESENTA

JOSÉ SOCORRO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

LINARES, NUEVO LEÓN

JUNIO 2011



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA®

LA TESIS

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL CONFINAMIENTO DE LA CIUDAD DE
SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO**

ELABORADA POR

JOSÉ SOCORRO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

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

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.

Dr. Héctor De León Gómez
DIRECTOR DE TITULACIÓN

LINARES, NUEVO LEÓN

JUNIO 2011



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA®

LA TESIS

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL CONFINAMIENTO DE LA CIUDAD
DE SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO.**

ELABORADA POR

JOSÉ SOCORRO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

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

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.

COMITÉ DE REVISIÓN DE TITULACIÓN

Dr. Héctor De León Gómez

DIRECTOR DE TITULACIÓN

Dr. Francisco Medina Barrera

CO-DIRECTOR DE TITULACIÓN

Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández

CO-DIRECTOR DE TITULACIÓN

LINARES, NUEVO LEÓN

JUNIO 2011

Por este medio declaro bajo protesta, haber realizado esta tesis de manera personal y haber utilizado únicamente los medios, procedimientos y asesorías descritas en la misma.

José Socorro Rodríguez Rodríguez

Linares Nuevo León, Junio 2011

DEDICATORIA

A Dios. Por darme la vida, la paciencia, fuerza de voluntad, de impulsarme día con día a seguir adelante y permitirme cumplir las metas que me he propuesto y sobre todo por estar siempre a mi lado y escucharme mis oraciones en cada momento.

A mis Padres: La Sra. Josefina Rodríguez Moreno y Celedino Rodríguez Rodríguez † . Por ser un gran ejemplo de vida en vida, por apoyarme en todas mis decisiones, guiándome para ser un gran hombre y por enseñarme a luchar por mis anhelos y metas por difícil que estas sean siempre las podré lograr. Gracias por sus oraciones, a ti padre que aunque sé que ya no estás aquí, pero sé que hoy desde el cielo mi sigues apoyando como lo hiciste en vida y a ti madre que hoy todavía te tengo pido a Dios que te conserve muchos años más para me sigas apoyando. No hay día que no le dé gracias a Dios por darme el privilegio de ser su hijo, gracias simplemente por ser mis Padres.

A mis Hermanos: Francisca, Lurdes, J. Guadalupe, Ma. De La Luz, José Luis, Ma. Elena, Martín, Ismael y Ma, Carmen. Por ser unos hermanos ejemplares, por su apoyo en cada momento para seguir adelante, por los grandes momentos que pasamos juntos, gracias por sus oraciones, no hay día que no le dé gracias a Dios por darme el privilegio de ser su hermano, Que Diosito los bendiga donde quiera que se encuentren.

A mi Hermano: Manuel †. Por tu apoyo que me brindaste en vida y sé que hoy desde el cielo mi sigues apoyando, Gracias por ser un gran hermano.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme brindado la vida.

A mis padres por traerme al mundo y ser un modelo de vida para mí.

A mis hermanos. Por ser unos hermanos ejemplares.

Al Servicio Geológico Mexicano. Por el apoyo y facilidades que se me brindó para la elaboración de ésta tesis.

Al Dr. Rafael Alexandri Rionda . Director del Servicio Geológico Mexicano por las facilidades brindadas para la conclusión de esta tesis.

Al Ing. Francisco Escandón Valle, por su apoyo y motivarnos a realizar una carrera de Maestría en Ciencias Geológicas.

Al comité de becas del Servicio Geológico Mexicano, por su paciencia y aptitudes ofrecidas.

Al Ing. Ramón Mérida Cruz Gerente de Geología y Geoquímica antes, hoy Gerente Regional Centro (SGM), por permitirme el tiempo necesario para concluir mi tesis.

Al Ing. Enrique Espinosa Arámbula Subdirector de Geología. (SGM), por brindarme el tiempo necesario para concluir el presente trabajo.

A los ings. José Antonio López Ojeda Gerente de Geología y Geoquímica Rigoberto Vásquez Mendoza. Gerencia Regional Occidente M.C. Gustavo Rodolfo Pérez Acosta del (SGM). Asesor Interno, por su comprensión y conformismo brindados.

A los Ings. David Barbosa Luna y Alberto Montañez Castro † por su gran amistad. Que por causas del destino o porque Dios los necesitaba ya no están con nosotros. Descansen en paz que Diosito los tenga en el cielo.

A mi asesor de tesis y Director de titulación el Dr. Héctor de León Gómez, por ofrecerme su apoyo en cada etapa de la elaboración de esta tesis.

Al Comité de revisión de tesis y co-directores de titulación, el Dr. Francisco Medina Barrera y Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández por sus indicaciones y comentarios para perfeccionar este trabajo de tesis.

Al Subdirector de Posgrado, Dr. Fernando Velasco Tapia, primeramente por su valiosa amistad. y por buscar acuerdos con el personal del Servicio Geológico Mexicano para que se nos proporcionara el tiempo necesario por concluir los trabajos de tesis y por su asesoría en la interpretación de la Caracterización Hidrogeoquímica Del Tipo De Agua (Según Piper).

Al M.C. Raúl Herrera Mendoza Gerente de Ingeniería Ambiental de Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA, S.A. de C.V), por apoyarme en el equipo y personal para llevar a cabo la toma de muestreo, así como el laboratorios para realizar el análisis de muestreo.

Al Ing. José Guillermo Barrios Gutiérrez Director de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), por facilitarme la información que generan en la institución que usted atinadamente dirige.

Al Ing. Salvador I. de la Garza González por sus valiosos comentarios y asesoría para el enriquecimiento de la tesis.

Al M.C. Federico Viera por sus atenciones y por la gran ayuda proporcionada en la toma de muestreo y su colaboración en los análisis químicos.

Mtra. Manuelita González por la paciencia brindada durante mi formación académica.

Al Dr. Dirk Masuch Oesterreich antes que nada su valiosa amistad y por su apoyo a la revisión en el resumen de inglés.

A todas las personas que contribuyeron en mi desarrollo durante mi paso por la FCT: Dr. Gabriel Chávez, Dr. José Rosbel Chapa Guerrero, Cand. Dr. Tomás Cossío, y al Dr. Ignacio Navarro de León.

Al Cand.Dr. René Alberto Dávila Porcel por su amistad y apoyo en la interpretación de la vulnerabilidad.

A la profesora-Investigador Cinvestav-Salttillo Dra. Ma. De Lurdes V. Díaz Jiménez por proporcionarme información Hidrogeoquímica y apoyarme en el análisis de muestro de minerales pesados.

A Ma. Candelaria Ortega Chagoya profesora-Investigador Cinvestav-Salttillo por su apoyo en la revisión de la ortografía.

A Ma. Beatriz Almanza Delgado, Lic. En Educación Primaria por su apoyo en la revisión de la ortografía.

*A mi amigo **Josué Crisanto Herrera Monrial**, por su apoyo, por los buenos y malos momentos que pasamos juntos tanto en el trabajo y de generación en generación.*

*A mis **compañeros de trabajo** por todos los momentos que pasamos juntos, que con su entusiasmo y apoyo ofrecido, fueron una parte muy importante para la terminación de este trabajo de tesis.*

*Por último, quiero expresar un intenso agradecimiento a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión, me animaron a lograr este trabajo de tesis, y a todas esas personas que omito que colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento **Muchas Gracias!***

Pero sobre todo ¡Gracias a Dios!

Contenido	ÍNDICE	Página
Índice de Figuras		i
Índice de Tablas		iv
Índice de Anexos		v
Nomenclatura y abreviatura		vi
Resumen		viii
Abstract		x
Introducción		xii
CAPITULO I GENERALIDADES		1
I.1 Antecedentes		1
I.1.1 Hipótesis		2
I.1.2 Objetivos		3
I.1.3 Metas		4
I.2. MARCO FISIAGRÁFICO		5
I.2.1 Localización		5
I.2.2 Vías de acceso		6
I.2.3 Clima		7
I.2.4 Temperatura		10
I.2.5 Vegetación		12
I.2.6 Suelos		12
I.2.7 Hidrología		12
I.2.8 Fisiografía		13
I.2.9 Geomorfología		14

CAPITULO II MARCO GEOLÓGICO	15
Introducción	15
II.1 Geología Regional	16
II.2 Geología del área de estudio	16
II.3 Estratigrafía	17
II.3.1 Formación Parras	18
II.3.2 Grupo Difunda (Cretácico Superior – Terciario Eoceno Medio)	20
II.3.2 Formación Cerro del Pueblo	21
II.3.4 Formación Cerro Huerta	22
II.3.5 Coluvión	23
II.4 Geología Estructural	24
II.4.1 Discusión y análisis del fracturamiento	29
CAPITULO III MARCO HIDROGEOLÓGICO	32
Introducción	32
III.1 Metodología	34
III.2. Piezometría	36
III.3. Sistema Hidrogeológico	36
III.3.1. Unidades hidrogeológicas	37
III.3.2. Acuíferos de poros	37
III.3.3. Acuíferos de grietas	38
III.3.4. Discusión y análisis de la piezometría	39

CAPÍTULO IV MARCO HIDROGEOQUIMICO	41
Introducción	41
IV.1. Metodología	43
IV.2. Distribución de parámetros físico-químico	46
IV.3. Coliformes totales y fecales	53
IV.4. Metales pesados	53
IV.4.1. Caracterización hidrogeoquímica del tipo de agua (según Piper)	56
IV.4.2. Caracterización de las aguas según contenido de TSD	58
IV.4.3. Clasificación del tipo de agua por su dureza	59
IV.4.4. Clasificación SAR	59
IV.4.5. Parámetros que sobrepasan los límites máximos permisibles (LMP).	62
IV.4.6. Discusión de resultados hidrogeoquímicos	64
IV.4.7. Discusión sobre la calidad del agua	67
CAPITULO V RELACIONES ENTRE GEOLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA	68
Introducción	68
V.1. Análisis preliminar y discusión	68
CAPITULO VI ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA A LA CONTAMINACIÓN	71
Introducción	71
VI.1. Metodología	72
VI.2. Análisis de vulnerabilidad del área	74
VI.3. Discusión de resultados	77

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
VII.1. Conclusiones	80
VII.2. Recomendaciones	81
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Página
I.1. Plano de localización del área de estudio.	6
I.2. Principales vías en el área de estudio (Tomada de la carta topográfica estatal escala 1:50,000).	7
I.3. Tipos de climas en el territorio de México.	8
I.4. Precipitación media mensual 2000-2009 de las estaciones Climatológicas Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).	9
I.5. Precipitación media anual 2000-2009 de las estaciones Climatológicas Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).	10
I.6. Temperaturas máximas anuales 2000-2009 de las estaciones Climatológicas Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).	11
I.7. Temperaturas mínimas anuales 2000-2009 de las estaciones Climatológicas Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).	11
I.8. Provincias y subprovincias fisiográficas de México (Raiz, E, 1964).	14
II.1. Columna Estratigráfica (basada en información del Servicio Geológico Mexicano 1999 y 2008).	19
II.2. Afloramiento de lutita-arenisca de la Formación Parras, en el arroyo Las Flores que en el área solo se aprecia en los arroyos, se observa descansando el conglomerados sobre esta unidad.	20
II.3.A). Panorámica de la localidad tipo de la Formación Cerro del Pueblo en su localidad tipo Cerro del Pueblo, B) y un acercamiento de su litología arenisca-lutita.	21
II.4. Panorámica de una secuencia de lutita, limolita y lechos rojos características de la Formación Cerro Huerta.	23
II.5. A). Sedimentos aluviales recientes, se encuentran donde se unen los ríos el Mulato y Las Flores, sus espesores son variables de 1 m a 12 m. B) Presentan una intercalación del río con el acuífero de poros.	24

II.6. Estado de las fracturas cuando estas se encuentran cerradas, abiertas y rellenas (tomada de Barton et., 1978).	26
II.7. Fracturas rellenas de calcita en la litología de la Formación Cerro del Pueblo, que forman barreras que impiden la infiltración, hacia el manto acuífero.	29
II.8. Rocas fracturada directamente en contacto con los residuos sólidos. El sistema de fracturas al descubierto por la ausencia de geomembranas facilitando la infiltración de lixiviados hacia el subsuelo. En esta zona el nivel freático en esta área se localiza a 18 m de profundidad.	30
II.9. Sistema de fracturamiento general predominante en el área de estudio.	31
III.1. Tipos de intersticios y relación entre textura y la porosidad de las rocas. a) Elementos de tamaño uniforme; porosidad alta. b) Elementos homogéneos; baja porosidad. c) La porosidad ha disminuido por compactación de los intersticios con material fino. d) La porosidad de las rocas se debe a la disolución. e) Rocas porosas por fracturación (Davis & de Wiest (1971).	33
III.2. Camino local del agua a través de las fracturas abiertas (fechas pequeñas). La línea punteada indica la dirección del agua subterránea (Werner 1996).	34
III.3. Equipo empleado para llevar a cabo el censo de los aprovechamientos hidráulicos a) GPS, b) altímetro, c) sonda sonora y d) peachímetro.	35
III. 4. Tipo de litología que se observa en el acuífero que lo conforma arcillas, limos y conglomerados mal cementados con gravas, boleos y material arcillosos.	38
IV.1. Muestreo de los aprovechamientos hidráulicos para análisis físicos-químicos-bacteriológicos (A,B).	44
IV.2. Preparación para obtener los sólidos totales. Laboratorio de Geoquímica Comimsa, S.A. de C.V.	48
IV.3- Filtración al vacío del muestreo para obtener los sólidos disueltos. Laboratorio de Geoquímica Comimsa, S.A. de C.V.	49
IV.4- Determinación de la alcalinidad del muestreo mediante el método	50

volumétrico. Laboratorio de Geoquímica Comimsa, S.A. de C.V.	
IV.5. Diagrama de Piper para muestras de agua colectadas a los alrededores del Relleno Sanitario de Saltillo Coahuila.	58
IV.6. Diagrama de clasificación para muestras de agua colectadas en los alrededores del Relleno Sanitario de Saltillo Coahuila. (tomado de Custodio y Llamas, 1996).	61
IV.7- Panorámica del Relleno Municipal de Saltillo Coahuila. residuos sólidos de todo tipo, depositados sin control alguno.	65
IV.8- Residuos sólidos en contacto con el macizo rocoso, no se observa la geomembrana que impida la infiltración de lixiviados hacia el subsuelo.	66
IV.9- Vista panorámica del Relleno Municipal de Saltillo, Coahuila. Se muestra el impacto visual negativo que se genera por la basura a la intemperie antes de su confinamiento.	66
IV.10- Combustión de los residuos sólidos generando además de la infiltración de lixiviados al subsuelo, proliferación de gases en la atmósfera.	67
VI.1- Sistema empírico GOD, por medio del cual se realizó el análisis de la vulnerabilidad del acuífero del relleno Sanitario de Saltillo Coahuila. (Traducción de Foster, 1987) (tomado Lizárraga Mendiola, 2003)	76
VI.2- Litología donde se aprecian los pozos de alta vulnerabilidad localizados en el acuífero de poros.	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Página
II.1. Descripción de las aperturas en base a su separación (tomada de Barton et., 1978).	25
III.1. Parámetros hidrodinámicos en diferentes medios acuíferos (Citados por algunos autores).	40
IV. 1. Método empleado para el análisis Hidrogeoquímico del muestreo en laboratorio.	45
IV. 2. Características físicas de los puntos de muestra.	47
IV. 3. Tabla general de los resultados obtenidos para muestras de agua y su Comparación con las normas nacionales internacionales para la calidad del agua.	55
IV. 4. Clasificación según Piper por iones predominantes (Custodio y Llamas, 1996).	57
IV. 5. Clasificación del tipo de aguas en base a su conductividad eléctrica (Custodio y Llamas, 1996).	57
IV.6. Clasificación del tipo de aguas en base a su concentración del total de sólidos disueltos (Davis & De Wiest, 1971 y Werner, 1996)	59
IV.7. Clasificación del tipo de aguas en base a su dureza (como CaCO ₃ mg/l) tomada de Custodio y Llamas, 1996	59
IV.8. Tipo de aguas para riego según el Salinity Laboratory Staff (Custodio y Llamas, 1996).	60
IV. 9. Límites máximos permisibles (LMP) establecidos por diversos organismos para la calidad del agua.	64
VI. 1. Datos del muestreo, para la evaluación de la vulnerabilidad en el área.	72
VI. 2. Datos del muestreo, para la evaluación de la vulnerabilidad en el área de estudio (Tomada Lizárraga Mendiola, 2003).	73
VI. 3. Datos del muestreo, para la evaluación de la vulnerabilidad en el área de estudio.	77

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo 1 Carta Geológica-Estructural del área del relleno municipal de Saltillo. Coah., México.
- Anexo 2 Sección Geológica A-A.´
- Anexo 3 Resultados obtenidos del muestreo de los análisis químicos con fecha del 28 de abril del 2010
- Anexo 4 Carta Hidrogeológica del relleno municipal de Saltillo, Coah., México.
- Anexo 5 Carta de Vulnerabilidad del agua subterránea del relleno municipal de Saltillo, Coah. México.

NOMENCLATURAS Y ABREVIATURAS

AGSAL	Aguas de Saltillo.
AL	Altímetro.
BaSO ₄ ⁻²	Sulfato de Bario.
BL	Bloquera.
CaCO ₃ ⁻	Carbonato de Calcio.
CE.	Conductividad Eléctrica.
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua.
°C	Grados centígrados.
Ca ²	Ión Calcio.
Cl	Ión Cloro.
cm	Centímetros.
CRM	Consejo de Recursos Minerales.
DD/P/D	Desechos domésticos por persona por día.
D.T	Dureza Total.
E	Este.
Eh	Potencial Redox.
EP	El Palmar.
Fac.	Facultad.
GPS	Geoposicionador satelital.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática.
K	Potasio.
Kg.	Kilogramo.
Km.	Kilómetro.
LMP	Límites máximos permisibles.
Lps.	Litros por segundo.
LG	La Gloria.
LT	La Torre.
m	Metros.
mm	Milímetros.

meq.	Miliequivalente.
Mg ⁺²	Ión Magnesio.
m/d	Metros/día.
Mmho/cm	Micromhos por centímetros.
MJS	Manantial San Juan.
Mg/L	Miligramos por Litro.
msnm	Metros sobre el nivel del mar.
N	Norte.
NMP	Número más probable.
NF	Noria de Flores.
NOM	Norma.
No.	Número.
NO ₃ ⁻	Nitrógeno.
N.L	Nuevo León.
NW	Noroeste.
NE	Noreste.
PO ₄ ³	Fosfato.
pH	Potencial de Hidrogeno.
PF	Puente de Flores.
RC	Rancho de Castillo.
RP	Rancho de Peña.
U.A.N.L	Universidad Autónoma de Nuevo León.
USEPA	United States Environmental Protection Agency.
SAR	índice de adsorción del sodio.
SE	Sureste.
SMO	Sierra Madre Oriental.
SGM	Servicio Geológico Mexicano.
SW	Suroeste.
W	Oeste.
WHO	World Health Organization

RESUMEN

El área de estudio se ubica en la porción noroeste del estado de Coahuila, en la ciudad de Saltillo. El área está constituida por rocas sedimentarias enmarcadas en los paleoelementos de la cuenca de Parras y Sierra Madre Oriental cuyo rango en edad abarca del Cretácico Superior al Terciario Inferior.

En el área de estudio existen fuentes de contaminantes puntuales (relleno municipal) y difusas (granjas porcícolas, fosas sépticas y letrinas, zonas agrícolas, ganaderas, rellenos industriales) que favorecen la infiltración de contaminantes hacia el agua subterránea. Este se transporta a través de dos medios acuíferos de profundidad somera, que están conectados hidráulicamente: el de grietas formado por las roca de Formación Parras, que permite la infiltración y el transporte de lixiviados a través del intenso fracturamiento (porosidad secundaria), y el acuífero de poros compuesto por sedimentos granulares semi-consolidados (conglomerados, gravas) de permeabilidad alta.

Sobre el acuífero de grietas se localiza el relleno municipal, en el que se depositan alrededor de 600, 000 toneladas de residuos sólidos domésticos, municipales e industriales durante el período de actividad que abarca desde 1984 al 2010 y que se tiene programado al 2024 su clausura, en este sitio no se apreció la geomembrana que evite la infiltración hacia el agua subterránea, así como de un diseño de sistema de colector de lixiviados y de gases (NOM-ECOL-084-1994; NOM;ECOL-083-1996). Existe un segundo sistema de fracturamiento que coincide con la dirección del flujo del agua subterránea (SW-NE) y con el transporte de contaminantes a través de isolíneas de flujo del agua subterránea. Gran parte de la influencia antropogénica se encuentra en el acuífero de poros, ya que ahí es donde se localizan: el relleno municipal, fosas sépticas y letrinas.

Se realizaron análisis físicos, químicos, bacteriológicos y de metales pesados en muestras de agua evaluadas en base a la Norma Oficial Mexicana (NOM) consumo humano, doméstico y agrícola. Según los LMP establecidos para el agua potable, existen altas concentraciones de sólidos disueltos, coliformes fecales y totales según WHO, por nitratos según USEPA, WHO, EEC Y NOM-ECO-127-1996.

De acuerdo a los parámetros uso de suelo, uso de agua, tipos de acuíferos, profundidad del nivel freático y la distancia de los puntos de muestreo a las fuentes de contaminación, se establece un método propuesto para evaluar las condiciones de vulnerabilidad que presenta el agua subterránea. Además se aplica el método GOD (Foster, 1987) para evaluar las condiciones de vulnerabilidad respecto al medio natural (G=medio acuífero, O=litología de capas superiores, D=profundidad del nivel freático), que evalúan la vulnerabilidad del agua subterránea respecto al medio físico.

De esta forma puede observarse que el acuífero de poros presenta una alta vulnerabilidad en condiciones naturales, así como la presencia de actividades urbanas (especial en los valles y en los cauces ríos y donde se unen los cauces de Los ríos las Flores y EL Mulato). Por otro lado el acuífero de grietas es considerado como de baja vulnerabilidad respecto a la presencia antropogénica, varían dependiendo de la distancia hacia las principales fuentes de contaminación, la profundidad del nivel freático y del uso de suelo.

Se observa que el relleno municipal e industrial, granjas porcícolas, fosas sépticas y letrinas, representan la principal amenaza a la calidad del agua subterránea (pozos, norias y manantiales en Saltillo Coah.). En el presente trabajo se proponen medidas de control y se recomienda remediaciones, que permitan disminuir el impacto ambiental que las actividades antropogénicas provocan en el agua subterránea.

ABSTRACT

The study area is located in the northwestern portion of the State of Coahuila, in the city of Saltillo. The area consists of sedimentary rocks framed between the paleoelements Parras and Sierra Madre Oriental basins, whose age ranges from the late Cretaceous to the lower Tertiary.

In the study area exist sources of point (municipal landfill) and diffuse contamination (porcine farms, septic tanks, latrines, agricultural zones, cattle zones, domestic and industrial residual water spills) that favor the infiltration of polluting agents towards the ground water. These flows are transported through two aquifers formed by rocks of the Parras Formation which allows the infiltration of leachates and their transport through the fractures (secondary porosity). The porous aquifer is made up of semi-consolidated granular sediments (conglomerate, gravel) of high permeability.

The municipal landfill is located on the fractured aquifer, in which were deposited around 600,000 tons of solid wastes during its period of activities between 1980-2010. The landfill is scheduled to be closed by 2024. The site lacks the design of collector systems of leachates and the gases, as well as geomembranes that prevent infiltration towards the ground water (Nom-Ecol-084-1994; Nom-Ecol-083-1996). The main direction of the fractures correspond with the main direction of the ground water flow (SW-NE) and with the transport of isolines agents through the ground water. Great of the anthropogenic influence is concentrated within the porous aquifer, due to the presence landfill of septic tanks and latrines.

Physical, chemical, bacteriological and analyses of heavy metals were made in water samples, and the results were evaluated on the basis of official Mexican standard according to human consumption, agricultural and domestic use. According to the established Permissible Maximum Limits for potable water, high dissolved solid concentrations and total and fecal coliformes exist, as well as contamination by sulphates (WHO), nitrates (USEP, WHO, EEC and Nom-Ecol 127-1996).

According to the parameters soil use, water use, type of aquifer, depth of the phreatic level and the distance of the sampling points to the contamination source, a method to evaluate the conditions of vulnerability caused by the contamination sources has been proposed that considers natural media (G = aquifer media, O = lithology of overall layers, D = depth of phreatic level). This method also accounts for the vulnerability of the ground water with respect to the natural environment.

It can be observed that the porous aquifer presents a high vulnerability in natural conditions, as well as near the presence of urban activities (specially on the Flowers and El Mulato). On the other hand, the fractured aquifer is considered as low vulnerability with respect to the environment, whereas the degrees of vulnerability due to anthropogenic activities vary depending on the distance towards the main sources of contamination, the depth of the phreatic level and the soil use.

Is observed that the municipal landfill, porcine farms, as well as septic tanks and latrines, represent the main threat to the ground water quality (wells in Saltillo, Coahuila). In the present work measures of control and recommended remediation are proposed that seek to diminish the environmental impact of anthropogenic activities cause.

INTRODUCCIÓN

La generación de basura se ha incrementado debido a la explosión demográfica, así como actividades industrial, el desarrollo tecnológico, agrícola y diferentes usos de suelo, traen como consecuencia una mayor explotación de agua con la calidad adecuada para satisfacer sus necesidades, además generando una presión sobre el acuífero del área. El agua que se consume en Saltillo es extraída del subsuelo. Existen numerosos aprovechamientos hidráulicos (pozos y norias) que son utilizados para satisfacer las demandas municipales del consumo humano, doméstico comercial, residencial y de servicios, agrícola, ganadero e industriales.

En el área de estudio no existen antecedentes o no reportan un índice de sobre-explotación y contaminación del agua subterránea. Esta tendencia de asociar los niveles de contaminación con el crecimiento de poblaciones es característica del desarrollo regional en varias partes del mundo (Murck y Skinne, 1996; Jeong, 2001; Edmunds et al., 2002).

El origen de la contaminación del agua subterránea se ha clasificado como difusa y puntual. En el área de Saltillo los cambios de uso de suelo de matorrales nativo a zonas urbanas, ha causado probablemente la aparición de fuentes difusas de contaminación. Los residuos sólidos (relleno municipal, e industriales, letrinas y fosas sépticas), se pueden considerar como causantes de la contaminación puntual.

En la región de Saltillo Coahuila existen diversas zonas que facilitan la infiltración de contaminantes hacia el agua subterránea. En dirección W-E fluye el río Mulato en dirección SW- SE y el río Duraznal, ambos ríos presentan una directa conexión hidráulica con el agua subterránea, existiendo en su cauce manantiales que se usan para consumo humano.

En la región de Saltillo no existen o no se conocen antecedentes de contaminación del acuífero, pero las condiciones existen y puedan ser causadas por el relleno municipal permitiendo mayor facilidad para el paso de contaminantes al acuífero. A pesar de que el

problema ambiental está latente y a futuro se presentaran repercusiones sociales, económicas, ecológicas y sanitarios, no se han realizado trabajos de investigación para evaluar la contaminación, sus fuentes, sus variaciones espacio/tiempo así como las condiciones de vulnerabilidad en los acuíferos del área.

CAPÍTULO I GENERALIDADES

ANTECEDENTES

Uno de los principales problemas de los centros urbanos, a nivel mundial, es el confinamiento y manejo de los residuos domésticos municipales (e.g., Sumethi et al., 2008). Su volumen y composición dependen del grado de desarrollo económico de la región (Kaoser et al., 2000). En los países industriales los desechos domésticos por persona por día (DD/P/D) alcanzan aprox. 2 kg y consisten de papel, residuos orgánicos, vidrios, metales plásticos y otros desechos. En contraste, en los países en desarrollo se han reportado DD/P/D < 1 kg, en donde predomina la madera, papel, residuos orgánicos y metales.

La población en México, con una economía en desarrollo, se incrementó en el período 1975-2005 de 30 a 103 millones de habitantes, de los cuales el 75% se concentra en áreas urbanas (INEGI, 2007). Ojeda-Benítez et al., (2000) y Ojeda y Beraud, (2003) señalaron que, que a nivel nacional los DD/P/D se triplicaron entre 1975 y 1999, siendo el Distrito Federal la zona con mayor generación de residuos (DD/P/D = 1.314 kg en promedio). Para Nuevo León, con excepción de su zona fronteriza con Estados Unidos de América, se ha reportado un valor promedio de DD/P/D = 0.935 kg. Aunque la composición y la cantidad de los desechos sólidos no es homogénea, sino que varía en cada región de acuerdo a los hábitos de consumo de la población, se puede señalar que en México se distribuyen en residuos orgánicos, 14.0% de papel y cartón, 5.9% de vidrio, 4.4% de plástico, 1.5% de textiles, 2.9% de metales y 18.9% de otros residuos como madera, desechos sanitarios, gravas, arenas, etc. (Ojeda-Benitez et al., 2000). Sin embargo, existen muy pocos trabajos sobre la generación y manejo de residuos domésticos en centros urbanos de México (por ejemplo: Mexicali, Ojeda-Benítez et al., Guadalajara, Bernache, 2003; Chihuahua, Gómez et al., 2008; Ciudad de México, Muños-Cadenas et al., 2009).

El agua que se consume en la ciudad de Saltillo es extraída del subsuelo y, existen numerosos aprovechamientos hidráulicos, como pozos y norias, que son utilizados para

satisfacer las demandas municipales para el consumo humano, doméstico, comercial, residencial y de servicios, agrícolas, ganaderos e industriales de la región.

El áreas de estudio se localiza en la parte noroeste de la capital de Saltillo, donde se observa como el crecimiento urbano está acercándose al relleno municipal, cubriendo una superficie aproximada de 8 hectáreas, en el cual se depositan alrededor de 600, 000 toneladas de residuos sólidos domésticos, municipales e industriales durante el período de actividad que abarca desde 1984 al 2010 y que se tiene programado en el 2024 su clausura.

Este sitio fue ubicado en un macizo rocoso, en una estructura de lomeríos, carece de sistemas de drenaje que desvíe los escurrimientos superficiales producto de la precipitación y una cubierta en la superficie que eviten la infiltración de los lixiviados hacia el subsuelo a través del denso fracturamiento e intemperismo que presenta el macizo rocoso, así como la instalación de una geomembrana que frene los procesos de lixiviados hacia el subsuelo. (NOM-ECOL-084-1994; NOM-ECOL-083-1996).

La conservación de la calidad en el agua subterránea es uno de los principales objetivos dentro del presente trabajo de tesis, por lo que es necesario identificar previamente las fuentes que pueden favorecer su contaminación.

La relación que existe entre la calidad de agua subterránea y el medio geológico adquieren mayor importancia cuando este último favorece la entrada de contaminación hacia el acuífero, por lo tanto, es necesario conocer el comportamiento geológico/estructural y sus conexiones con las espacio como en tiempo, que permiten analizar de manera preliminar la vulnerabilidad que el acuífero presente a la contaminación. (Lizárraga Mendiola, L.G 2003).

I.1.1.- HIPÓTESIS

En el área de estudio presenta las condiciones geológicas e hidrogeológicas que pudieran ocasionar la entrada y el transporte de contaminantes hacia los acuíferos alterando

la calidad de agua. Los contaminantes provienen de fuentes puntuales y difusas (relleno sanitario de Saltillo Coahuila.) y muestran variaciones espacio/temporales por una interacción de factores físicos y biológicos.

I.1.2.- OBJETIVOS

En el presente trabajo de investigación es de exponer los objetivos más importantes, e identificar si existen elementos o compuestos en el agua subterránea, que sobre pasen los límites establecidos por las normas de calidad del agua en el área de estudio, si estos presentan variaciones espacio/temporales detectables y si la geología está facilitando estos procesos de entrada de contaminación al acuífero. Al determinar lo anterior, las condiciones geológicas e hidrogeológicas que conlleven a estas variaciones fueron evaluadas, permitiendo detectar las posibles fuentes emisoras de contaminantes y delimitar las zonas de vulnerabilidad a la contaminación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Evaluar la situación hidrológica del área, mediante el análisis de las condiciones topográficas, la información climática e hidrometeorológica obtenida.
- Realizar un análisis geológico y estructural, determinando los contactos litológicos y las direcciones predominantes del fracturamiento en el macizo rocoso.
- Realizar el estudio piezométrico del área de estudio considerando los aprovechamientos hidráulicos existentes disponibles en la zona.
- Realizar análisis físicos, químicos, bacteriológicos y metales pesados.

- Revisar la normas oficiales que establecen los límites máximos permisibles (LMP) para consumo de agua potable, agrícola y uso urbano, detectando si existen zonas que presenten contaminación.
- Identificar las zonas más vulnerables a la contaminación y evaluar la influencia que ejercen fuentes puntuales y difusas sobre la calidad de agua subterránea.
- Proponer alternativas de remediación y control de la contaminación al medio acuífero.

I.1.3.- METAS

Al proponer los objetivos anteriores se pretenden lograr las siguientes metas planteadas:

- Identificar las zonas de recarga y descarga, que permitan una mejor comprensión del sistema hidrogeológico en el área.
- En la carta geológica-estructural (a escala 1: 40,000) se representan las condiciones de fracturamiento existentes en el macizos rocosos, que permitan identificar la relación entre sus orientaciones principales de fracturamiento, la infiltración y el movimiento del agua subterránea, así como de sus contaminantes.
- En la carta hidrogeológica (a escala 1: 40,000) se representan las direcciones preferentes del flujo del agua subterránea, sus fluctuaciones en el nivel piezométrico y sus condiciones hidrodinámicas de los acuíferos.
- En base a los resultados obtenidos de los análisis físicos, químicos, bacteriológicos y de metales pesados, se evalúa si existen parámetros que sobrepasen los límites establecidos por las normas oficiales, que representan un riesgo a la salud de humanos y/o animales.

- La concentración de sustancias en el agua subterránea se analiza estadísticamente, a partir de aproximaciones efectuadas entre los resultados obtenidos de los análisis realizados en laboratorio y los análisis químicos cuantitativos realizados en campo. Esta interpretación estadística permite evaluar las variaciones espacio/temporales ocurridas dentro del periodo de muestreo.
- La evaluación de las normas ambientales que establecen los LMP para los diferentes usos del agua, permite identificar la existencia de contaminación. Así como las zonas más vulnerables.
- Una vez que se reconocen las zonas vulnerables, es posible evaluar el grado de afectación que ejercen las fuentes de contaminación sobre la calidad del agua subterránea y sobre la salud de humanos y animales.
- De acuerdo con la información obtenida, se proponen alternativas de remediación y control, delimitando zonas de vulnerabilidad de la contaminación al agua subterránea y de daño a la salud de la población.

I.2.- MARCO FISIAGRÁFICO

I.2.1.- LOCALIZACIÓN

El área de estudio se ubica en la porción noroeste del estado de Coahuila, en la ciudad de Saltillo Coahuila. Geográficamente se encuentra limitada por las coordenadas 25° 27' de latitud norte, y los meridianos 101° 03' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 8 hectáreas, dentro de los poblados Padre Santo y Altamira (Figura.I.1).

El presente trabajo fue desarrollado dentro de la hojas INEGI en escala 1:50 000, Saltillo (G14-C33) y Arteaga (G14-C34). El confinamiento está comprendido dentro de las superficies que cubren la hoja Saltillo.

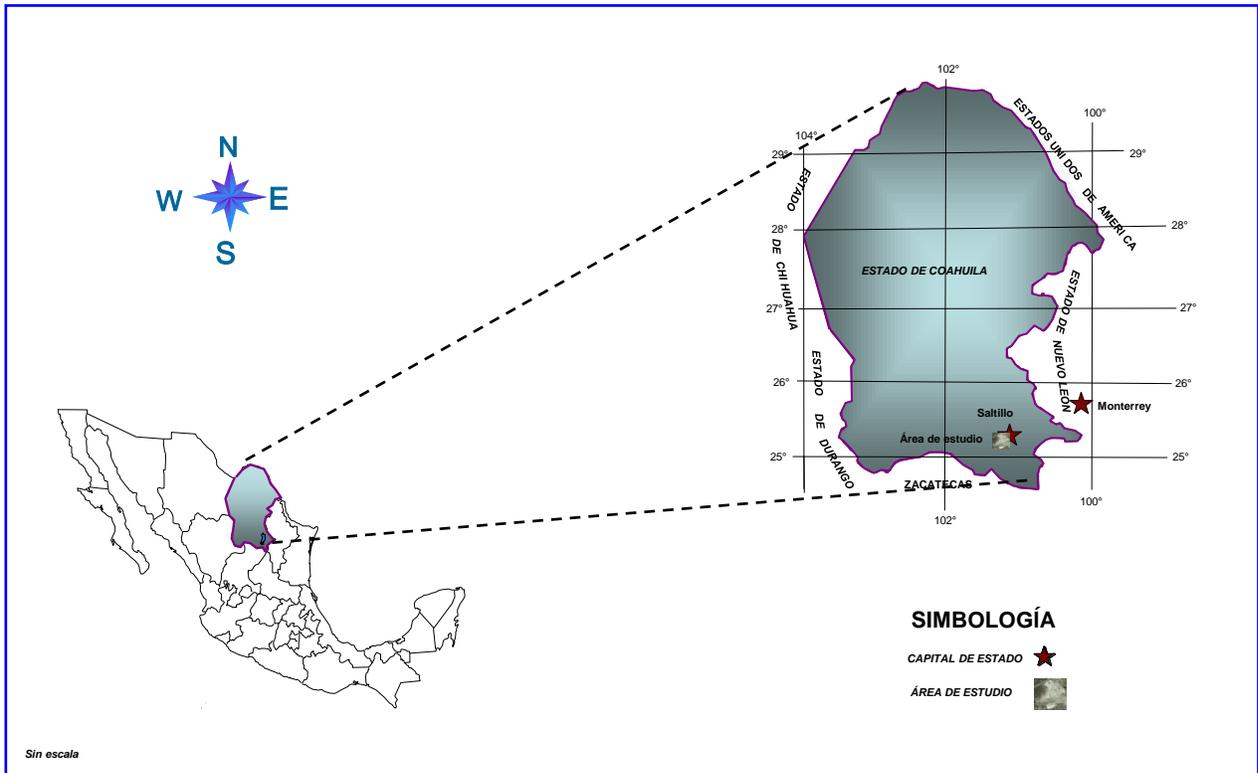


Figura I.1.- Plano de localización del área de estudio

1.2.2.- VÍAS DE ACCESO

La principal vía de acceso que comunica al relleno municipal lo representa la carretera federal No. 40 Saltillo-Torreón, a la altura del Km. 4.5. De ahí se desprende un camino terracería de 300 m que llega al poblado Padre Santo, de éste se derivan caminos y veredas que por lo general son transitables durante cualquier época del año. Estas vías conectan o comunican al relleno municipal, (Figura I.2).

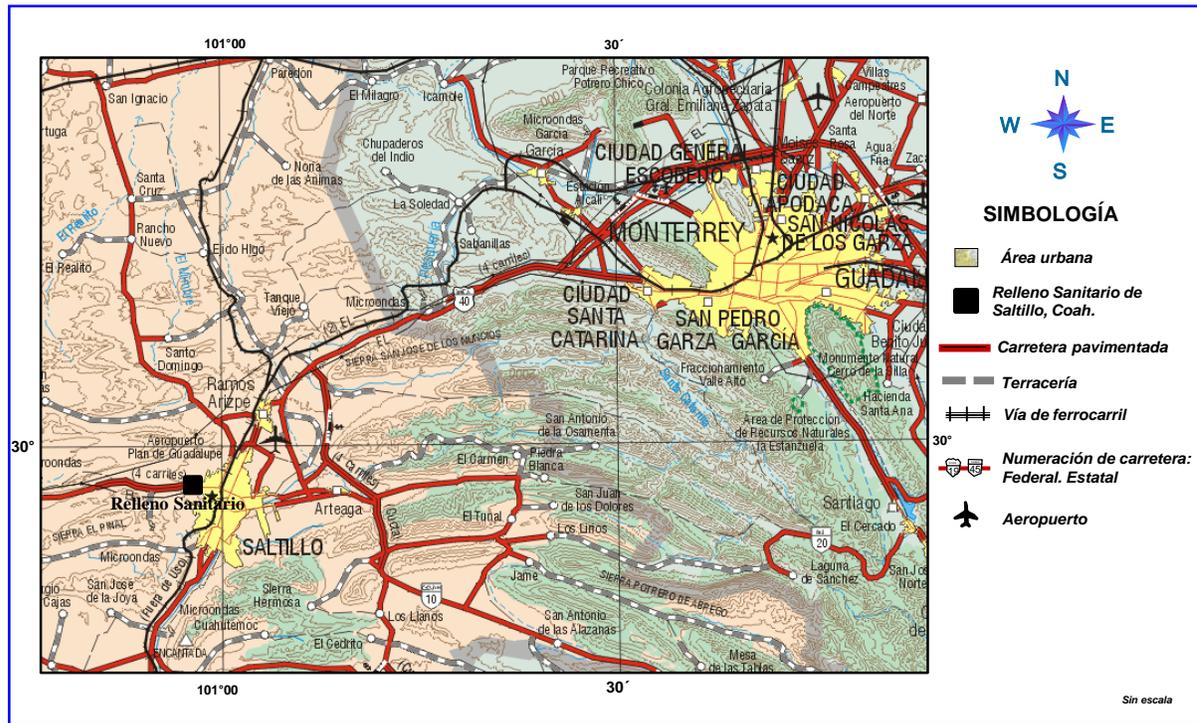


Figura 1.2.- Principales vías de acceso en el área de estudio (Tomada de la carta topográfica estatal escala 1:50,000)

I.2.3.- CLIMA

Las características de los climas en el área de estudio fueron clasificadas de acuerdo a los tipos de climas, según el sistema de Köppen, modificado por E. García. En la región imperan tres tipos de climas que pertenecen al clima del grupo de climas secos Bso, que este a su vez se divide en subgrupos. El primero se localiza al norte y pertenece al subtipo secos templados Bsox', con lluvias escasas todo el año, % de precipitación invernal mayor de 18° en verano cálido. El segundo se localiza hacia la porción noroeste de la región y es de subtipos secos semicalidos Bsohx', con lluvias escasas todo el año, % de precipitación invernal mayor del 18 en invierno fresco y por último hacia la porción sur, suroeste se encuentra el clima del subtipos semisecos templados BS1kx', con lluvias escasas todo el año, % de precipitación invernal mayor del 18° en verano cálido (Figura 1.3).

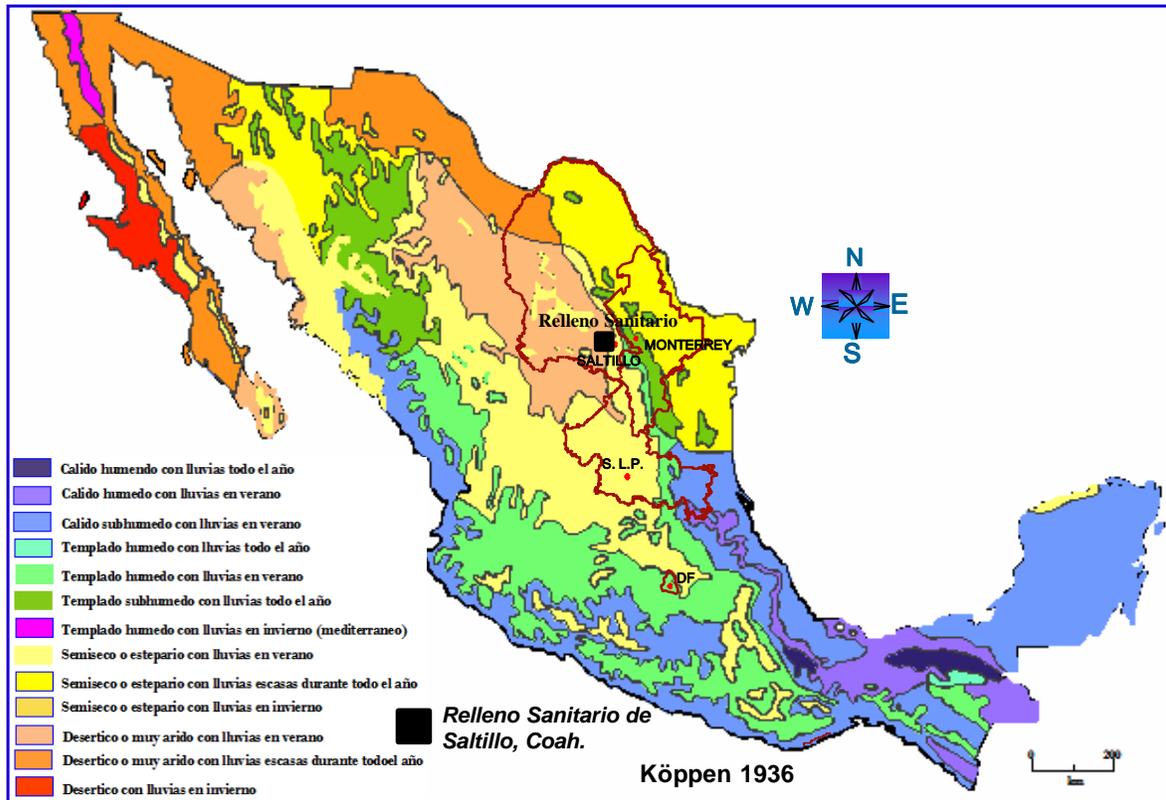


Figura 1.3.-Tipos de climas en el territorio de México

De acuerdo a la recopilación de datos de la estación climatológica ubicada en Saltillo, Coahuila, cerca del área de estudio y con base a la información climatológica reportada por Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). El período de información existente de las estaciones Saltillo y Comisión Nacional del Agua fue de 2000 al 2009. Para la estación Saltillo de 2000 a 2009 para la estación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Las precipitaciones medias mensuales varían 3 a 15 mm para los meses de febrero y marzo y las máximas de 50 a 100 mm se presentan entre los meses de mayo a septiembre (figura 1.4).

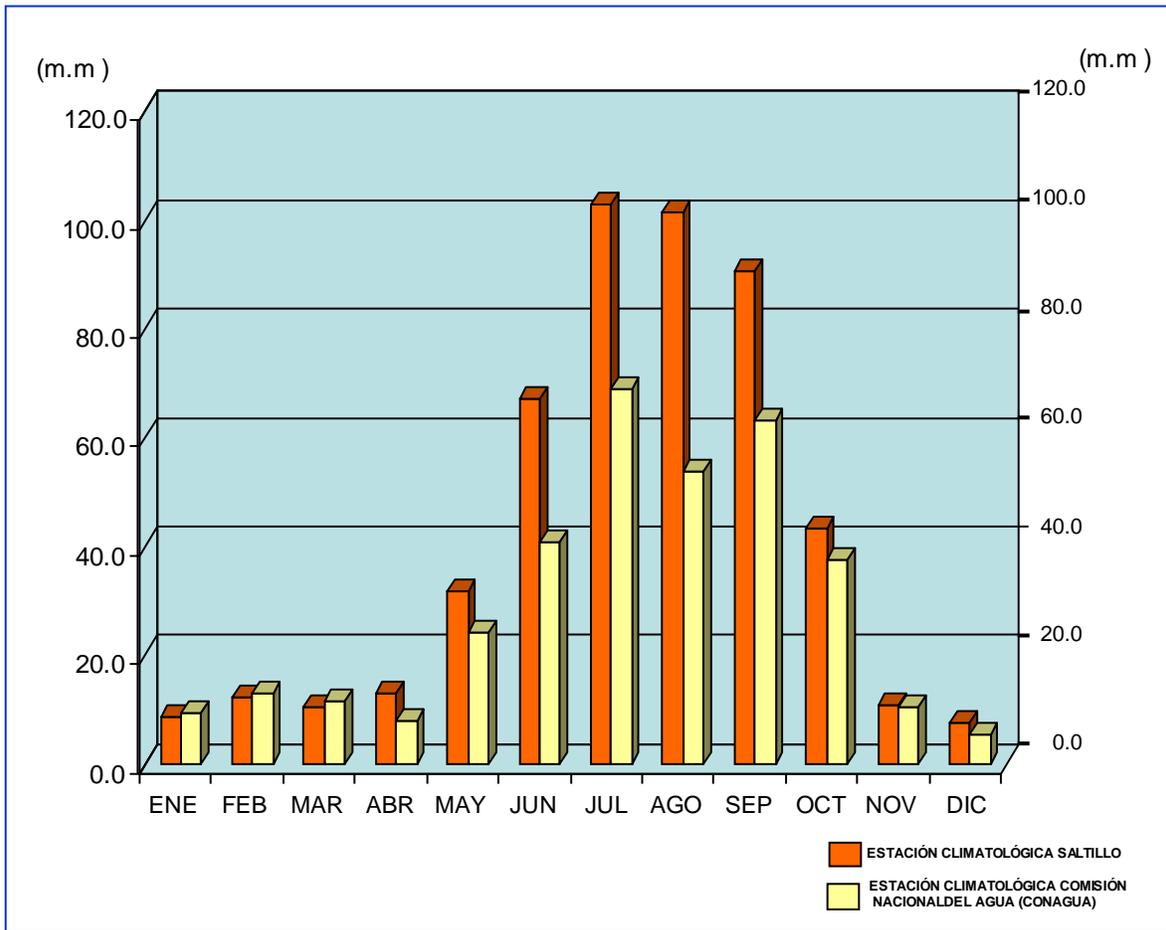


Figura I.4.- Precipitación media mensual 2000-2009 de las estaciones Climatológicas Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

En lo que se refiere a la precipitación anual media de la estación climatológica de Saltillo fue de 501.1 mm y para la estación climatológica Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) 347.2 mm. A continuación se muestra una gráfica de ambas estaciones de precipitación media anual de 2000-2009 (figura I.5).

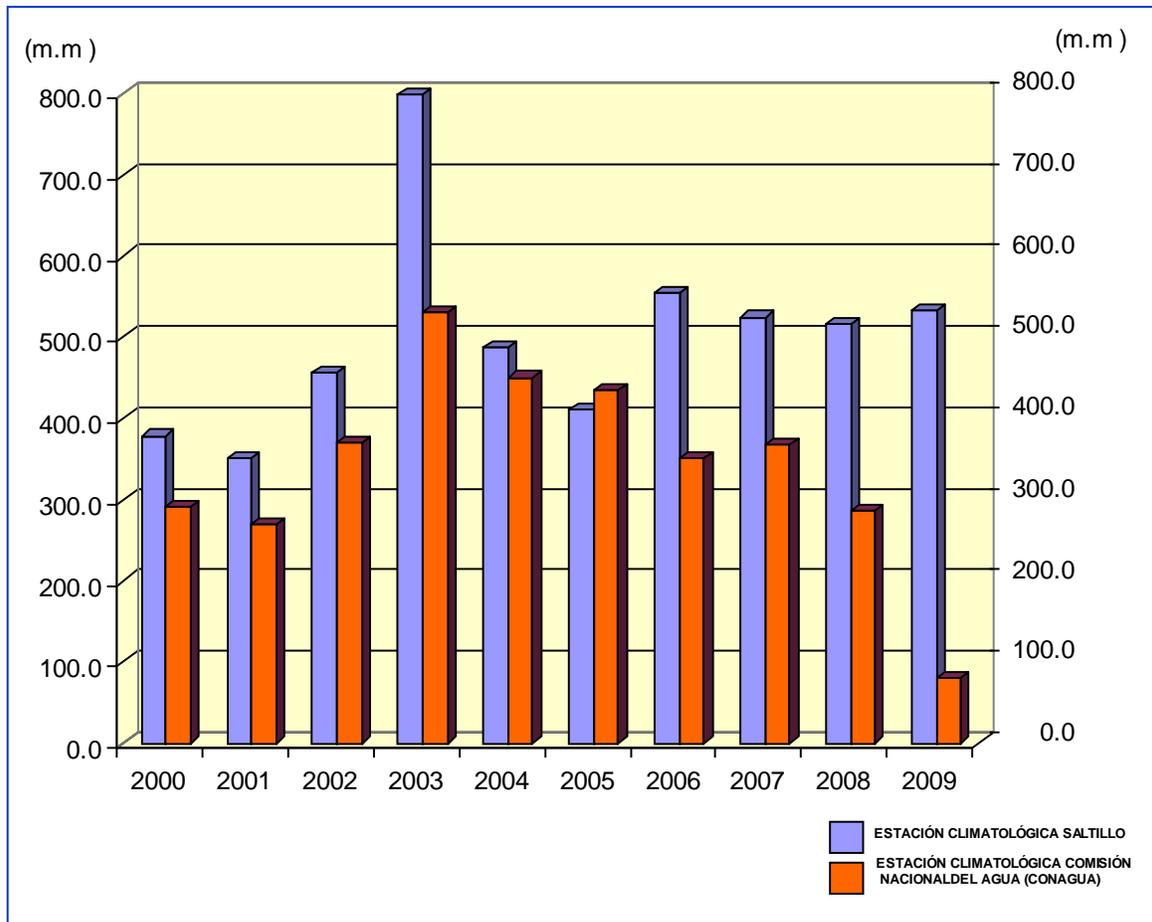


Figura I.5.- Precipitación media anual 2000-2009 de las estaciones Climatológica Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

I.2.4.- TEMPERATURA

De la recopilación recolectada de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En el período de información de las estaciones Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) fue de 2000 al 2009. En donde la estación Saltillo reporta una temperatura máxima media anual de 30.52°C ; y un a temperatura mínima 4.2°C ; mientras que en la estación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la temperatura máxima de 32°C ; y una temperatura mínima 4.9°C . Ambas estaciones registran las temperaturas más altas en los meses de mayo a junio y temperaturas mínimas en los meses de diciembre a febrero. A continuación se presentan las gráficas de temperaturas máximas anuales de ambas estaciones (Figura I.6), y de temperaturas mínimas anuales (Figura 1.7).

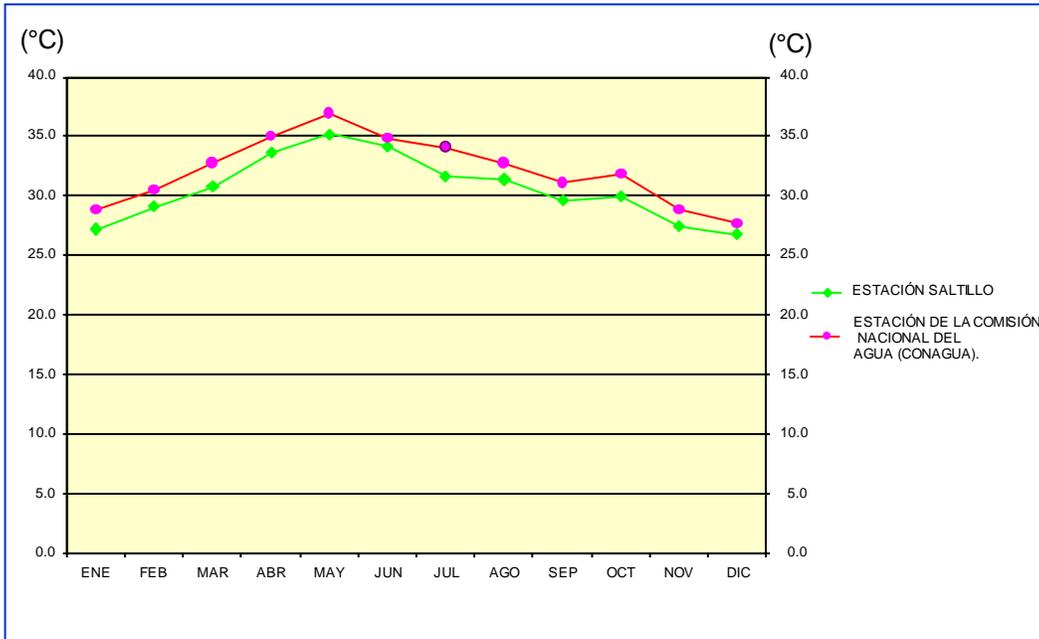


Figura 1.6.- Temperaturas máximas anuales 2000-2009 de las estaciones Climatológicas Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

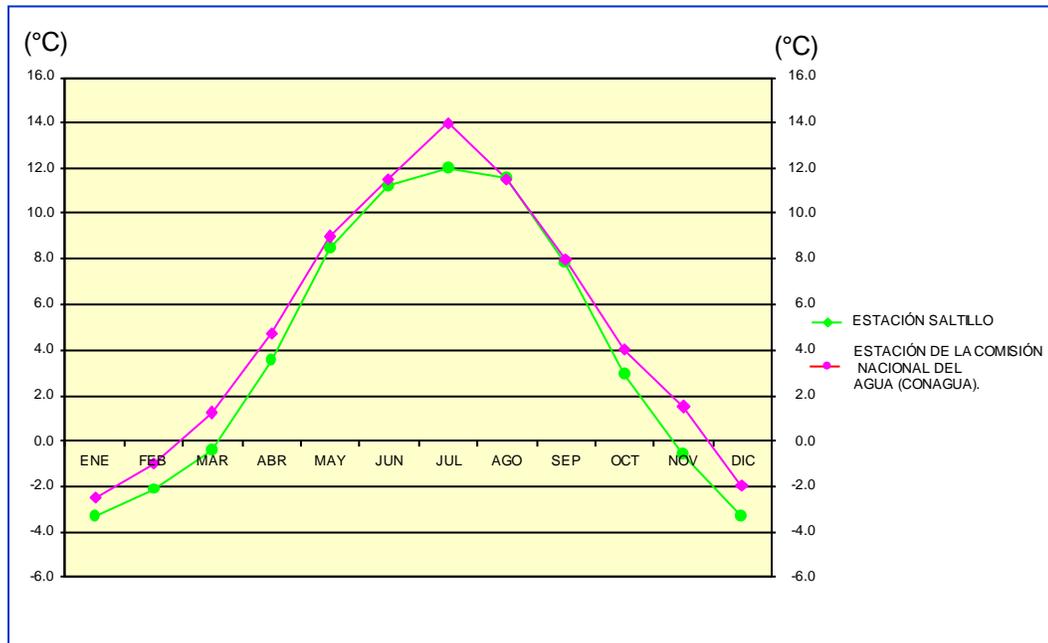


Figura 1.7.- Temperaturas mínimas anuales 2000-2009 de las estaciones Climatológicas Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

I.2.5.- VEGETACIÓN

En cuanto a la vegetación de mayor distribución dentro del área de estudio, corresponden al tipo del matorral desértico. En segundo orden de abundancia se tiene el matorral. En áreas muy restringidas, en las partes topográficamente bajas se tienen agricultura de temporal, pastizal halófilo. En los llanos y bajadas pueden reconocerse gobernadoras (*larrea tridentata*), huizache (*acacia vernicosa*), ocotillo (*fouquieria splendens*), mezquites (*prosopis spp*), gatuño (*mimosa spp*), nopales (*opuntia macrocentra*) y cenizos (*leucophyllum spp*). (Dirección General de Geografía del Territorio Nacional, Carta Estatal de Vegetación Escala 1: 1,000, 000).

I.2.6.- SUELOS

Depósitos más recientes que cubren la superficie se encuentran aflorando en las partes más bajas y planas del área de estudio, provenientes de materiales aluviales que constituyen una delgada capa de limo y arena sin consolidar, de color café claro, ocre y gris amarillento. Con espesor que va de unos cuantos centímetros a 20 m. Los suelos predominantes en el área de estudio son de tres tipos: el primero se localiza en la parte norte y noroeste del área y corresponde a un suelo Litosol, cubriendo la mayor parte del área, el segundo se localiza en la parte centro y oeste del área y se clasifica como Regosol y por último, en la porción este se tiene un suelo de Yermosol. (Dirección General de Geografía del Territorio Nacional, Carta Estatal de Suelos Escala 1: 1,000, 000).

I.2.7.- HIDROLOGÍA

Debido al clima y a la topografía dominante en el área, el desarrollo de la red hidrográfica es muy irregular, mientras que en las zonas de montañas altas se tienen numerosos escurrimientos, en las llanuras y planicies de pendientes suaves las corrientes son escasas siendo de un régimen intermitente.

Es común que el drenaje desarrollado en las serranías, mientras que en las planicies si pierda en cuando llega esto debido principalmente a la gran infiltración en el terreno y por otra parte a que los arroyos en general son de poca profundidad y de distancias muy cortas.

El tipo de drenaje dentro del área de estudio es paralelo y se encuentra distribuido en las sierras altas de fuertes escarpes como la Sierras El Asta, Cerro del Pueblo y Cerro Vega y de pendientes suaves como Loma Risco.

La superficie que cubre el área se ubica en la región hidrológica RH 24 “Bravo - Conchos”, (INEGI: Carta Hidrológica de Aguas Superficiales Monterrey G14- 7, Escala. 1:250,000), dentro del área existen dos corrientes permanentes, en dirección W-E fluye el río Mulato, en dirección SW- SE el río Duraznal. Se consideran de importancia dentro del área de estudio.

I.2.8.- FISIOGRAFÍA

Fisiográficamente el área de estudio queda comprendida dentro de la gran provincia de la Sierra Madre Oriental (SMO), (Raíz E. 1964), (Figura 1.8). Esta es una de las provincias fisiográficas más extensas de la República Mexicana y es parte del cinturón de pliegues y cabalgaduras a lo largo de América, se caracteriza por un conjunto de sierras alargadas y angostas con estrechos valles intermontanos; con una orientación este-oeste con flexiones al suroeste.

Regionalmente en donde se ubica la carta geológica estructural se definen dos elementos morfoestructurales correspondientes a la Sierra Madre Oriental y a la Cuenca de Parras.

La Cuenca de Parras se localiza inmediatamente al norte del sector transversal Torreón - Saltillo – Monterrey de la Sierra Madre Oriental, y al sur de la plataforma de Coahuila es una depresión en la que se depositó una serie de formaciones constituidas por sedimentos siliciclásticos cuyo rango en edad abarca del Cretácico superior al Terciario inferior que constituyen a las formaciones Parras y Grupo Difunta.

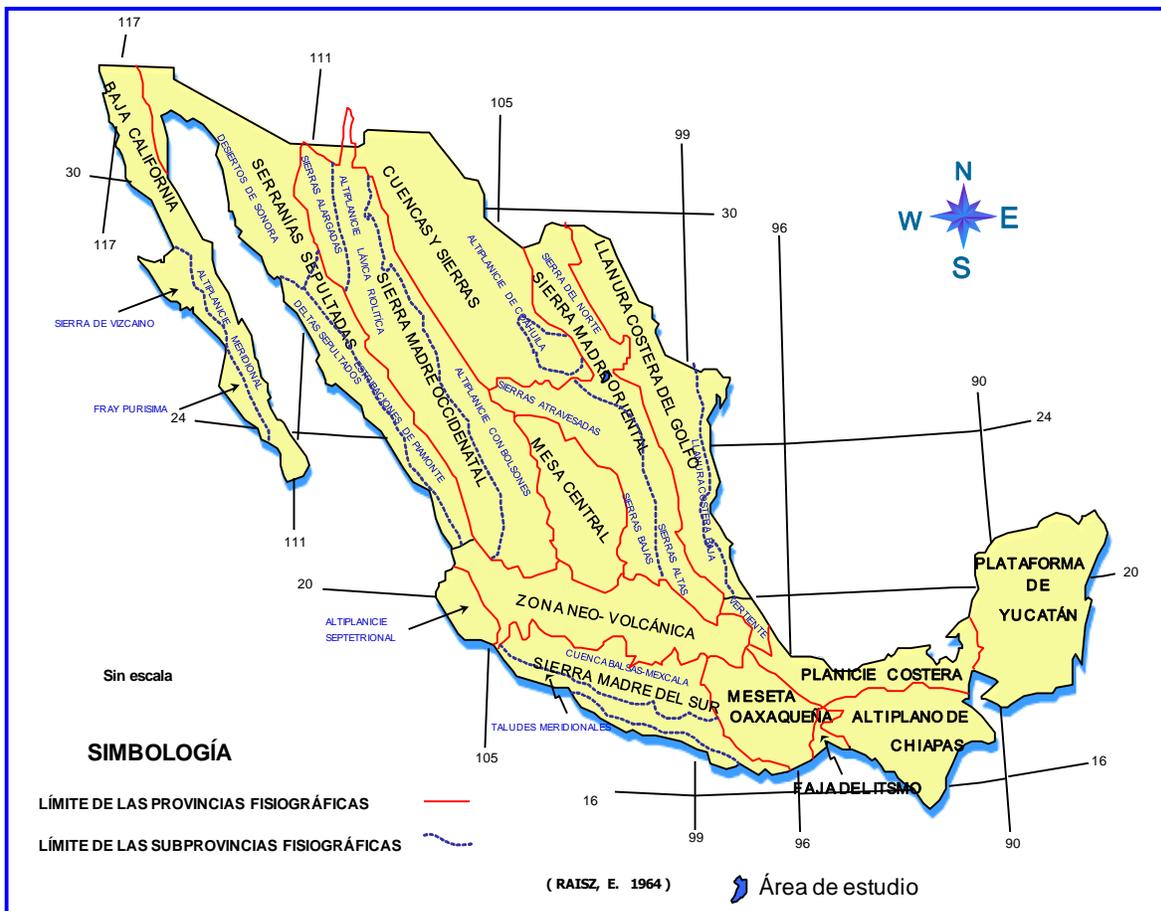


Figura 1.8.- Provincias y subprovincias fisiográficas de México (Raiz, E, 1964).

I.2.9.- GEOMORFOLOGÍA

La morfología se caracteriza como reflejo de las rocas formando un conjunto de sierras bajas, lomeríos y valles alargados con dirección E-W, estructuralmente se forman anticlinales y sinclinales en la misma dirección. En la parte este donde se tiene el valle de Saltillo, aflora esporádicamente la Formación Parras, constituida por lutitas que permiten la existencia de un relieve suave, por su poca resistencia a la erosión, así como la acumulación de algunos espesores relativamente pobres de rellenos en las partes bajas.

Por otra parte al centro, oeste y norte del área, existe una morfología de erosión suave y escarpes abruptos creadas en la Formaciones conocidas como El Grupo Difunda, constituidas por arenisca-lutita.

CAPÍTULO II MARCO GEOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

El área de estudio se localiza al NE de México dentro de la Sierra Madre Oriental (SMO) en su parte marginal. Esta provincia es el resultado de los esfuerzos compresivos de la orogenia Laramide, dando lugar a estructuras generadas por dos fenómenos de deformación. El primero en el Cretácico superior al Eoceno, originando una serie de anticlinales y sinclinales recumbentes en dirección WNW-ESE, que concuerda con el tren estructural de la Sierra Madre Occidental. El segundo por intenso fracturamiento que predomina en las rocas es debido a dichos esfuerzos compresivos (Tardy et al., 1975; Padillas Sánchez, 1978; 1985). Las rocas sedimentarias que afloran en el área abarcan desde el Cretácico Superior, hasta el Cuaternario representados por conglomerados terciarios y sedimentos aluviales.

Las rocas sedimentarias que afloran en el área de estudio abarcan desde Cretácico Superior al Reciente, constituidas por arenisca, lutitas y calizas que conforman el paleoelemento de la cuenca parras que hacia su base aflora una secuencia arcillosa, que alterna con algunas areniscas de estratos delgados, correspondientes a la Formación Parras, mientras que hacia su cima afloran sedimentos siliciclásticos del Grupo Difunta, pudiéndose identificar y diferenciar dentro del área a las formaciones Cerro del Pueblo y Cerro Huerta, que en conjunto están asociadas con sistemas fluvio deltáicos progradantes hacia el noreste. Esta litología que forman estas unidades se consideran de baja permeabilidad, que al estar fuertemente fracturadas generan el medio ideal para la infiltración de los escurrimientos superficiales y lixiviados hacia el agua subterránea.

Los conglomerados, así como los sedimentos aluviales componen al acuífero de poros, cuyo espesor somero y sus propiedades de permeabilidad facilitan la infiltración y el transporte de contaminantes. En el capítulo siguiente se determinará la relación existente entre estas dos unidades acuíferas y la forma en que favorecen la entrada de contaminantes.

II.1.- GEOLOGÍA REGIONAL

Geológicamente el área queda comprendida dentro de lo que se conoce como La Sierra Madre Oriental que es considerada como una cadena montañosa de origen estructural, formados por una serie de plegamientos alargados orientados al NNW-SSE. Es compuesta por una secuencia de rocas carbonatadas y terrígenas del Mesozoico, que fueron plegadas y cabalgadas por los esfuerzos máximos de la Orogenia Laramide durante el Paleoceno tardío-Eoceno temprano (López Ramos, 1980; Padilla y Sánchez. 1985). Ha sido motivo de interés para la realización de diversos trabajos, en los cuales puede consultarse sobre su origen y evolución paleográfica (Padilla Sánchez, 1978; 1985; Meiburg et al., 1987; Michalzik, 1987; Peterson Rodríguez, 1998; 2001; De León-Gutiérrez, 1999 de la Garza-González, 2000) y queda comprendida dentro de lo que se denomina La Cuenca de Parras, cuyas características estratigráficas se incluyen en una serie de formaciones constituidas por sedimentos siliciclásticos cuyo rango en edad abarca del Cretácico Superior al Terciario Inferior y están representada por la formación Lutita Parras que es la base de la columna mientras que hacia su cima afloran sedimentos siliciclásticos del Grupo Difunta, que en conjunto están asociadas con sistemas fluvio deltáicos progradantes hacia el noreste.

El Grupo Difunta, tienen una edad que abarca del Cretácico Superior al Terciario. Ésta ha sido motivo de estudios desde Imlay, R., (1936) quien describió formalmente a esta secuencia, en la localidad de El Pozo Boquillas, en el Cerro Difunta del NW de la Sierra de Parras. Por último en el Cuaternario rellenando los valles y hacia las laderas de las sierras se observa coluviones y aluviones.

II.2.- GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La geología presente en el área, ha sido definida en distintos trabajo, los cuales se han realizado desde un interés regional como provincias geológicas (SPP, 1982; Padilla y Sánchez, 1982; Morán Zentero. 1994; Grubb y Carrillo. 1998).

El área de estudio queda comprendida dentro de lo que se denomina La Cuenca de Parras, constituidas por la formación Lutita Parras que es la base de la columna mientras que hacia su cima afloran sedimentos siliciclásticos del Grupo Difunta y por ultimo hacia el Cuaternario se tienen los depósitos de coluvión y aluvión rellenando los valles (Anexo 1).

Las formaciones que integran el Grupo Difunta, tienen una edad que abarca del Cretácico Superior al Terciario. Éstas han sido motivo de estudios de Imlay, R., (1936) quien describió formalmente a esta secuencia, en la localidad de El Pozo Boquillas, en el Cerro Difunta del NW de la Sierra de Parras. En esa zona sus afloramientos constituyen una columna compuesta con más de 5,000 m. Weidie (1961), Murray (1962) y McBride., et al. (1974), son quienes la subdividen en las formaciones: Cerro del Pueblo, Cerro Huerta, Cañón del Tule, Las Imágenes, Cerro Grande, Las Encinas y Rancho Nuevo. El límite K/T, está entre las formaciones Cerro Grande y Las Encinas. Los autores citados han hecho la consideración de que por estudios de paleocorrientes fueron depositados en una Cuenca de Antepaís, donde los detritos fueron transportados de poniente hacia oriente; en tanto que en la Cuenca de La Popa, el transporte de éstos fue de noreste hacia el sureste. Dentro del área de estudio solo se tienen dos unidades aflorando que pertenecen a lo que se conoce como el Grupo Difunda y son las formaciones Cerro del Pueblo y Cerro Huerta.

El contexto estructural que se presenta en el área, es el resultado de los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide. Los esfuerzos compresivos dieron lugar a estructuras como anticlinales y sinclinales estrechos de orientación NW-SE (Anexo 2). La columna estratigráfica está constituida por rocas sedimentarias, cuyo rango en edad abarca del Cretácico Superior hasta el Cuaternario. Las rocas sedimentarias están compuestas principalmente por lutita, calizas, grava, conglomerado polimíctico, anhidritas y limolitas.

II.3.- ESTRATIGRAFÍA

La columna estratigráfica está constituida por rocas sedimentarias, cuyo rango en edad abarca del Cretácico Superior hasta el Cuaternario. Las rocas sedimentarias están compuestas

principalmente por lutita, calizas, grava, conglomerado polimíctico, anhidrita y limolita. (Figura. II.1). De manera general la geología realizada dentro del área de estudio se efectuó con el apoyo de los siguientes planos, tomado de la cartografía a escala 1:250 000 plasmada por el SGM (Carta Geológico Minera Monterrey, Clave G14-7 escala 1; 250,000, CRM, 1999 y la Carta Ramos Arizpe Clave G14-C24 escala 1: 50: 000 SGM 2008).

II.3.1.- FORMACIÓN PARRAS

Se designa el nombre de Formación Parras, a una masa potente de lutita negra comprendida entre la Formación Indidura y el Grupo Difunta. La localidad tipo está en las lomas de San Pablo aproximadamente a 6.4 km, al oriente de Parras, Coahuila. Su litología está constituida principalmente por lutitas calcáreas de color gris oscuro a negras carbonosas con algunas intercalaciones de areniscas de grano fino en capas delgadas Imlay (1936). En la Cuenca de Parras se reporta un espesor de 1500 m. Weidie y Murray (1961).

El macizo rocoso dentro del área de estudio se compone por lutitas muy alteradas, muy deleznales con intercaladas de areniscas de color gris que intemperisan amarillo ocre a gris verdoso, con vetilleo relleno de calicita de espesores de 1 cm a 6 cm, a rumbo de fractura, el sistema de fracturamiento que presente es alto y la separación entre fractura varían en ocasiones observandose muy continuas y otras ocasiones muy separadas, su rumbo preferencial es NW-SE. Dentro del área solo se localizaron pequeños afloramientos en las partes bajas y en los arroyos localmente se localizan en la parte centro del área de estudio. (Figura II.2).

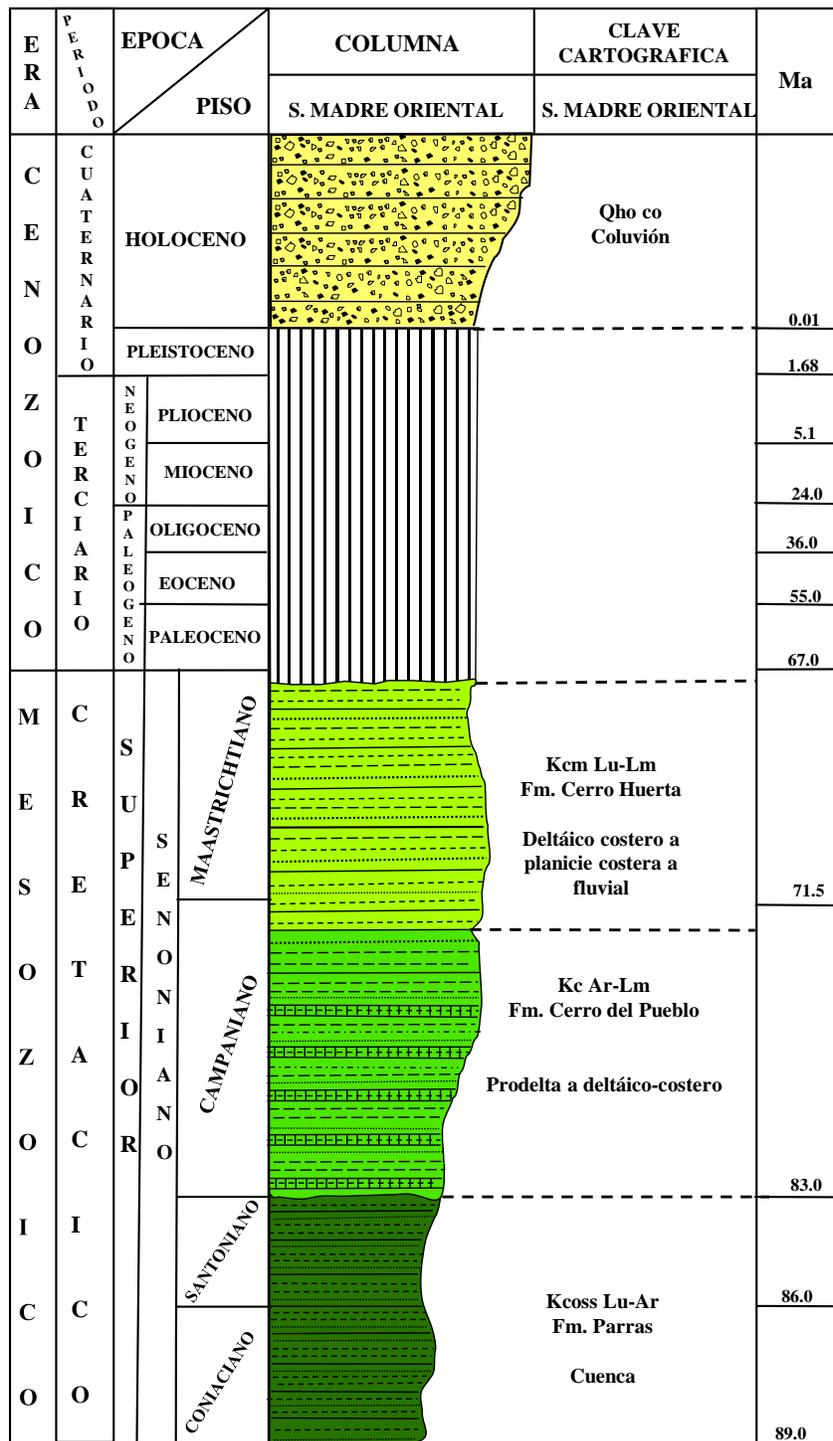


Figura II.1.-. Columna Estratigráfica (basada en información del Servicio Geológico Mexicano 1999 y 2008 .



Figura II.2.- Afloramiento de lutita-arenisca de la Formación Parras, en el arroyo Las Flores. que en el área solo se aprecia en los arroyos, se observa descansando los conglomerados sobre esta unidad .

II.3.2.- GRUPO DIFUNDA (CRETÁCICO SUPERIOR – TERCIARIO EOCENO MEDIO)

Se le asigna el término Grupo Difunta a la descripción de una columna de sedimentos clásticos expuestos en las inmediaciones del pozo Boquillas, Coah. Imlay R. W., (1936). Estudios de detalle posteriores llevados a cabo por Murray, G. E. y colaboradores (1959 y 1962), permitieron diferenciar los horizontes de dicha unidad y por consiguiente la dividen en 7 formaciones, lo cual la eleva al grado de Grupo. McBride., et al. (1974), quienes la subdividen en las formaciones: Cerro del Pueblo, Cerro Huerta, Cañón del Tule, Las Imágenes, Cerro Grande, Las Encinas y Rancho Nuevo. Se ubican entre las formaciones Cerro Grande y Las Encinas. Las localidades tipo de cada una de las formaciones se sitúan en las inmediaciones de

las carreteras Saltillo-Torreón y Saltillo-Monclova, en el límite oriental de la cuenca de Parras y sur de la cuenca de La Popa.

II.3.3.- FORMACIÓN CERRO DEL PUEBLO

Descrita por Murray et al. (1962), su localidad tipo esta al oeste de la carretera Saltillo-Torreón, en las inmediaciones de la ciudad de Saltillo, Coahuila. Su edad es del Campaniano según Imlay (1936, 1937). En las inmediaciones de Saltillo, Coah. Se ha medido un espesor máximo de 500 m. (McBride et al., 1974). Su contenido paleontológico presenta. *Exogyra ponderosa*, *Ostrea sigmoidea*, *sphendiscus lenticulares*, *Ostrea congesta*, *Pholadomya sp.*, *Turritela sp.*, *Inoceramus sp.*, *Monoclonius sp.*, *Trachodon sp.*, *Exogyra costata*, para una edad del Campaniano. La distribución del taxa *Exogyra* documenta la diacronía de la parte basal del Grupo Difunta con la Formación Parras, indicando que la parte basal del grupo es más antigua al oeste. El macizo rocoso dentro del área de estudio está constituido de su base a la cima por arenisca en partes cuarzosa, formando estratos de espesor medio a grueso, masivos de color café rojizo, que presentan laminaciones, estratificación cruzada y ondulada, e incluyen estratos interestratificados de 10 a 30 cm de espesor, con ejemplares fragmentados y completos de exogyras. Con estas se presentan intercalaciones de niveles medianos de lutita limosa, de color gris verdoso, con horizontes bioturbados, con restos de plantas. (Figura II.3).



Figura II.3.- A) Panorámica de la localidad tipo de La Formación Cerro del Pueblo, en su localidad tipo Cerro del Pueblo B) y un acercamiento de su litología arenisca-lutita

En esta misma formación, se identificaron en Rincón Colorado (Fuera del área de estudio), restos de dinosaurios del género Hadrosaurio. Su sistema de fracturamiento es muy semejante al anterior de alto y las extensiones entre fractura varía desde un 1cm hasta 10 cm o más, es frecuente también vetillas remplazadas por calcita de espesores de 2 cm hasta de 15 cm de espesor perpendiculares a la estratificación.

II.3.4.- FORMACIÓN CERRO HUERTA

Descrita por Murray et al. (1962), en el cerro Huerta, a 10 km, al sureste de la ciudad de Saltillo, Coah., y distribuida en la cuenca de Parras. Su litología incluye capas rojas entre las formaciones Cerro del Pueblo y Cañón del Tule. Está compuesta de lutita calcárea, y limolita roja, verde a ocre, con arenisca de grano fino, de color rojo verde y gris. Su edad es del Campaniano al Maastrichtiano. Sin embargo, no han sido encontrados fósiles diagnósticos, solamente *Ostrea oweniana* y *Griphaea mutabilis* (Murray et al., 1960). Por otro lado, contiene restos de plantas, madera, carofitas, y fragmentos de dinosaurios. Su espesor en la sección tipo es de 1040 m, cerca de Saltillo. Sobreyace a la Formación Cerro del Pueblo y subyace a la Formación Cañón del Tule, la base de la Formación Cerro Huerta es de lodolita y limolita que sobreyacen a la limolita masiva de la cima de la Formación Cerro del Pueblo. Hacia la cima se encuentran en contacto con limolita roja y arenisca de la Formación Cañón del Tule.

En el área de estudio se observa una alternancia de ciclos de lutita limosa de color rojizo a café rojizo, con notable bioturbación en algunos niveles, con probables cuerpos de estratificación por deslizamiento (“slumps”). Esta lutita está dispuesta en capas laminares con aspecto masivo, en las que se tienen intervalos foliados; que alternan con cuerpos arenosos constituidos de granos de cuarzo, de color gris claro, lenticulares, con restos de plantas y evidencias de grietas de desecación (Figura II. 4), de color gris amarillento, que llegan a constituir cuerpos masivos de hasta 8 m, en los que se tienen niveles con bioturbación, canales por corte y relleno, estratificación cruzada, laminaciones, rizaduras y truncamientos. Esta secuencia es repetitiva.

En el área se encuentra aflorando en la parte oeste, noroeste y sureste del área de estudio. El sistema de fracturamiento es muy semejante a los anteriores aunque no se aprecia mucho ya que la erosión y alteración la enmascaran y no se logra apreciar.

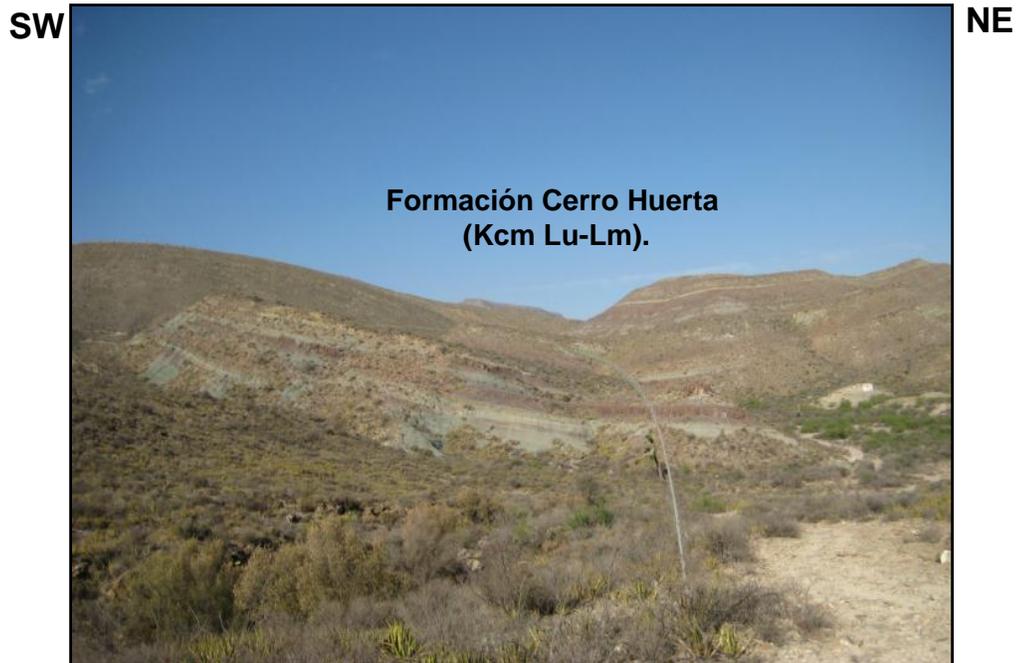


Figura II.4.- Panorámica de una secuencia de lutita, limolita y lechos rojos característicos de la Formación Cerro Huerta

II.3.5.- COLUVIÓN

Son depósitos de materiales producto del intemperismo y la erosión de las rocas persistentes, transportado a través de los cauces o transporte eólico y son considerados como aluviones, coluviones y clastos mal cementados por material calcáreo y arcilloso, formando morfológicamente abanicos o planicies, las que posteriormente se vieron modificadas en distintos niveles como respuesta a un levantamiento de la región por efecto tectónicos, formando las terrazas fluviales que se localizan topográficamente en distintos niveles (Ruiz, 1990).

En el área de estudio, estos materiales se les encuentra descansando discordantemente sobre la Formación Parras, se localizan en forma horizontal aflorando en las partes más bajas

de las sierras y se distribuyen en los valles principalmente, donde se unen los arroyos las Flores y EL Mulato, es común verlos formando lomeríos suaves con espesores de 3 a 12 m. (Figura II.5), en ocasiones formando terrazas aluviales. Estas fueron identificadas mediante los recorridos realizados en campo con base a la literatura relacionada (Ruiz, 1990; Galván-Mancillas, 1996; De La Garza-González, 2000).



Figura II.5- A). Sedimentos aluviales recientes, se encuentran donde se unen los ríos el Mulato y Las Flores. Su espesores son variados de 1 m a 12 m. B) Presentan una intercalación del río con el acuífero de poros.

II.4.- GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Durante los últimos años, el creciente interés en estudiar el movimiento y el transporte de los fluidos y contaminantes a través de medios fracturados, ha originado investigación en diferentes partes del mundo para comprender la ocurrencia de dichos fenómenos. Así como la prevención de la contaminación de las aguas subterráneas (Lee et al., 1998; Akin y Doyuran, 2000).

El transporte de contaminantes en rocas fracturadas se ha convertido en tópico importante para la realización de investigaciones enfocadas principalmente en los posibles contaminantes provenientes de vertederos de residuos sólidos, peligrosos y radiactivos (Lee et al., 1995; Lee y Chang, 1996; Ordling y Roden, 1997; Lin y Lee, 1998; Dahon et al., 1998; Akgün y Doyuran, 2000).

La presencia de fracturas, en especial en aquellas que son abiertas es parte importante en el transporte de contaminantes, ya que pueden generar plumas de contaminación complejas, especialmente heterogéneas y de difícil comprensión (Lee et al., 1995; 1996; 1998; Odling y Roden, 1997).

El flujo a través de las fracturas se ve controlado por su apertura así como la conexión que existe entre estas. Además, la orientación y densidad del fracturamiento puede influir en la distribución de contaminantes (Lee et al., 1995; Lee y Chang, 1996; Odling y Roden, 1997; Lin y Lee, 1998).

El sistema de densidad fracturamiento y el estado apertura que menciona dentro del área de estudio se realizó según la clasificación que hace Barton et al., (1978); (Tabla 1, Figura. 6).

Apertura	Descripción	
<0.1 mm	Muy Cerrada	Cerrado
0.1 – 0.25 mm	Cerrada	
0.25 – 0.5 mm	Parcialmente abierta	
0.5 -2.5 mm	Abierta	Abierto
2.5 – 10 mm	Moderadamente Abierta	
> 10 mm	Muy abierta	
1 -10 cm	Muy amplia	Caverna
10 –100 cm	Extremadamente amplia	
> 1 m	Caverna	

Tabla II. 1.- Descripción de la aperturas en base a su separación (tomadas de Barton et., 1978)

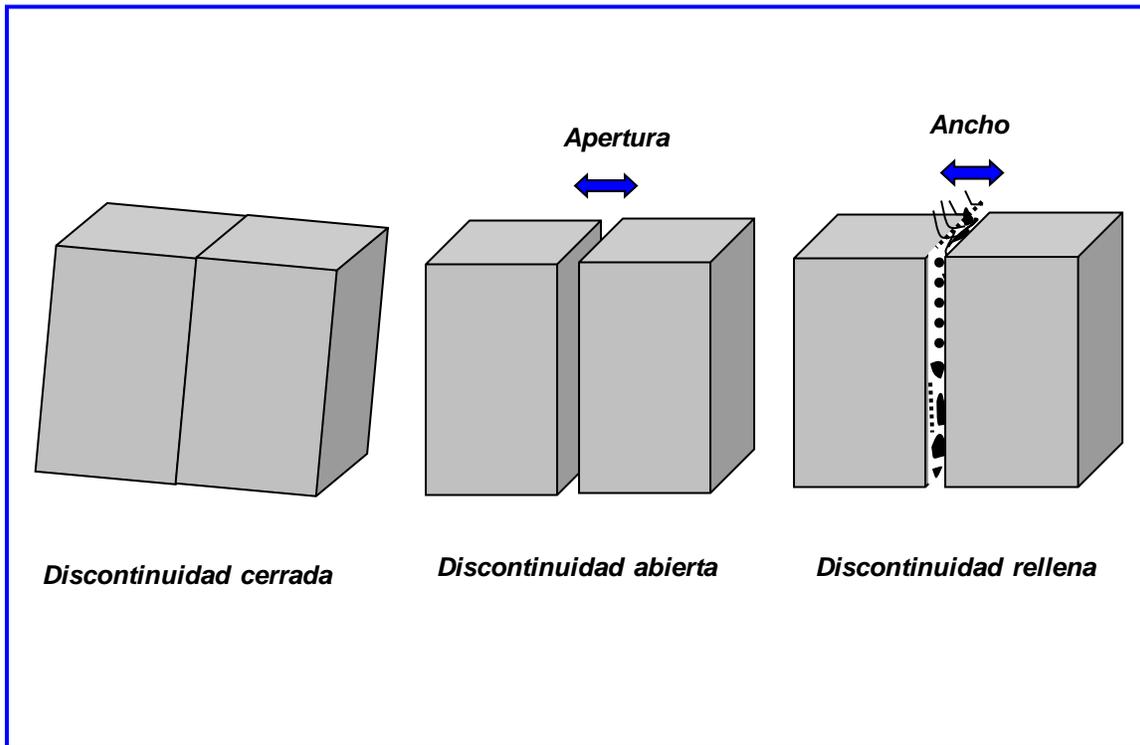


Figura II. 6- Estado de las fracturas cuando estas se encuentran cerradas, abiertas y rellenas (tomado de Barton et al., 1978)

La importancia de realizar el análisis geológico estructural en el macizo rocoso dentro del área de estudio reside en que, entre las principales fuentes de contaminación identificadas en el área, se localizan en la parte centro-este y norte, se encuentra el relleno municipal, además una serie de norias y pozos al descubierto. Dichas fuentes de contaminación se ubican directamente sobre el macizo rocoso, de ahí el interés de analizar si existe relación entre las condiciones estructurales del área con la infiltración, así como el transporte de lixiviados hacia el agua subterránea y sus direcciones de flujo.

La metodología de trabajo consistió en localizar los afloramientos que permitieran la medición de elementos tectónicos (diaclasas, fallas, ejes de pliegues). Las mediciones fueron realizadas empleando la brújula Brunton y los datos fueron almacenados para posteriormente ser analizados.

Una vez ejecutado la toma de los datos y la geología realizada se procedió al análisis geológico/estructural, mediante el programa Stereonet, mismo que se representa en los distintos estereogramas (diagramas de Schmidt) en la carta geológica-estructural (anexo 1).

Con la interpretación, se definirán los principales sistemas de fracturamiento, así como la relación que guardan la infiltración, el transporte de escurrimiento y contaminantes hacia el acuífero. Se aprecia una orientación preferente de los sistemas de fracturamiento en dirección NW-SE, con direcciones perpendiculares y diagonales al sentido de la estratificación, este tipo de orientación se puede considerar que no es favorable al transporte de la contaminación, en cambio los sistemas con dirección NE-SW pudieran considerar de más riesgo ya que coinciden con la dirección del flujo superficial y subterráneo.

Los afloramientos medidos se distribuyeron de tal forma en que las estructuras representaran o reflejaran si eran conductos que transportaran los contaminantes hacia los acuíferos y se dividieron en la siguiente forma.

- Las estaciones 1 y 2 marcadas en los diagramas de Schmidt, se localizan hacia la parte noroeste del relleno y al sur del anticlinal los mulatos (Anexo 1). La importancia en el análisis del fracturamiento en esta zona tiene su origen en que las estaciones se encuentran casi directo con el relleno sanitario al descubierto por la ausencia de las geomembranas, pudiendo facilitar la infiltración de lixiviados hacia el subsuelo. Aunque la baja permeabilidad de estas rocas podría servir como capa confinante, el denso fracturamiento e intemperismo facilitan la infiltración al subsuelo de los escurrimientos superficiales producto de las precipitaciones, los que al entrar en contacto con los residuos sólidos ahí depositados generen lixiviados que se infiltren hacia el agua subterránea.

En esta área se observan areniscas intercaladas con lutitas fracturadas e intemperizadas, con espesores que varían de laminares a estratos de 0.5 m. Las fracturas se encuentran distribuido ampliamente, en ocasiones se encuentran remplazadas por calcita y otras totalmente abiertas. La dirección general del sistema de fracturamiento se orienta NW-SE, y de menor intensidad NE-SW, donde pudieran cruzar estas fracturas permitirían el transporte a

los lixiviados hacia el agua subterránea, siempre y cuando el sistema de fracturamiento se encuentre abierto.

- La estación 3 marcada en el diagrama de Schmidt. Esta se localiza en el extremo contrario de las anteriores, hacia la parte sur del relleno sanitario, (Anexo 1). Donde se realizó este fracturamiento fue en un cerro de areniscas, lutitas y aguas abajo, existen manantiales con agua todo el año. El análisis en esta área se toma con la finalidad de determinar si existiera una relación con los escurrimientos del manantial y que pudieran facilitar el transporte de los lixiviados hacia el agua subterránea. Aquí la densidad del fracturamiento es amplia y escasamente se observa abierta, la dirección es variable de NW-SE y otro NE-SW, este último pudiera estar asociado con el flujo del agua superficial ya que conservan la misma dirección y permitirían la infiltración de los lixiviados hacia el agua subterránea. La densidad del fracturamiento de esta estación y de las anteriores se considera homogéneo de 4 a 8 fracturas por m y la apertura entre ellas es de 0.1 mm hasta 10 cm, las de mayor apertura es común verlas remplazadas por calcita, estas fueron tomadas en areniscas intercaladas con lutitas de la Formación Cerro del Pueblo.

- Las estaciones 4 y 5 marcadas en los diagramas de Schmidt, se localizan hacia la parte noreste del relleno sanitario, al sur del anticlinal los mulatos y aguas abajo del relleno (Anexo 1). Ésta se hizo con el fin de determinar si el sistema de fracturamiento tomado en las demás estaciones conserven la misma dirección. Se observa que las direcciones son homogéneas mencionadas anteriormente, con direcciones predominantes NW-SE y de menor cantidad de NE-SW, que si estas últimas su dirección pudieran estar conectadas con las anteriores y tener una relación con los lixiviados hacia el subsuelo, existiera una mayor facilidad en el transporte de contaminantes. Donde se tomaron estas fracturas existen pozos, norias y papalotes, de estos se tomaron muestras con el fin de análisis y ver si existir relación entre las fracturas y el transporte de los contaminantes y a su vez considerarse como puntos o focos de contaminación y así tener un mejor control sobre los pozos. La densidad del fracturamiento en estos puntos se considera de un promedio de 4 a 7 por metro y de 0.25 mm a 6 cm. Tomadas en lutitas muy alteradas y fracturadas de la Formación Parras.

II.4.1.- DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DEL FRACTURAMIENTO

El macizo rocoso se considera como una roca impermeable, pero dada las condiciones del fracturamiento que presenta facilita la infiltración y el flujo del agua subterránea. Las fracturas que presentan apertura entre ellas pueden aumentar el flujo, mientras que otras están rellenas por calita y otras por cuarzo, forman barreras que impidan la infiltración (Odling y Rodan, 1997) (Figura 7).



Figura II.7- Fracturas rellenas de calcita en la litología de La Formación Cerro del Pueblo, que forman barreras que impiden la infiltración, hacia el manto acuífero.

En el área de estudio, las zonas de mayor interés dentro del análisis estructural es la estación 3 localizada al sur del relleno municipal. La densidad del fracturamiento de esta estación y de las anteriores se considera homogéneo de 4 a 8 fracturas por m y la apertura entre ellas es de 0.1 mm hasta 10 cm. Según la clasificación que hace Barton et al., (1978). Las de mayor apertura es común verlas remplazadas por calcita, estas fueron tomadas en areniscas intercaladas con lutitas de la Formación Cerro del Pueblo.

En los recorridos y toma de datos estructurales que se realizaron en el área de estudio, se puede observar que se manifiestan dos sistemas de fracturamiento. El primero con un rumbo NW-SE con mayor intensidad y es frecuente encontrarlo relleno de calcita, el segundo NE-SW con menos intensidad; existen otros pero son de menor intensidad y se pueden considerar más jóvenes ya que se aprecia como cortan a los existentes. También se pudo observar que la densidad del fracturamiento es muy constante dentro del área de estudio, mientras que la apertura entre fracturas es muy variable, siendo sus valores desde <1 mm hasta 20 cm de separación. Según la clasificación que hace Barton et al., (1978), por la apertura que presentan las fracturas pueden considerarse como abiertas y extremadamente amplias, facilitando la infiltración de los escurrimientos hacia el acuífero (Tabla 1, Figura.6). Gran cantidad de estas fracturas se encuentran rellenas de calcita, formando una barrera impermeable (Figura 8).



Figura II.8.- Rocas fracturadas directamente en contacto con los residuos sólidos. El sistema de fracturas al descubierto por la ausencia de geomembranas facilitando la infiltración de lixiviados hacia el subsuelo. En esta zona el nivel freático en esta área se localiza a 18 m de profundidad.

El buzamiento promedio de la fracturas varía entre 75° y 85° . La (Figura. II.9). Muestra el sistema de fracturamiento general y se aprecian dos sistemas predominantes: Uno con dirección general NE-SE, el segundo con dirección NE-SW este último se pudiera considerar de más riesgo ya que coinciden con la dirección del flujo superficial y subterráneo y tener una relación con la lixiviación hacia el subsuelo y una mayor facilidad en el transporte de contaminantes.

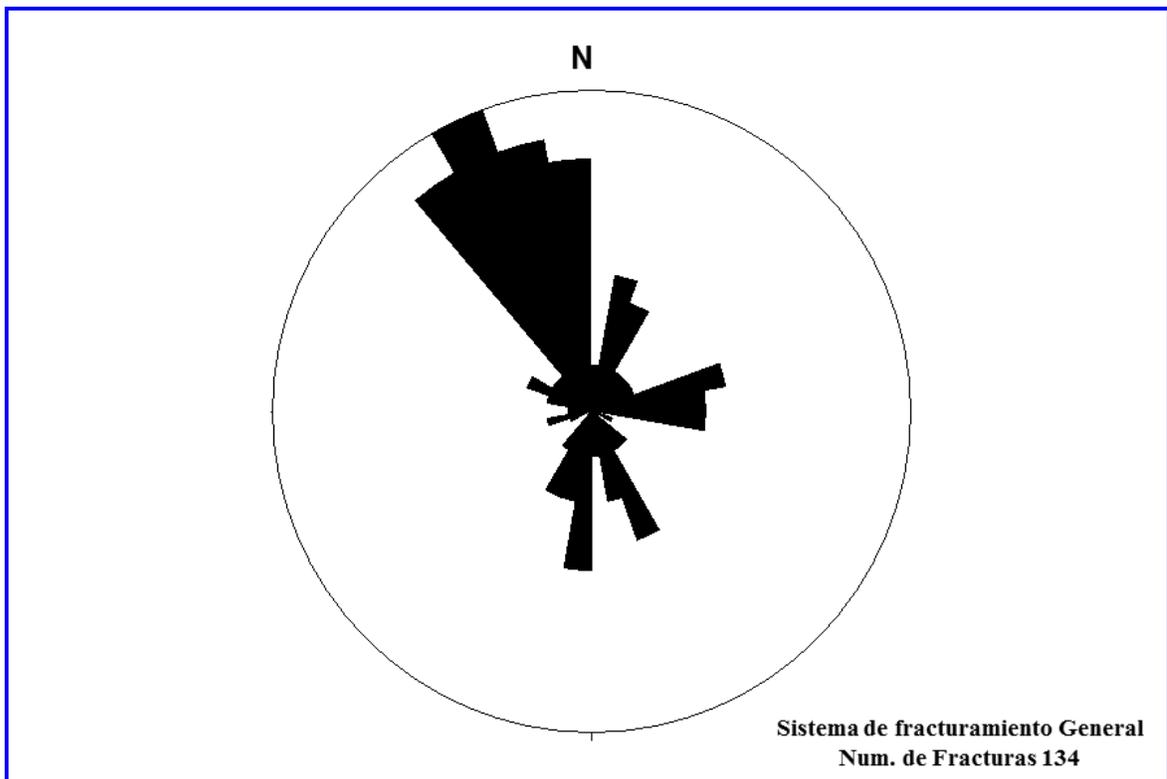


Figura II .9 .- Sistema de fracturamiento general predominante en el área de estudio

CAPÍTULO III MARCO HIDROGEOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

La estimación de los recursos del agua subterránea, su comportamiento hidrodinámico y su disponibilidad para cubrir las necesidades de una población, deben formar parte esencial en la planeación de la administración actual y futuro hidrológicos de la zona. La presencia de asentamientos humanos en áreas donde la situación del medio geológico, el tipo de acuífero, la profundidad del agua subterránea y el uso del suelo se combinan y contribuyen a la alteración de la calidad del agua.

Los acuíferos en el área de estudio son sometidos a presiones antropogénicas (fosas sépticas, letrinas, relleno municipal y zonas agrícolas). Estas presiones se ven influenciadas temporalmente, ya que la composición química del agua varía de acuerdo a los períodos de máxima y mínima precipitación ocurridas durante el año. Además la transición de un medio acuífero de grietas a un medio acuíferos de poros cuya zona no saturada es de espesor somero y con propiedad alta, sugiere condiciones de vulnerabilidad en la calidad de agua.

Una instrumento importante para la preservación de los acuíferos, consiste en la implementación de redes de monitoreo que permitan un mejor control y la observación de la fuente de contaminación potencial (Melloul) y Collin, 1998; Granel et al., 1999; Mahar y Datta, 2000). A través de ellos se obtiene bases de datos que contribuyen e identificar áreas de vulnerabilidad y mantener un control de dichas fuentes potenciales (Vrba y Zaporozec, 1994; González et al., 1997; Hsu, 1998; Melloul y Collin, 1988; Sidauruk et al., 1998; Gonzáles et al., 1999).

Para la relación entre textura y porosidad de las rocas se realizó en base a la clasificación de (Davis & De Wiest 1971), (Figura III.1) y para determinar la dirección principal del flujo es difícil, ya que generalmente presentan variaciones, las cuales pueden deberse a que las fracturas estén interconectadas y desvían los caminos principales (Werner 1996), (Figura III.2).

Por otra parte, con campañas de muestreos y con la información obtenidas se realizan análisis geoestadísticos mediante el manejo de los datos y la evaluación de la contaminación en los acuíferos (Istok y Rautman, 1996; Ting et al., 1998; Christensen et al., 1998).

En el presente capítulo se evalúan las condiciones hidrogeológicas y la relación que guarda el nivel freático con los períodos de sequía y de recarga en su configuración piezométrica. Mediante el análisis del muestreo del nivel del agua se pretende conocer la influencia de las actividades urbanas sobre la reacción que tienen los acuíferos para atenuar su posible contaminación.

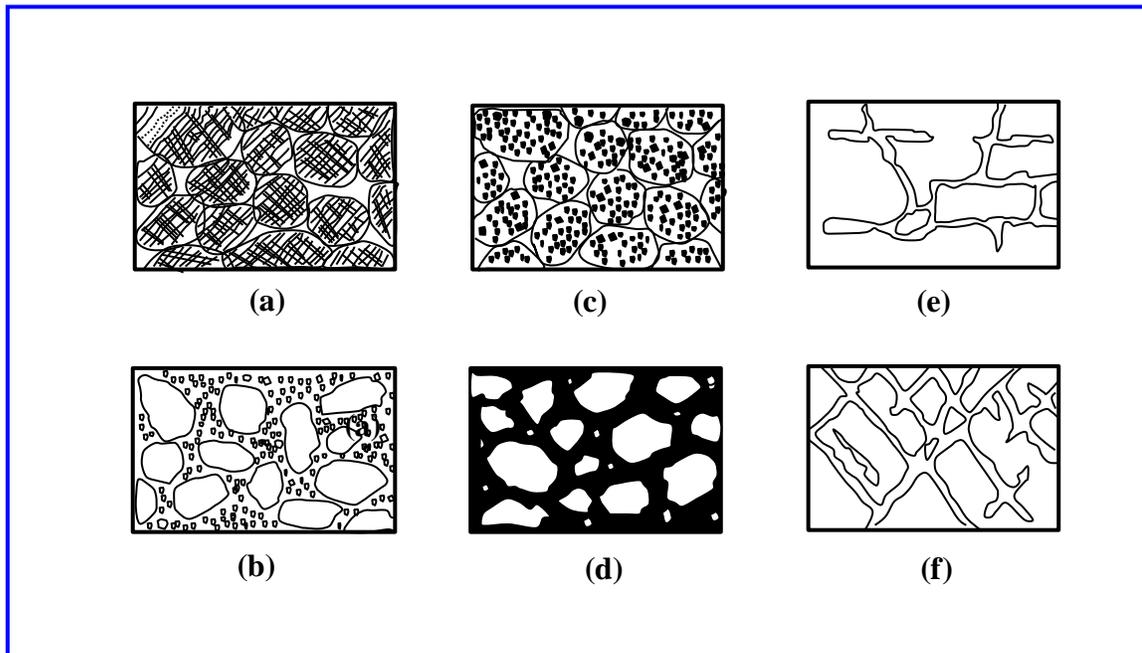


Figura III. 1.- Tipos de intersticios y relación entre textura y la porosidad de las rocas. (a) Elementos de tamaño uniforme; porosidad alta. (b) Elementos homogéneos; baja porosidad, (c) Cantos rodados porosos heterogéneos; porosidad muy alta. (d) La porosidad ha disminuido por compactación de los intersticios con material fino. (e) La porosidad de las rocas se debe a la disolución. (f) Rocas Porosas por fracturación (Davis & De Wiest (1971).

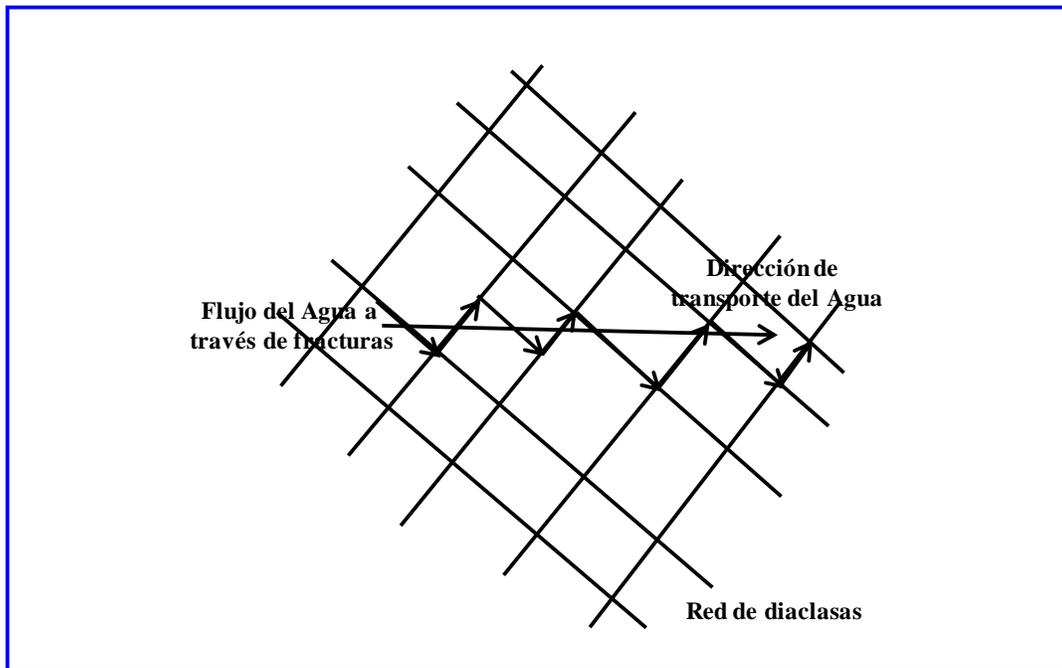


Figura III. 2- Camino local del agua a través de las fracturas abiertas (flechas pequeñas). La línea punteada indica la dirección del agua subterránea (Werner 1996)

III.1. – METODOLOGÍA

Se llevó a cabo el muestreo en diferentes aprovechamientos hidráulicos (pozos, norias y ríos), registrando la siguiente información de cada uno de ellos: clave, tipo de aprovechamiento, localización, elevación del terreno, profundidad del nivel freático, nivel piezométrico y litología. El estudio fue realizado el 29 de abril del 2010, en un periodo de ausencia de precipitación que pudieran originar variaciones en el nivel freático y conducir a errores en su interpretación. La medición del nivel freático se realizó con el empleo de una sonda sonora marca solinst (50 m de longitud). La localización de los aprovechamientos hidráulicos se ejecutó con el empleo de un Gps marca Garmin, altímetro digital, y un peachímetro (Figura III.3). La campaña de medición fue realizada en un solo día, observando que las condiciones climatológicas fueran estables y que todos los niveles medidos fueran estáticos. La representación de la información realizada se plasmó en la carta Hidrogeológica (anexo 3).

Se efectuó el muestreo realizado por Aguas de saltillo, para observar las variaciones en el nivel piezométrico, su relación con los cambios espacio/temporales y con la concentración de los parámetros hidrogeoquímicos.

Mediante las observaciones directas también se identificaron el uso del suelo y el tipo de consumo del agua extraída, factores importantes para determinar las condiciones de vulnerabilidad que presenta el acuífero, sobre todo en las zonas donde se localiza las principales fuentes de contaminación.

Con la información y mediciones obtenidas del nivel piezométrico y los datos realizados durante el período de estudio son los que se consideraron para el análisis de la vulnerabilidad del acuífero.



Figura III.3. Equipo empleado para llevar a cabo el censo de los aprovechamientos hidráulicos del área de estudio (A) GPS, B) alfiler C) sonda sonora y D) Peachímetro.

III.2. - PIEZOMETRÍA

Con base a la información generada y obtenida durante la realización de toma de muestreo se realizó el plano piezométrico (Anexo 3). Se seleccionaron pozos que son representativos para la elaboración de la carta hidrogeológica. Cuyo principal objetivo consiste en representar la configuración espacial del nivel piezométrico del acuífero, localizar los aprovechamientos hidráulicos que sirvan como puntos de observación, identificar la dirección principal del flujo subterráneo, el gradiente hidráulico, condiciones de permeabilidad del acuífero, así como el reconocimiento de los posibles caminos de transporte de contaminantes.

La construcción de la carta hidrogeológica se realiza mediante método del triángulo hidrológico, que consiste en la interpolación líneal de los niveles piezométricos, entre dos puntos de diferente elevación que se van ligando con puntos adyacentes, lo que permite el trazo de curvas piezométricas. Esta piezometría también se realizó con el programa software Surfer, que realiza lo mismos pasos a los explicado anteriormente y sirve para tener mayor confiabilidad en su representación. Para el caso del presente estudio, las curvas piezométricas, equidistantes se trazaron a cada 5 m. La carta hidrogeológica fue realizada también de forma manual. La digitalización de la carta fue realizada utilizando el Software Arcmap.

III.3. – SISTEMA HIDROGEOLÓGICO

Un acuífero se define como una unidad geológica saturada permeable, que puede transmitir cantidades importantes de agua bajo gradientes hidráulicos ordinarios (Davis y De Wiest, 1971; Freeze y Cherry, 1979; Custodio y Llamas, 1996; Werner, 1996)

El área de estudio se localiza en zonas lomeríos que conforman un valle considerando zonas de descargue conocida como la Cuenca Saltillo-Ramos Arizpe Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en donde las principales fuentes de aportación hacia el acuífero están constituidas por flujos subterráneos y el escaso flujo superficial formado por ríos. En área de estudio se apreciaron los río Mulato y el río Duraznal, ambos ríos presentan una directa conexión, además existen escurrimientos secundarios, precipitaciones periódicas ocurridas

durante el año, así como el uso del suelo, que contribuye también a su descarga. La dirección del flujo de las corrientes superficiales es denominada por la topografía del terreno, cuya dirección general es de SW- SE y la orientación del flujo del agua subterránea es definida por el gradiente hidráulico en la misma dirección (anexo 2).

III.3.1.- UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

El área de estudio se localiza dentro de lo que se conoce como, acuífero Saltillo-Ramos, considerada como un acuífero de descarga, donde las principales fuentes de aportación hacia el acuífero, están constituidas por el flujo subterráneo y el flujo superficial formado por escurrimientos producto de precipitaciones periódicas ocurridas durante el año, así como el uso del suelo, que contribuye también a su descarga (anexo 3).

Rocas permeables de bajo rendimiento.- corresponden a lutita de la Formación Parras, arenisca-lutita del Grupo Difunda, las cuales presentan horizontes fracturados que permiten la infiltración y circulación de agua en el subsuelo. Su litología ocasiona que la permeabilidad se genere reducida, además de irregular, ya que varía tanto horizontal como verticalmente. Los Pozos de esta área y en esta unidad rinden caudales promedio de 5 a 9 lps.

III.3.2 – ACUÍFEROS DE POROS

El tipo de acuíferos que se definieron en el área de estudio, se consideró como un acuífero de poros de un espesor de 16 m. Estos tipos de acuíferos por lo general son de poca profundidad y se encuentran distribuidos a través de las terrazas donde se unen los arroyos Flores y el Mulato (Figura III.4).

Son varios los aprovechamientos hidráulicos observados que se localizan dentro de esta zona y la profundidad del nivel freático varía también de acuerdo a las condiciones topográficas.



Figura III.4.- Tipo de litología que se observa en el acuífero que lo conforman arcillas-limos y conglomerados mal cementados con gravas-boleos y material arcillosos.

III.3.3.- ACUÍFEROS DE GRIETAS

Existe una transición entre al acuífero de grietas el que puede observarse en los aprovechamientos hidráulicos localizados en el área de lomeríos Altamira y Las Flores. Estos aprovechamientos indican que el agua es transportada a través de sus fracturas (Anexo 4). Los valores del nivel freático en estos aprovechamientos varían desde 10 m (NF) hasta 29.48 m (RC) en su parte más profunda. La influencia que ejercen las condiciones tectónicas sobre el comportamiento general del acuífero de fracturas tiene su importancia también a que el alto grado de intemperismo de la roca, la profundidad del nivel freático y el transporte de los lixiviados que se pudiera generar en las distintas fuentes de contaminación cercanas a un futuro no lejano.

III.3.4 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LA PIEZOMETRÍA

El agua subterránea se encuentra en su mayor parte dentro de un medio poroso, donde el gradiente hidráulico varía entre 0.74 y 0.93%. La configuración de las curvas piezométricas permite suponer que la permeabilidad del medio es alta. Las zonas saturadas del acuífero compuestas por conglomerados y sedimentos finos permeables, así como el nivel freático somero, presentan el medio ideal para la infiltración y el transporte del agua subterránea ya que están semi-consolidados y no consolidados, permitiendo también mayor velocidad de transporte entre sus poros. Estos tipos de acuíferos posee buenas condiciones de recarga, buena permeabilidad y por lo tanto producen buenos caudales de explotación (Custodio y Llamas, 1996).

La orientación general del flujo subterráneo es SW-NE Y SW-E, similar a la dirección que presenta el acuífero regional (Saltillo-Ramos). El flujo es casi paralelo al drenaje superficial, mismos que recargan al acuífero. El movimiento de agua subterránea y su velocidad son definidos por el grado de cementación de los granos, así como por la distribución de su tamaño (Davis & De Wiest 1971).

El agua subterránea dentro del acuífero de grietas se transporta a través de sus fracturas (anexos 3). La matriz de la roca tiene permeabilidad primaria muy baja, sin embargo, las discontinuidades geológico-tectónicas contribuyen al aumento de permeabilidad secundaria a través de ellas la capacidad de conducir el agua depende a su vez de la densidad del fracturamiento y la apertura existente entre fracturas (Werner, 1996).

El gradiente hidráulico aumenta respecto a la zona del acuífero de poros, el cual varía entre 1.4 y 1.8%, indicando zonas con menor permeabilidad. Cuando estas discontinuidades estén abiertas, pueden contribuir a un transporte rápido de fluido y contaminantes hacia el subsuelo (Lee. Et al., 1996). El efecto hidráulico de grietas cerradas o rellenadas con precipitaciones de calcita o sustancias arcillosas es muy reducida, sin embargo el acuífero de grietas presenta un intenso fracturamiento. Las fracturas abiertas se presentan en densidades

abundantes, lo cual aumenta la permeabilidad de la roca. El determinar la dirección principal del flujo es difícil, ya que generalmente presentan variaciones, las cuales pueden deberse a que las fracturas estén interconectadas y desvían los caminos principales (Werner 1996), o cuando no exista saturación en la matriz de roca y está almacenada agua entre sus poros (Dahan et al., 1998).

Dentro de la bibliografía que se recopiló, de algunos autores (Freeze y Cherry, 1979;) Custodio y Llamas, 1996; Werner, 1996), proponen valores de parámetros hidráulicos para determinar las condiciones hidrodinámicas que presenta el acuífero. Dentro de esta área de estudio no fue posible determinar las condiciones hidrodinámicas ya que no existe información que nos permita realizar un análisis hidrodinámico dentro del área de estudio.

Dado que se carecía de información útil, con la recopilación de los datos en las fuentes antes mencionadas, para realizar una sobrevista de posible comportamiento del medio acuífero (tanto fracturado como poroso) en la zona (Tabla III.1).

Custodio y Llamas (1996)		Werner (1996)		Freeze y Cherry (1979)		
Porosidad eficaz (%)		Permeabilidad			Cond.Hidrául.(k)	Permeab. (K)
Areniscas	20-10	Gravas	0.5-30m/día	Areniscas	10 ⁻¹⁰ -10 ⁻¹³	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁸
Aluvión	35-5			Gravas	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸	1-10 ⁻¹
Gravas	35-15			Arenas	10 ⁻³ -10 ⁻⁶	10 ² -10 ⁻¹
Arenas	35-10	Arenas	0.1-1m/día	Porosidad (%)		
Limos	20-2			Areniscas	5-30	
Porosidad eficaz (m/día)				Gravas	25-40	
Areniscas	10 ⁻³ -10 ⁻⁸	Grietas	10.150m/h	Arenas	25-50	
				Limos	35-50	

Tabla III. 1.- Parámetros hidrodinámicos en diferentes medios acuíferos (Citados por algunos autores)

CAPÍTULO IV MARCO HIDROGEOQUÍMICO

INTRODUCCIÓN

La Hidrogeoquímica es la ciencia que se encarga de estudiar los comportamientos químicos de las aguas subterráneas. Las investigaciones hidrogeoquímicas proporcionan conocimientos acerca del origen de las aguas subterráneas y ayudan a entender el funcionamiento del sistema del flujo de las mismas. Algunos constituyentes o especies químicas determinadas pueden indicar la presencia de yacimientos minerales (WERNER, 1996)

La ciencia que se ocupa del estudio de las alteraciones de la calidad química de las aguas subterráneas, causadas por actividades del hombre (contaminación, cargas antropogénicas), es conocida como Hidrogeología Aplicada o Hidrogeología Ambiental (WERNER, 1996).

El agua se compone por diversas concentraciones de sustancias sólidas disueltas, las cuales son agregadas a ésta cuando se encuentra fluyendo a través de un medio rocosos. La composición del agua puede ser muy variada, puede ser mineralizada obteniendo las características químicas de las rocas que se mueve ya sea de manera superficial o subterránea. (WERNER, 1996).

Estudios realizados por Van den Brink y Zaadnoordjik (1996), Soliman et al. (1998) y Abu-Rukah, Al Kofahi (2001) y Lizárraga Mendiola L.G (2003) indican sobre presencia de vertederos no controlados que amenazan la calidad del agua superficial y subterránea.

El problema asociado a este tipo de sitios es la rápida urbanización en sus cercanías, ya que su principal amenaza la constituyen los materiales químicos peligrosos contenidos en los residuos sólidos depositados sin ninguna restricción, ya que al ser movilizados por medio de la infiltración en forma de lixiviación, Lizárraga Mendiola L.G (2003).

La agricultura también origina efectos negativos directos como son la disolución y el transporte de fertilizantes y abonos. El principal y más común de los contaminantes que se adicionan durante práctica agrícolas es el nitrato. Sin embargo, además de estos se agregan también iones tales como Cl^- , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , PO_4^{3-} y SO_4^{2-} (Böhlke, 2002).

Algunas partículas del uso del suelo son capaces de causar una serie de contaminación difusa de las aguas subterráneas, por nutrientes y/o pesticidas, especialmente en áreas con poco espesor, de buen drenaje y/o textura arenosa (Foster et al, 1986).

En el área de estudio se localizan diversas fuentes que pudieran contribuir a la afectación de la calidad del agua subterránea, por lo que se pudiera considerarse que tanto la preservación como la vulnerabilidad están estrechamente relacionadas con el uso y manejo del suelo. Las condiciones del medio geológico que interactúan con el agua subterránea están asociados con la afectación de su calidad, debido a la presencia del macizo rocosos muy fracturado en contacto directo con fuentes de contaminación (en caso del estudio se puede mencionar el relleno municipal, y granjas agrícolas), así como la presencia de sedimentos granulares permeables que forman el medio acuífero, en norias al descubierto cercanas al relleno.

Dentro de esta área no existen estudio que hayan detectado la presencia de contaminantes, pero dadas las condiciones donde se ubica, existe la posibilidad de que presente contaminación.

En la actualidad, y por cuestiones administrativas los organismos responsables del suministro de agua potable y de calidad de la misma en la ciudad de Saltillo son la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Aguas de Saltillo (AGSAL). Que son los que realizan monitoreo y analizan los químicos para el control de la calidad del agua, hasta la fecha se investigó en las instituciones mencionadas que si se tenían alguna manifestación de presencia de contaminantes, desconociéndose la presencia de contaminantes. Algunas de estas fuentes son utilizadas para el consumo humano, mientras que otras solo satisfacen necesidades agropecuarias o se encuentran sin explotar.

Por consiguiente, en el presente capítulo se evalúan los resultados obtenidos de los análisis químicos, bacteriológicos, así como los análisis de metales pesados realizados, como apoyo obtenido del laboratorio de Comimsa S.A. de C.V. y Cinvestav-Saltillo.

Se realizó un segundo muestreo con el fin de complementar los resultados, por los elementos que a continuación se mencionan: Nitratos (NO_3^-), Amonio (NH_4^+), Potencial Redox (Eh), Fosfatos (PO_4^{3-}) y bacteriológicos y se obtuvo recopilación de información de muestreo de análisis químicos realizados anteriormente por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Este nos permite determinar variaciones espacio/tiempo que permitan identificar las zonas de mayor influencia antropogénica sobre la calidad del agua subterránea en el área, evaluar las condiciones actuales de la calidad del agua e identificar cuáles son las zonas altamente vulnerables a la afectación del agua y la salud humana y/o animal.

IV.1 METODOLOGÍA

Para los trabajos desarrollados en la hidrogeoquímica se realizaron las siguientes fases:

- Muestreo de campo y análisis en laboratorio
- Evaluación de las condiciones de calidad del agua

Campo y laboratorio

En las primeras etapas para del muestro, se realizó la localización de los pozos existentes en el área de estudio, se solicitó el permiso en los ejidos y a dueños particulares, una vez obtenido éste se procede a la toma de muestreo de aguas.

Las actividades para la toma de muestreo se realizaron en una campaña de un día, siempre y cuando las condiciones climáticas fueran estables con ausencia de precipitación, se realizó la selección de siete puntos, este muestreo se llevó a cabo en lugares estratégicos, tomando en cuenta factores como la explotación del agua potable para los usos: doméstico, ganadero, riego, así como también fueron seleccionados por estar cercanos a las principales fuentes de contaminación y por no tener un estudio de análisis de muestreo por las instituciones antes mencionadas encargadas de llevar a cabo estas actividades.

Al momento de extraer la muestra se envasaron en recipientes de dos litros, se realizó la medición de los parámetros físicos pH, conductividad eléctrica y temperatura. (Figura IV.1). Dada la cercanía del área de estudio a los laboratorios de las instalaciones de COMIMSA S.A. de C.V. y Cinestav-Salttillo no se requirió material de preparación para la conservación de la muestra, para realizar los análisis químicos y bacteriológicos en el laboratorio de COMIMSA S.A. de C.V., y para los análisis de metales pesados en los laboratorios de Cinestav-Salttillo. El segundo muestreo se realizó bajo las mismas condiciones y fueron llevados al laboratorio de la Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L, donde se analizaron el Nitrógeno como NO_3^- y Magnesio por el método de AAS, y en el Laboratorio ALS INDEQUIM S.A.de C.V. de Monterrey N.L. Se analizaron fosfatos totales y nitrógeno amoniacal y por último para análisis bacteriológicos, se analizaron en el Laboratorio de Análisis Clínicos e Industriales en la ciudad de Linares N.L. Los resultados obtenidos se indican en el (anexo 4) y la distribución de los distintos tipos de agua respecto a la localización de los puntos muestreados se ilustraran en la (figura IV.5).



Figura IV.1- Muestreo de los aprovechamientos hidráulicos para análisis físicos-químicos-bacteriológicos (A,B).

La información recolectada sobre los análisis químicos realizados en diferentes zonas, con objetivo similar, son considerados para el análisis según Piper, cuya finalidad es observar los cambios que han ocurrido a través del tiempo en la composición química del agua (Rodríguez de Barbarín y Barbarín-Castillo, 1993; Velasco Tapia et al., 1994; Drescher, 1995; De la

Garza-González, 2000; De León-Gómez y Medina Barrera, 2000) y Lizárraga Mendiola L.G (2003)

Dentro de la fase de laboratorio, los análisis químicos se realizaron mediante los siguientes métodos (Tabla IV.1)

Determinación	Método	Norma Oficial Mexicana
Conductividad eléctrica (μ mhos/cm)	Conductivímetro	NOM-AA-093-SCFI-2000
Temperatura (°C)	Termómetro de mercurio	NOM-AA-007-SCFI-2000
pH	pHímetro	NOM-AA-008-SCFI-2000
Dureza Magnesio como CaCo ₂	Método volumétrico	NOM-AA-072-SCFI-2000
Dureza del Calcio como CaCo ₂		
Dureza total como CaCo ₂		
Alcalinidad total como CaCo ₂	Método volumétrico	NOM-AA-036-SCFI-2001
Cloruros (Cl ⁻)	Método volumétrico	NOM-AA-073-SCFI-2000
Sulfatos (SO ₄ ⁼)	Método gravimétrico	NMX-AA-074-1981
Sólidos Totales	Método gravimétrico	NOM-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspendidos Totales		
Sólidos disueltos		
Nitratos (como nitrógeno)	Absorción Atómica	NMX-AA-051-SCFI-2001
Fosfato		
Nitrógeno Amoniacal		
Zinc		
Sodio		
Potasio		
Plata		
Cromo		
Cobre		
Aluminio		
Cadmio		
Magnesio		
Plomo		
Fierro		

Tabla IV. 1.- Método empleado para el análisis hidrogeoquímico del muestreo en laboratorio.

Evaluación de las condiciones de la calidad del agua

Conforme a los diversos fines de extracción del agua en la zona, se realizó una revisión de las normas oficiales mexicanas que establecen los límites máximos permisibles (LMP) para

el consumo del agua potable, riego y uso urbano. A su vez, estos límites son comparados con normas internacionales establecidas para la conservación de la calidad del agua para el consumo humano Lizárraga Mendiola L.G (2003), (Tabla IV.8).

En base a la recopilación del muestreo hidrogeoquímico del agua subterránea, para observar los cambios espacio/temporal ocurridos en la calidad del agua, se basó en información recolectada de los análisis de muestreo que se realizan mes con mes por las Aguas de Saltillo (AGSAL). Se tomaron en cuenta también factores tales como el tipo de uso de suelo, uso de agua, espesor de zonas saturadas, tipos de acuíferos, profundidad del nivel freático, así como la distancia del punto muestreado a las principales fuentes de contaminación. De esta forma, es posible distribuir de forma jerárquica los datos para su evaluación estadística, que consistió en realizar: a) análisis de varianzas convencionales y b) análisis multivariados (Lizárraga Mendiola L.G, 2003).

El objetivo de estos análisis es la interpretación mediante diagramas para determinar las variaciones y tendencias de los elementos analizados e identificar las fuentes de contaminación que ejercen mayor influencia en sus concentraciones.

IV.2.- DISTRIBUCIÓN DE LOS PARÁMETRO FÍSICO QUÍMICO

Para determinar las concentraciones de valores de los parámetros analizados que nos permitan conocer las características químicas de las aguas subterráneas, la influencia ejercida por el medio geológico e identificar las zonas donde es mayor la influencia antropogénica. De esta forma, atendiendo a la distribución de los puntos muestreados y con la información obtenida sobre el uso del suelo y las condiciones del medio acuífero, puede determinarse la distribución de los parámetros analizados y sugerirse las posibles fuentes de origen para cada uno de ellos. La información sobre el tipo de acuífero y profundidad del nivel freático para cada punto muestreado se indica en Tabla IV.2.

Nombre	Clave	Tipo de aprovechamiento	Usodel agua	Tipo de Acuífero	Profundidad Nivel Freático (m)
Altamira 1	AL	Papalote equipado	Cons. Humano. animal y riego	Poros	15.26
Noria de Flores	NF	Noria equipada	Cons. animal y riego	Poros	16.22
Puente de Flores	PF	Pozo equipado	Cons. animal y riego	Poros	19.25
La Gloria	LG	Noria equipada	Cons. Humano. animal y riego	Poros	18.34
Rancho de Castillo	RC	Pozo equipado	Cons. animal y riego	Poros	39.48
El Palmar	EP	Pozo equipado	Cons. animal y riego	Poros	16
Manantial San Juan	MSJ	Manantial	Cons. animal y riego	Grietas	--

Tabla IV. 2.- Características físicas de los puntos de muestra.

- **Temperatura**

Se midió la temperatura del agua en las muestras donde se reporta una variación de 20° (NFI) hasta 24 ° (EP), estas variaciones se pudieran considerar que estén influenciadas por factores meteorológicos Lizárraga Mendiola L.G 2003.

- **Ph**

Se tomaron lecturas de pH en las 7 muestras analizadas donde se registro variaciones desde 6.93 las mínimas (PF) hasta 7.31 en el MSJ. Esta escala es utilizada para determinar la acidez o basicidad de soluciones, siendo el valor de 7.0 para el agua pura (Russikpff et al., 2001)

- **Conductividad Eléctrica**

La conductividad eléctrica es una determinación proporcional a la cantidad de sales que se encuentran disueltas en el agua, y los rangos de menor concentración en el área de estudio se encuentran en (MSJ=863 μ mhos/cm) mientras que la mayor concentración se localiza en el punto (PF=2,208 μ mhos/cm). La conductividad eléctrica permite conocer la cantidad de sales presentes, de esta forma una muestra que contiene valores altos de conductividad indica mayores valores de sólidos en suspensión (Davis & De Wiest, 1971; Cuestodio, y Llamas, 1996, Lizárraga Mendiola L.G 2003; NOM-ECOL-127-SSA1-1996).

- **Sólidos totales, suspendidos y disueltos**

Los sólidos totales disueltos en el agua subterránea muestran las concentraciones de fluctuaciones en todos los puntos analizados, en donde los valores mínimos se encuentran en los puntos (MSJ=680 mg/L) y (RC=764 mg/L), coincidiendo MSJ con los valores mínimos de

conductividad eléctrica excepto en RC donde la conductividad se dispara. Las concentraciones máximas se localizan en el punto (AL=2272 mg/L), (Figura IV.2).

El uso de suelos en la zona donde se localiza PF, es destinado en la agricultura, por lo que se deduce que la mayor concentración de sólidos suspendidos provienen de los fertilizantes utilizados en los cultivos y además se localiza sobre el acuífero de poros aguas debajo de las principales fuentes de contaminación más menos a 600 m del relleno municipal.



Figura IV.2- Preparación para obtener los sólidos totales. Laboratorio de Geoquímica Comimsa, S.A. de C.V.

La concentración de sólidos suspendidos no representan una gran variación, siendo el valor mínimo 2 mg/L para los puntos (EP, LG, NF, MSJ, MSN2), mientras que la máxima concentración se encuentra en los puntos (AL y RC) y son semejando a los resultados con valor de 8 mg/L ambos. De la misma manera pero para los sólidos disueltos se observa que los puntos MSJ y RC mantienen las concentraciones mínimas detectadas (448 y 762 mg/L, respectivamente), mientras que la máxima concentración se encuentra en el punto AL (2270 mg/L), punto en el que se midió el mayor. Estas concentración pudiera estar relacionadas a la cercana del relleno sanitario y a su vez con orto relleno industrial muy cercano a este punto (Figura IV.3).



Figura IV.3- Filtración al vacío del muestreo para obtener los sólidos disueltos. Laboratorio de Geoquímica Comimsa, S.A. de C.V.

- **Dureza total**

Concentraciones mínimas de la dureza total, son encontradas en el manantial SJ (414 mg/L), mientras que en el PF (1380 mg/L).

- **Alcalinidad Total**

La alcalinidad, mide la capacidad del agua para neutralizar ácidos y su valor depende en gran parte Ph (Snoeykin, 1990; Langmuir, 1997 y Lizárraga Mendiola L.G 2003). De esta forma, se analizan los datos con mayor pH, observado que los pozos (PF y MSJ) presentan las concentraciones mínimas de alcalinidad (158.4 y 180 mg/L, respectivamente). La máxima concentración se registró en NF (216 mg/L) son los que registran un pH, así mismo estos puntos registran una cantidad mínima, en cuanto a los que registran una alcalinidad máxima su pH es menor a los anteriores (Figura IV.4).



Figura IV.4- Determinación de la alcalinidad del muestreo mediante el método volumétrico. Laboratorio de Geoquímica Comimsa, S.A. de C.V.

- **Calcio**

Aguas subterráneas en contacto con rocas sedimentarias obtienen parte del contenido de calcio por procesos de disolución de calcita (Custodio y Llamas, 1996 y Lizárraga Mendiola, L.G 2003). Las concentración menores detectadas en los puntos EP=234.3mg/l y MSJ2=212.4, mientras que las muestras de mayor concentración más altas oscilan entre 951.4 y 884.4 mg/l. Davis & De Wiest (1971), mencionan concentraciones normales de calcio entre 10- 100 mg/l.

- **Magnesio**

Este ión en conjunto con el calcio, son parámetros importantes en la determinación de la dureza del agua. Werner (1996), menciona que entre la principales fuentes en que se puede encontrar el magnesio está en los sedimentos carbonatados como la dolomita y calizas, aunque en la calcita también puede encontrarse en menor cantidad; también se emplea en material de fotografías, aleaciones y pirotecnia (DeZuane, 1997). Su concentración común es de 1-40 mg/l. En los resultados obtenidos en los puntos muestreados se tienen concentraciones que fluctúan entre 13.7 y 71.6 mg/l, observándose que al igual que en la conductividad eléctrica,

los menores valores se encuentran en los puntos EP y MSJ y la concentración mayor se halla en el PF= 71.6 mg/l.

- **Sodio**

La principal fuente de sodio en las aguas la constituye el lavado de sedimentos de origen marino, arcillas y rocas evaporitas. Otra posible fuente son los contaminantes urbanos e industriales, así como el agua de lluvia. Werner (1996) indica concentraciones normales de 0.2 mg/l en el agua de lluvia y 1-20 mg/l en aguas subterráneas con baja concentración. En el área de estudio las concentraciones más altas se observan en los puntos AL=270 mg/l, NF=151.4 mg/l y RC=158.67 mg/l, mientras que las concentraciones más bajas son de 85.34 mg/l, sobre el Manantial San Juan.

- **Potasio**

El potasio se extrae a partir de las evaporitas. Las evaporitas son rocas sedimentarias de origen químico, formadas por precipitación química directa de los componentes minerales. En el área de estudio las concentraciones más altas se observan en el punto AL=4.21 mg/l y las concentraciones más bajas MJS=0.927 mg/l. El punto donde se registro la cantidad más alta, su origen se pudiera considerar a tierras de cultivo y a los derivados de desechos, que se encuentran en el relleno, como son vidrio, medicinas, pilas alcalinas, así como también los desechos en la industria de pintura y tintas.

- **Cloruros**

Las concentraciones más altas de cloruros se presentan en los puntos PF, AL con valores de 248.6-236.8 mg/l, mientras que en el resto de los puntos se muestran variaciones menores de 23.6-35.5 mg/l. Su procedimiento se pudiera considerar del lavado del terreno de origen marino, aguas de lluvias concentradas en el terreno y de vertidos urbanos e industriales (plantas galvanizadoras, oleoductos y refinerías). Werner (1996) menciona un rango de concentración en regiones lluviosas < 30 mg/l; en regiones áridas >1000 mg/l y en aguas de lluvia de 0.3 mg/l.

- **Sulfatos**

En la literatura se menciona que provienen, entre otras fuentes, de la corrosión del sulfuro en rocas sedimentarias, del lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambientes marinos. Procede además de la concentración en el suelo del agua de lluvias y actividades urbanas, industriales (curtidurías, fábricas de acero y plantas textiles) y agrícolas, siendo estas últimas las que generan cantidades importantes (Custodio y Llamas, 1996; DeZuane, 1997). Según Werner (1996), concentraciones normales en agua de lluvia son de 0.2 mg/l.

Los valores mínimos son localizados en el LG (115.2 mg/l), mientras que las máximas concentraciones se reflejan en el pozo (Altamira 1030.2 mg/l). Considerando el medio que se localiza y las fuentes de procedimiento antes descritas, puede inferirse que los factores que contribuyen a estas altas concentraciones sean la cercanía al relleno municipal y al relleno industrial muy cercano a este punto.

- **Nitratos**

Los nitratos provienen de aguas contaminadas por el uso de fertilizantes, desechos de animales, percolado de tanques sépticos y redes de alcantarillado, así como de la erosión de depósitos naturales. Estos son detectados en altas concentraciones donde existe la aplicación de fertilizantes, descomposición de residuos de origen animal y vegetal, en lixiviados y descargas industriales (DeZuane, 1997).

Las concentraciones detectadas en el área de estudio varían en un rango de MSJ= 11.2 a RC=32.5 mg/l y de acuerdo a las principales fuentes que lo generan, puede mencionarse que el uso de suelo, las descargas de aguas negras en fosas sépticas y letrinas, así como los diversos asentamientos de animales, y el relleno municipal, son fuentes potencialmente de los nitratos. En lo que respecta al contenido de nitratos la NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo de 10 mg/l, se consideran que rebaso lo establecido de la norma, en cambio para la World Health Organization (WHO-2000), esta norma establece 50 mg/l. lo cual se considera que esta dentro de la norma (Tabla IV.3).

IV.3.- COLIFORMES TOTALES Y FECALES

Los coliformes fecales y la E. Coli provienen de heces fecales de humano y animales. Se realizaron dos tomas de muestreo. En el primer muestro, el resultado de las concentraciones obtenidas se indica una alta concentración con materia fecal. En donde las concentraciones mínimas de coliformes totales fueron detectadas en el EP= (5 NMP/100 ml) y de coliformes fecales (DNPC: Demasiado números para contarse) mientras que las concentraciones máximas tanto de coliformes totales como fecales (DNPC). En la segunda etapa de muestreo las concentraciones mínimas de coliformes totales fueron detectadas en el NF= (550 col/100ml) y de coliformes fecales se reportaron valores de (0 col/100ml), excepto en el punto EP= (25 col/100ml), la concentración máxima de coliformes fecales se registraron en el punto EP= (940 NMP/100 ml).

Considerando las fuentes de contaminación, el origen de la misma y el lugar donde se recolectó la muestra, que son algunas norias que se encuentran al descubierto que posiblemente se una causa, heces fecales de animales y humanos, infiltración de zonas de cultivo así como la lixiviación de residuos sólidos y líquidos productos del relleno.

IV.4.- METALES PESADOS

La química de los metales en los suelos y acuíferos está gobernada por el Ph y el potencial redox (Charlatchk y Cambiar, 2000 & Atman y Bourg, 1979).

En cuanto al resultado obtenido en concentraciones de metales pesados, los elementos que se analizaron fueron zinc, plata, cromo, cadmio, fierro y plomo. Debido a que el método utilizado no indica valores muy precisos y las concentración de estos elementos son muy bajas, solo se consideraron como elementos trazas, por lo tanto no se considera como peligrosos ya que no rebasa lo establecido a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, y la World Health Organization (WHO-2000), normas que establece los límites máximos permisibles para la calidad del agua para uso urbano y agrícola (Tabla IV.3). Las posibles fuentes de estos elementos se pudiera considerarse las mismas rocas persistentes o algunos desechos derivados de estos elementos que se encuentren en el relleno municipal.

- **Fierro**

El hierro, es después del aluminio el mineral metálico más abundante en la naturaleza, aunque es raro en su forma nativa, su forma metálica no se encuentra en la naturaleza, dada la facilidad con que se oxida. Las concentraciones que se reportan en el muestreo realizado no rebasan lo permitido de acuerdo a la norma que se menciona, sus valores son resultados muy homogéneos y pudiera ser el reflejo de litología de la formación Cerro Huerta; que está constituida por lechos rojos cuyo origen pudiera provenir de dicha unidad; otros causantes serían desechos de estructuras derivadas del acero, tintas, papel para heliográficas, pigmentos pulidos localizados como desechos en el relleno, que se depositan por medio de la lixiviación hacia los acuíferos.

Por otro lado, el balance de cargas de componentes mayores para las muestras se reportan en el (anexo 3). El porcentaje de error (%ER) para las muestras de pozos varía entre 0.2 y 5.5 (valor absoluto), lo que implica que los balances iónicos quedan fuera de un intervalo aceptable (<5%) para un análisis de rutina (Deutsch, 1997), ya que el muestreo de los resultados es muy superior a la desviación máxima aceptable (5 – 29%), resultado de un exceso de cationes.

Para establecer la situación ambiental del acuífero, los datos obtenidos de cada uno de los pozos en la campaña de muestreo (abril 28 del 2010) fueron evaluados en base a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización” aunque es claro que un pozo situado en un relleno no debería usarse para consumo humano (Tabla IV.3).

Nombre	Clave	PH	mg/L Dureza de Magnesio como CaCO ₃	mg/L Dureza de Total como CaCO ₃	mg/L Cloruros (CL)	mg/L Sulfatos (SO ₄)	mg/L Sólidos Disueltos	mg/L Aluminio (Al)	mg/L Cobre (Cu)	mg/L Cromo (Cr)	mg/L Cadmio (Cd)	mg/L Hierro (Fe)	mg/L Plata (Ag)	mg/L Nitratos	mg/L Plomo (Pb)	mg/L Zinc (Zn)	NMP/100ml Coliformes Totales	NMP/100ml Coliformes Fecales
El Palmar	EP	7.25	283.2	517.5	38.4	602.5	1338.0	0.15	0.002	0.020	0.003	0.040	0.010	< 2.0	0.010	0.018	5	Presencia
Manantial San Juan	MSJ	7.31	177.0	414.0	23.6	144.0	448.0	0.15	0.002	0.020	0.003	0.020	0.010	< 2.0	0.010	0.003	DNPC	Presencia
Noria de Flores	NF	7.08	287.6	646.8	47.3	144.1	806.0	0.15	0.003	0.02	0.003	0.020	0.010	< 2.0	-----	0.019	DNPC	Presencia
La Gloria	LG	7.19	331.8	575.0	53.2	115.2	902.0	0.15	0.003	0.020	0.003	0.035	0.010	< 2.0	-----	0.17	DNPC	Presencia
Rancho de Castillo	RC	7.10	345.1	805.0	54.6	263.4	762.0	0.15	0.002	0.020	0.003	0.020	0.010	< 2.0	0.010	00.005	DNPC	Presencia
Puente de Flores	PF	6.93	495.6	1380.0	248.6	253.5	1688.0	0.15	0.002	0.020	0.003	0.020	0.010	< 2.0	0.010	0.003	77	Presencia
Altamira 1	AL	7.52	22.1	973.5	236.8	1030.2	2270.0	0.003	0.002	0.020	0.003	0.020	0.010	-----	0.010	0.198	18	Ausencia
NOM-127SSA1-1994		-----	500.0	500.0	250.0	400.0	1000.0	0.20	2.0	0.05	0.005	0.30	-----	10	0.01	5.00	0	0
OMS		-----	-----	-----	-----	500.0	-----	-----	-----	0.05	-----	-----	-----	50	0.01	3.00	0	0

Resultados obtenidos del muestreo de los análisis químicos con fecha del 28 de abril del 2010

Tabla IV. 3.- Tabla general de los resultados Obtenidos para muestras de agua y su comparación con las normas nacionales e internacionales para la calidad del agua.

IV.4.1.- CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL TIPO DE AGUAS (SEGÚN PIPER)

Las características hidrogeoquímicas y la clasificación de los diferentes tipos de agua, se realiza combinando los resultados obtenidos para este trabajo con la información recopilada de años anteriores (Rodríguez de Barbarín y Barbarín-Castillo, 1993; Velasco et al, 1994; Drescher, 1995; De la Garza-González, 2000; De León-Gómez, Medina-Barrera, 2000, Lizárraga Mendiola L.G 2003). Se construyó el diagrama de Piper (1944), utilizando el paquete AquanChem 5.0 (Waterloo hidrologica, Inc., 2000; Waterloo, Canadá).

La clasificación consiste en graficar las concentraciones de cationes y aniones (% meq/l) en sus respectivos triángulos y posteriormente estos puntos se extrapolan hasta obtener la intersección en una figura romboidal (Lizárraga Mendiola L.G, 2003). La primera ventaja que este método presenta es que se puede agrupar gran cantidad de datos. Observando los diagramas de Piper, se distinguen tres grupos de facies hidrogeoquímicas (Figura IV.5).

- I) Aguas bicarbonatadas en el pozo (RC)
- II) Aguas sulfatadas-cloruradas en los pozos (EP, NSJ, NF y LG)
- III) Aguas cloruradas en los pozos (PL Y AL)

Este grupo específica según el tipo de agua si son definidos por la predominancia de aniones y cationes de acuerdo a la Tablas IV.4 y 5 y la clasificación para cada muestra se menciona en Tabla IV.7. Para consultar las muestras representadas en el diagrama se revisó la bibliografía citada (Rodríguez de Barbarín y Barbarín Castillo. 1993; Velasco et al., 1994; Drescher, 1995; De la Garza Gonzales, 2000; De León Gómez y Medina Barrera, 2000; y Lizárraga Mendiola L.G, 2003).

TIPO	ANIONES	TIPO	CACIONES
1	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$	a	$rNa^+ > rMg^{+2} > rCa$
2	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{2-}$	b	$rNa^+ \ rCa^{+2} > rMg^{+2}$
3	$rSO_4^{2-} > rC^- > rHCO_3^-$	c	$rMg^{+2} > rNa^+ > rCa^2$
4	$rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rCl^-$	d	$rMg^{+2} > rCa^{+2} > rNa^2$
5	$rHCO_3^- > rCl^- > rSO_4^{2-}$	e	$rCa^{+2} > rNa^+ > rMg^{+2}$
6	$rHCO_3^- > rSO_4^{2-} > rCl^-$	f	$rCa^{+2} > rMg^{+2} > rNa^+$

Tabla IV. 4.- Clasificación según Piper por iones predominantes (Custodio y Llamas, 1996).

TIPO	C.E. a 25°C en $\mu S/cm$
C1	0 - 250
C2	250 - 750
C3	750 - 2,250
C4	> 2,250

Tabla IV. 5.- Clasificación del tipo de aguas en base a su conductividad eléctrica (Custodio y Llamas, 1996).

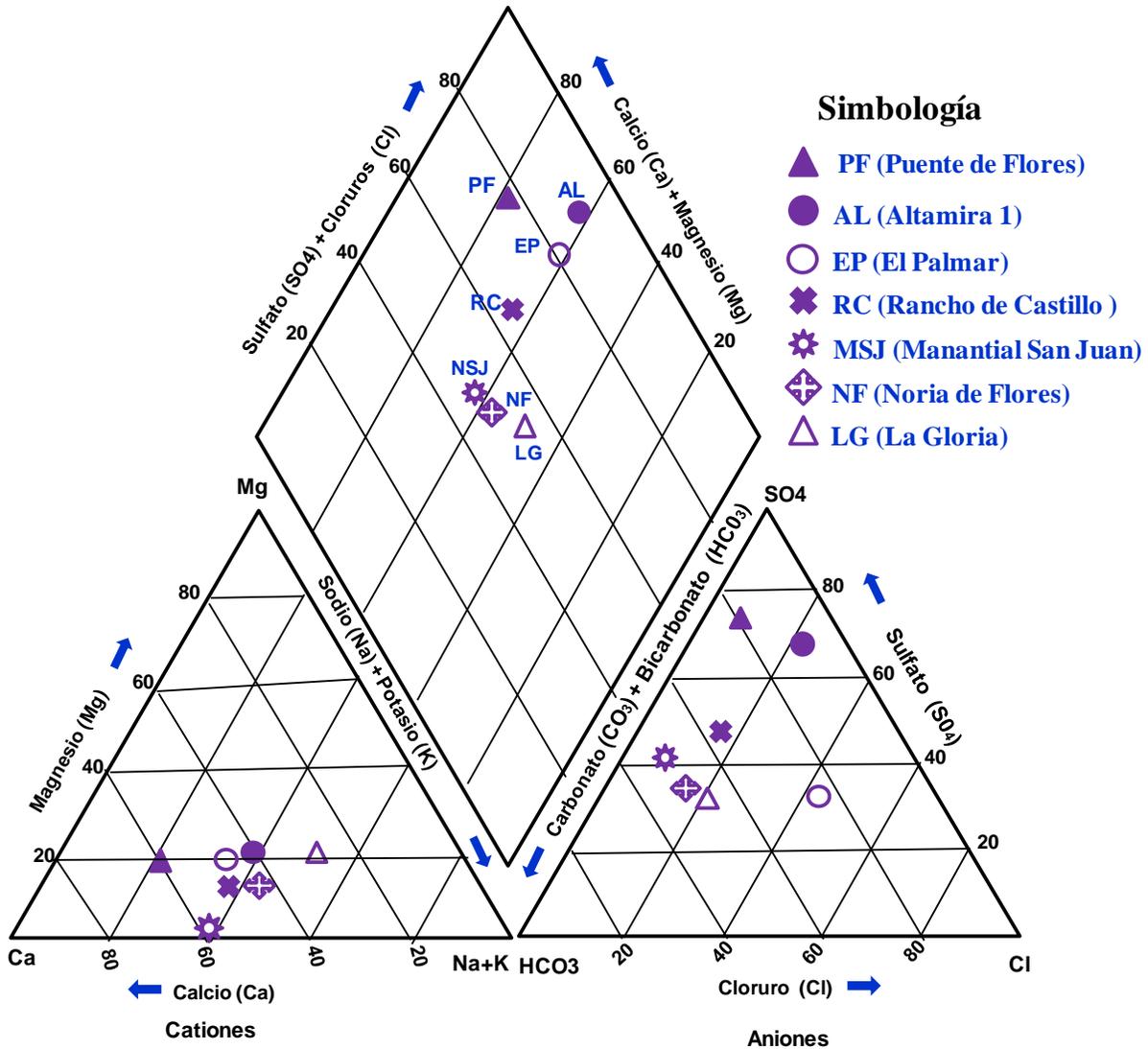


Figura IV.5. Diagrama de Piper para muestras de agua colectadas a los alrededores del Relleno Sanitario de Saltillo Coahuila.

IV.4.2.- CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS SEGÚN EL CONTENIDO DE TSD

Los Sólidos son materiales suspendidos o disueltos en aguas limpias y aguas residuales. Cuando estos se presenten en grandes concentraciones, pueden inducir a reacciones fisiológicas desfavorables en los humanos (Langmuir, 1997). De acuerdo a la clasificación que hacen Davis & De Wiest (1971) y Werner (1996), las concentraciones de los parámetros

indican que todas las muestras analizadas pertenecen al tipo de agua salobre (varían de 863 – 2,208, (Tabla IV.6).

Clasificación	Concentración total de sólidos disueltos (ppm)
Agua dulce	0 - 1000
Agua salobre	1000 – 10,000
Agua salad	10,000 – 1000,000
Salmueras	Más de 100,000

Tabla IV.6- Clasificación del tipo de aguas en base a su concentración del total de sólidos disueltos Davis & De Wiest , 1971 y Werner 1996.

IV.2.3.- CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE AGUA POR SU DUREZA

La dureza en el agua indica el contenido en iones (Ca^{+2} y Mg^{+2}). Las concentraciones encontradas en las muestras analizadas para dureza total como CaCO_3 varían entre 414 y 1380 mg/L, por lo que de acuerdo a la clasificación hecha por Custodio y Llamas (1996) todas pertenecen al grupo de aguas muy duras (Tabla IV.7).

Clasificación	Tipo de agua en base a su dureza (mg/l)
Blenda	0 - 50
Algo dura	50 – 120
Dura	120 – 250
Muy dura	Hasta saturación

Tabla IV.7- Clasificación del tipo de aguas en base a su dureza (como CaCO_3 mg/l) tomada de Custodio y Llamas, 1996.

IV.2.4.- CLASIFICACIÓN SAR

Esta clasificación se usa para determinar las condiciones de salinidad del agua al ser utilizadas para riego. Se basa en la concentración total de las sales solubles expresadas

mediante la conductividad eléctrica y la concentración relativa del sodio respecto al calcio y al magnesio, denominado índice de absorción del sodio (SAR).

$$\text{SAR} = \frac{\text{rNa}}{\sqrt{\frac{(\text{rCa} \pm \text{rMg})}{2}}}$$

Después de calcular el índice SAR, los valores son comparados contra la conductividad eléctrica en el diagrama de clasificación (Figura IV.6.) y se determinan las características de las muestras Analizadas (Tabla IV. 8).

Nombre	Clave	C.E. (μ mho/cm)	SAR (meq/l)	Clasificación
El Palmar	EP	1,069	1.86	C3 – S1
Manantial San Juan	MSJ	863	1.82	
Noria de Flores	NF	1,252	2.59	
La Gloria	LG	1,263	1.93	
Rancho de Castillo	RC	1,763	2.43	
Puente de Flores	PF	2,208	1.76	
Altamira 1	AL	2,870	3.77	

Tabla IV.8. Tipo de aguas para riego según el Salinity Laboratory Staff (Custodio y Llamas, 1996).

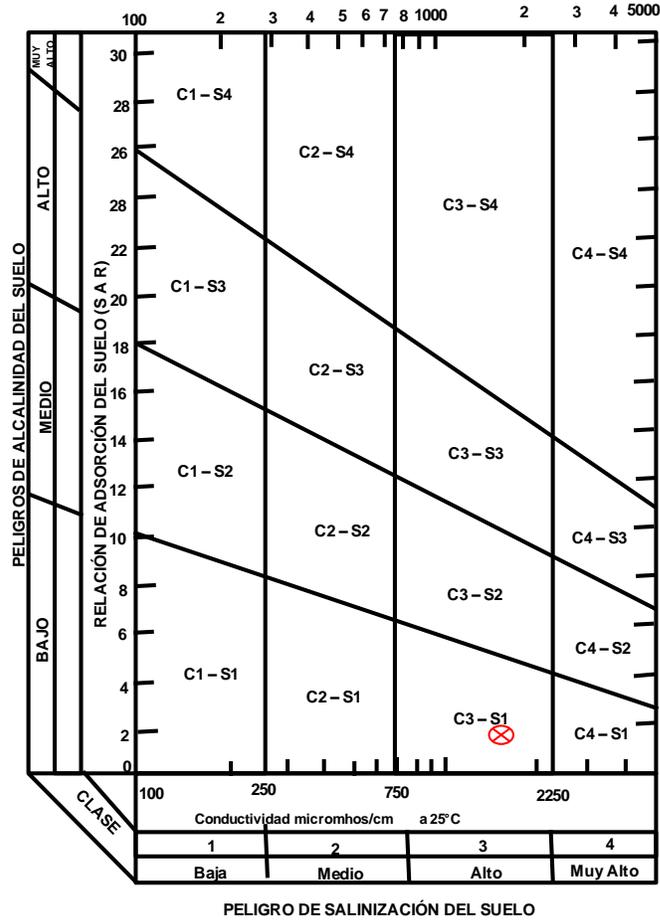


Figura IV.6. Diagrama de clasificación para muestras de agua colectadas en los alrededores del Relleno Sanitario de Saltillo Coahuila. (tomado de Custodio y Llamas, 1996).

El total de las muestras pertenecen al grupo C3-S1 lo cual indica que son aguas altamente salinas, con concentraciones sólidas disueltas entre 527 y 759 mg/L. Es recomendable la aplicación del agua en suelos con un drenaje adecuado y sobre plantas tolerantes a las sales. Los puntos que presentan más alto índice SAR son el P-4 y P-8, que se localizan aguas abajo a 617 y 580 m respectivamente del relleno sanitario, en dirección al flujo de las aguas subterráneas.

IV.4.5.- PARÁMETROS QUE SOBREPASAN LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP).

Límite máximo permitido (LMP) es definido por la NOM -127-SSA1-1994 como la concentración o el contenido máximo de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor. Realizando una revisión de los LMP por las normas anteriores mencionadas (Tabla IV.9), puede determinarse que los parámetros que exceden sus concentraciones son: sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sulfatos, nitratos, coliformes totales y coliformes fecales.

Las concentraciones de sólidos totales y suspendidos detectados sobrepasan los LMP para riego y uso urbano en los siete puntos muestreados. La concentración de sólidos en la mineralización del agua subterránea es alta y componen un factor indicador de la vulnerabilidad en el acuífero. Las descargas de aguas residuales sobre los cauces superficiales (río Mulato y Las Flore) y el agua subterránea (fosas sépticas y letrinas en la comunidad Altamira y Padre Santo contribuyen a estas altas concentraciones.

Se detectaron valores de sulfatos en cantidades superiores a los LMP para agua potable según la EEC en los puntos AL y EP, mientras que los puntos PL, RC, LG. NF y MSJ, se encuentran por debajo del límite permitido, (como se puede observar, los puntos AL y EP son los más afectados, probablemente por la cercanía del relleno municipal y al relleno industrial, otro por las actividades de fosas sépticas y letrinas. Alto nivel de sulfatos en el agua destinada al consumo humano, causan diarrea y deshidratación ya que las sales de sulfato son absorbidas por el intestino (DeZuane, 1997; y Lizárraga Mendiola L.G., 2003).

De acuerdo a los LMP establecidos para agua potable por las normas NOM-127-SSA1- (1994), USEPA (2001), WHO (2000) y EEC (2000), los valores de nitratos se encuentran por debajo de lo establecido por las normas, en concentraciones que varían desde 11.2 hasta 32.9mg/l. Anteriormente el LMP establecido por la NOM-127-SSA1 (1994) fue de 44.4 mg/l, sin embargo debido a la gran influencia que ejerce en la contaminación del agua subterránea, en 1999 fue reducido por dicho organismo a 10 mg/l.

En cuanto a la presencia de coliformes totales y fecales es notoria la cantidad que exceden los LMP para el consumo humano según las normas NOM-127-SSA1 (1994) y WHO (2000). En los 7 puntos analizados, las fuentes de origen son de carácter antropogénico,

pudiéndose mencionar desde el relleno municipal, relleno industrial muy cercano al área de estudio, fosas sépticas y letrinas, ya que provienen principalmente de excretas de humanos, animales y descomposición de materia orgánica. Existe una cantidad de noria, pozos al descubierto, permitiendo mayor facilidad a la contaminación. Esta carga de contaminación biológica puede contribuir a la proliferación de enfermedades intestinales tales como hepatitis A y E, fiebre tifoidea, disentería, diarrea y criptosporidiosis (Ling 2000) náuseas y cefaleas (Langmuir, 1997; Barret et al., 2000; USEPA, 2001).

De los efectos adversos que provocan en la salud de los consumidores se encuentra que en concentraciones elevadas en el agua potable, pueden producir cianosis en niños (DeZuane 1997; USEP, 2001) dificultades respiratorias, provocan metahemoglobinemia e incluso abortos espontáneos (WHO, 2000), además de que contribuyen a la corrosividad de tuberías de conducción de agua potable.

La presencia de coliformes totales y fecales no exceden los LMP para el consumo humano según las normas NOM-127-SSA1 (1994) y WHO (2000) en los puntos analizados, pero existen las fuentes que a un futuro no lejano pudieran presentarse y pudiente prevenir a la proliferación de enfermedades intestinales tales como hepatitis A y E, fiebre tifoidea, disentería, diarrea y criptosporidiosis (Ling, 2000); náuseas y cefaleas (Langmuir, 1997; Barret et al. 2000; USEP, 2001).

En Europa se han reportado casos de gastroenteritis y disentería por aguas con cantidades excesivas de coliformes fecales (Chave, 2000). La presencia de metales en la mineralización de agua puede ser esencial, siempre y cuando estos no excedan las cantidades permitidas por Normas Oficiales, ya que entonces podría convertirse en elementos perjudiciales para la salud del consumidor. De los resultados obtenidos no reportan amenaza a la calidad del agua subterránea.

La presencia de metales en la mineralización del agua puede ser esencial, siempre y cuando estos no excedan las cantidades permitidas por los organismos oficiales, ya que entonces podrían convertirse en elementos perjudiciales para la salud del consumidor. De esta manera se observa que entre los metales analizados, las concentraciones no excede los LMP de la NOM-127-SSA1-1994, WHO-2000, USEPA-2001, WHO-2000 y EEC-2000.

Parámetro	NOM-001 ^a		NOM-127 ^b	USEP ^c	WHO ^d	EEC ^e	Relleno Sanitario
	Riego	Urbano	Agua Potable				
Temperatura (°C)		40	-----	-----	-----	-----	22.16
pH			6.5-8.5		6.5-8.5	6.5-8.5	7.19
Sólidos totales (mg/L)	150	75	-----	-----	-----	-----	1173.42
Sólidos disueltos	1	1	-----	-----	-----	25	-----
Sólidos Suspendidos Totales	-----	-----	1000	-----	1000	-----	1173
Cloruros (Cl ⁻)	-----	-----	250	-----	-----	200	101.12
Sulfatos (SO ₄ ⁼)	-----	-----	400	-----	-----	150	364.7
Nitratos (como nitrógeno)	-----	-----	10	10	10	25	< 2.0
Coliformes totales (NMP/100M)	-----	-----	0	-----	0	50	14.28
Coliformes fecales (NMP/100M)	-----	-----	0	-----	0	20	-----
Arsénico (mgAs ⁺³ /L)	0.2	0.1	0.025	0.05	0.05	0.01	-----
Mercurio (mg ⁻² /L)	0.01	0.05	0.01	0.02	0.001	0.0005	-----
Selenio (mgSe ⁻² /L)	-----	-----	-----	0.05	0.01	0.01	-----
Bario (mgBa ⁺² /L)	-----	-----	0.7	0	-----	-----	-----

a: NOM-001ECOL-1996

b: NOM-127-SSA1-1994

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

d: World Health Organization (WHO-2000)

e: European Economic Community (EEC-2000)

Nota. Los valores del relleno sanitario es el resultado de la media de las siete muestras.

Tabla IV. 9.- Límites máximos permisibles (LMP) establecidos por diversos organismos para la calidad del agua.

IV.4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS HIDROGEOQUÍMICOS

La composición química del agua subterránea se ve influenciada parcialmente por la presencia de factores climatológicos. El uso de suelo y la urbanización en la zona también contribuye de manera antropogénica a este problema. La presencia del relleno municipal, contribuye permanentemente a la lixiviación de los residuos sólidos ahí depositados directamente sobre el macizo rocoso. No se observó un control de los residuos sólidos, como se menciona no se apreció la geomembrana impermeable que aisle este contacto con las precipitaciones, contribuyendo a su lixiviación e infiltración hacia el subsuelo a través de sus fracturas, además el impacto visual negativo que se genera por la basura a la intemperie antes de su confinamiento y por último lo de la combustión produciendo gases (Figura IV.7, 8 ,9

10). Entre los elementos detectados que pueden asociarse a este sitio se encuentran: sodio, cloruros, coliformes totales y coliformes fecales.

Esta es solamente una determinación preliminar, ya que para definir con precisión cuales son los elementos derivados de estos residuos, es necesario analizar directamente los lixiviados que se generan.

Como influencia antropogénica debe incluirse las fosas sépticas y letrinas dispersas en el área de estudio, puesto que el nivel freático está localizado a una profundidad promedio de 16 a 25 m de profundidad. Donde el medio acuífero está compuesto por material poroso muy permeable (acuífero de poros). Entre los elementos asociados a esta fuente pueden mencionarse los sólidos disueltos, totales y suspendidos; cloruros, coliformes totales fecales, sulfatos y cloruros.



Figura IV.7- Panorámica del Relleno Municipal de Saltillo Coahuila, residuos sólidos de todo tipo, depositados sin control alguno.

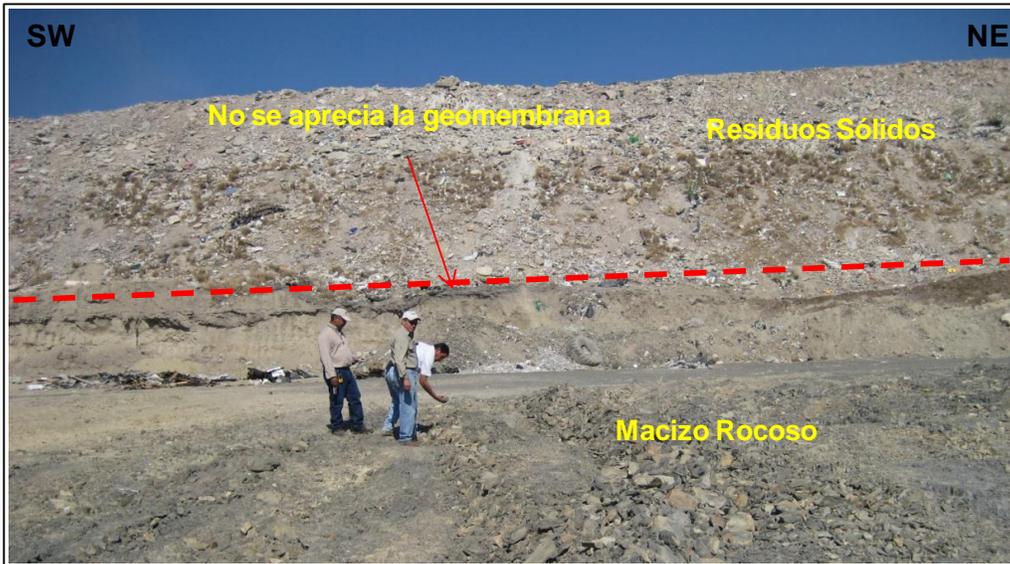


Figura IV.8- Residuos sólidos en contacto con el macizo rocoso , no se observa la geomembrana que impida la infiltración de lixiviados hacia el subsuelo.



Figura IV.9- Vista panorámica del Relleno Municipal de Saltillo Coahuila. Se muestra el impacto visual negativo que se genera por la basura a la intemperie antes de su confinamiento.

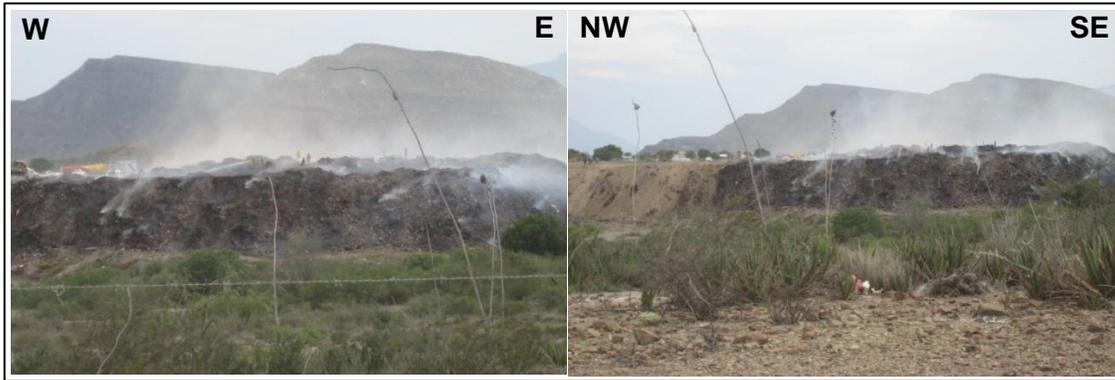


Figura IV.10- Combustión de los residuos sólidos generando además de la infiltración de lixiviados al subsuelo, proliferación de gases en la atmósfera.

IV.4.7.- DISCUSIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA.

Con los resultados obtenidos de los análisis químicos se obtuvo una idea de la calidad del agua para uso potable y riego. Se identificaron los puntos de muestreo que presenta mayor vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea y sus fuentes. Los parámetros que sobrepasan los límites máximos de permisibles (LMP), los cuales reflejan una clara evidencia de presencia de contaminación por cloruros, sulfatos, sólidos, coliformes totales y coliformes fecales.

Dado que no hay estudios que sustenten la influencia de las fuentes de contaminación sobre esta área de estudio, se propone más estudios sobre los puntos de muestreo y una relación con el medio físico natural y antropogénica para fortalecer dichos argumentos.

Respecto a la influencia antropogénica, debe mencionarse una vez más que el medio físico natural está compuesto principalmente por el acuífero de poros, en el que la zona no saturada se localiza a un nivel somero, aunado a las condiciones de permeabilidad que favorecen la infiltración de contaminantes provenientes de fuentes naturales (zonas de cultivo y matorrales) y antropogénicas como son las fosas sépticas y letrinas, granjas porcícolas y el vertido de aguas de manantiales, fuentes de recarga hacia el acuífero.

CAPÍTULO V RELACIONES ENTRE GEOLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas el agua subterránea ha ido adquiriendo mayor atención como una fuente de abastecimiento a la población, debido a su relativa baja susceptibilidad a la contaminación a las aguas superficiales.

El crecimiento de la explosión demográfica y el desarrollo tecnológico en el país en los últimos años, han contribuido que la vulnerabilidad de su calidad, generando lixiviados provenientes de vertederos sin control alguno, genera descarga de aguas residuales de origen doméstico y municipal sobre cauces superficiales y al subsuelo, otros causantes son el así resultado de actividades agrícolas y ganaderas.

Estos factores contribuyen a la formación de sustancias contaminantes que afectan la calidad de agua de los acuíferos y reducen su valor de consumo. Pero además, la importancia del papel que desempeña el medio físico natural comprendido por el marco geológico, hidrológico así como la composición química del agua, pueden ser determinantes en el grado de protección o susceptibilidad que presente el medio acuífero con respecto a la influencia de estos contaminantes en la calidad del agua subterránea

Por lo que respecta a esta última etapa del proceso de los residuos sólidos, el manejo de los mismos adquiere una relevancia aún mayor, dada su incidencia directa en la salud de la población y en los diferentes elementos del ambiente (aire, agua y suelo), incluyendo los problemas de queja pública y del deterioro de la estética, cuando no se cumple con los requerimientos que permitan controlarlos sanitariamente.

V.1 ANÁLISIS PRELIMINAR Y DISCUSIÓN

En la zona de estudio el medio acuífero existente está comprendido por una transición entre acuífero de fracturas y un acuífero de poros que se logró definir. La profundidad del

nivel freático fluctúa en promedio entre de 16 a 25 m. Aunque el macizo rocoso de las Formaciones Cerro del Pueblo y Parras, son de composición impermeable, la densidad del fracturamiento favorece la permeabilidad secundaria, facilitando la infiltración y el flujo del agua a través de la red de fracturas. La orientación preferencial que presentan dichas fracturas coincide con la dirección general del flujo del agua subterránea a través del acuífero de poros.

Los flujos del agua a través del medio poroso están controlados por el gradiente hidráulico. La composición de las zonas saturada y no saturada, conformadas por conglomerados semicementados y sedimentos finos permeables, así como por un nivel freático somero, favorecen a su vez mayores velocidades de transporte. Por lo tanto, en vista de las condiciones de permeabilidad que presentan tanto el macizo rocoso como el medio poroso, debe mencionarse que las actividades antropogénicas contribuyen de forma negativa en la composición química y la calidad del agua subterránea, debido a la inadecuada planeación del uso del suelo y selección del sitio para el confinamiento de residuos sólidos municipales.

La depositación sin control de los residuos sólidos generados por las actividades industriales, municipales y domésticas en el relleno municipal, por comentario de los pobladores, el relleno inició como basurero, sin diseño adecuado con el que debe iniciar un relleno sanitario para evitar la infiltración de los lixiviados a través de las fracturas, produciendo al entrar en contacto los residuos sólidos con las precipitaciones, sino existió una geomembrana al inicio de relleno municipal.

No existe una red de drenaje eficiente que capte los lixiviados en el área de estudio, dando lugar a la presencia de fosas sépticas y letrinas, mismas que se distribuyen en casi la totalidad de esta área. Debido a la alta permeabilidad del medio poroso, se facilita la infiltración de contaminantes tales como sólidos totales, suspendidos, disueltos sulfatos, cloruros, coliformes totales y coliformes fecales, provenientes de los desechos de humanos y animales principalmente. Estos tipos de contaminantes se encuentran presentes además en las zonas donde se localizan granjas porcícolas, zonas de cultivo y áreas de ganado vacuno distribuidas en el área.

Se tiene conocimiento que la recarga del acuífero por medio de las precipitaciones no se produce de forma inmediata, las fluctuaciones del nivel freático a través del tiempo desempeñan un papel importante sobre las variaciones en la concentración de los elementos

químicos presentes en el agua subterránea. Se recomienda realizar un monitoreo hidrogeológico e hidrogeoquímico, donde se puedan observar los cambios en las concentraciones de variación en periodos de sequía de precipitación.

CAPÍTULO VI ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA A LA CONTAMINACIÓN

INTRODUCCIÓN

El término de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero es usado para representar las características intrínsecas que determinen la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster, 1987).

La vulnerabilidad del agua subterránea es evaluada de acuerdo a las ideas basadas en el concepto de que algunas áreas son más vulnerables a la contaminación que otras. Esta diferencia es controlada por diversos factores tales como el medio acuífero, el espesor de la zona no saturada, la capacidad de ésta para atenuar el impacto de contaminantes, el uso del agua, uso del suelo, la distancia del punto hacia las fuentes de contaminación, entre otros.

La recopilación o investigación de los estudios sobre la cantidad de contaminantes y la vulnerabilidad que presenta el acuífero a la calidad de agua han sido realizados en lugares como México (González et al., (1997), Taiwán (Ting et al., 1998), Turquía (Algün y Doyuran, 2000), Reino Unido (Chave, 2000), Argentina (Bocanegra et al., 2001) y Korea (Jeong, 2001) y Lizárraga Mendiola L.G (2003).

El contexto de la presión antropogénica sobre el agua subterránea amenaza con afectar su disponibilidad y su calidad, es necesario realizar una evaluación que comprenda acciones tales como planes de predicción y prevención, sistema de alerta y programas de mitigación. El objetivo principal de este trabajo de tesis consistió en identificar si existen elementos o compuestos en el agua subterránea, que sobrepasen los límites establecidos por las normas de calidad del agua en el área de estudio, si estos presentan variaciones espacio/temporales detectables y si la geología está facilitando estos procesos de entrada de contaminación al acuífero. Esto permite proponer sistemas preventivos basados principalmente en monitoreos periódicos que comprendan la observación y medición del nivel piezométrico así como de la calidad del agua subterránea durante largos períodos de tiempo.

En este capítulo se intentan enmarcar las condiciones de vulnerabilidad que presentó el agua subterránea en la zona de estudio, conociendo de antemano cuales son las principales fuentes de contaminación, la presencia de contaminantes en algunos puntos muestreados, así

como las condiciones geológicas e hidrogeológicas que contribuyen a atenuar o incrementar dicha contaminación, la presencia de contaminantes en algunos puntos muestreados, contaminación sobre el agua subterránea. Con esta información se delimitaron las zonas de vulnerabilidad en orden de importancia jerárquica, es decir, de mayor a menor afectación sobre la calidad del agua subterránea.

VI.1 METODOLOGÍA

La metodología realizada para desarrollar este tema consistió en clasificar la información recopilada durante la realización de este trabajo, eligiendo los factores necesarios para evaluar la vulnerabilidad que presenta el medio acuífero a la afectación de la calidad en el agua subterránea, contenido en la Tabla VI.1. Dicha información además considera: la profundidad del nivel freático, tipo de acuífero, el uso del suelo, el uso del agua, la cercanía de la fuente de contaminación al punto de medición, la dirección del flujo subterránea, así como la presencia de contaminantes detectados durante el análisis de la calidad del agua.

Nombre	Clave	Tipo de Acuifero	Uso del agua	Nivel Freático (m)	Uso de suelo
Altamira 1	AL	Poros	Cons. Humano. animal y riego	15.26	Particular, tierras de cultivo fosa séptica/letrina
Noria de Flores	NF	Poros	Cons. animal y riego	16.22	Particular, tierras de cultivo fosa séptica/letrina
Puente de Flores	PF	Poros	Cons. animal y riego	19.25	Particular, tierras de cultivo fosa séptica/letrina
La Gloria	LG	Poros	Cons. Humano. animal y riego	18.34	Particular, tierras de cultivo fosa séptica/letrina
Rancho de Castillo	RC	Poros	Cons. animal y riego	39.48	Particular, tierras de cultivo fosa séptica/letrina
El Palmar	EP	Poros	Cons. animal y riego	16.00	Particular, tierras de cultivo fosa séptica/letrina
Manantial San Juan	MSJ	Grietas	Cons. animal y riego	-----	Tierras de cultivo
Rancho de Peña	RP	Grietas	Agua potable	16.89	Zona urbana
Lozano	LO	Grietas	Agua potable	21,00	Zona urbana
La Torre	LT	Grietas	Agua potable	18.91	Zona urbana
Bloquera	BL	Grietas	Agua potable	16.68	Zona urbana
El Panteón	EP	Grietas	Agua potable	49.91	Zona urbana

Tabla VI.1. Datos del muestreo, para la evaluación de la vulnerabilidad en el área

Una vez elaborada esta base de datos, se realizó la clasificación de cada factor en orden jerárquico, considerando el valor más alto para el factor que presenta la mayor importancia y el valor más bajo para el factor de menor importancia, en base a la metodología (Lizárraga Mendiola, L.G 2003). (Tabla VI.2). A cada variable se le agrega además un factor decimal, que clasifica también en orden jerárquico el grado de importancia de cada una de las variables. Posteriormente se analiza cada uno de los puntos de muestreo multiplicando este factor y la suma del producto indica cuales son los puntos que presentan de mayor a menor vulnerabilidad. Además se realizó una revisión sobre el método de análisis empleado para determinar áreas de vulnerabilidad, con la finalidad de obtener una comparación entre estos y definir por su eficacia y aproximación, cuales son los indicadores para aplicar el presente estudio.

				Suma de Variables	Grado de vulnerabilidad propuesto	Simbología empleada
A	B	C	D	E		
Profundidad del Agua (m)	Medio acuifero	Uso de agua	Uso del Suelo	Índice de Clasificación Propuesto		
0 – 5 = 9	Poros 2	Agua potable = 6	Fuente = 6	12 -	Muy alta	I
6 – 10 = 8		Cons. Humano = 5	Rio / urbano = 5			
11 – 15 = 7		Uso Doméstico = 4	Cítrico = 3	10- 11	Alto	II
16 – 20 = 6			Cultivos = 3			
21 – 25 = 5	Grietas 1	Animales = 3	Recreativos / pastizales = 2	8- 9	Media	III
26 – 30 = 4		Riego = 2	Matorrales = 1	6- 7	Bajo	IV
31 – 35 = 3						
36 – 40 = 2		Sin uso = 1	Aguas arriba de fuentes = -1	4- 5	Muy Bajo	V
41 – 45 = 1						

Tabla VI.2. Datos del muestreo, para la evaluación de la vulnerabilidad en el área de estudio (tomado Lizárraga Mendiola L.G 2003).

Los métodos más comunes, Gogu y Dassargues (2000) mencionan el sistema de clasificación GOD (Foster, 1987), DRASTIC (Allar et al., 1987), SEEPAGE (Navulur y Engel, sin publicar), SINTACS (Civita, 1994), ISIS (Civita y De Regibus, 1995) y AVI (Van Stempvoort et al., 1993). Estos autores realizan una recopilación de distintos métodos aplicados a la evaluación de la vulnerabilidad y proporcionan el desarrollo de la metodología para cada uno de ellos. Sin embargo, en el presente estudio solo es posible el método GOD, debido a la cantidad de información disponible para su desarrollo (Tabla VI.1). Posteriormente esta información es condensada y representada en un mapa de vulnerabilidad, en el cual se muestran las características el sistema del agua subterránea la ubicación y naturaleza de la fuente potencial de contaminación (anexo 6).

VI.2 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD EN EL ÁREA

Utilizando la información contenida en las tablas VI.1 y VI.2 se realizó el análisis de la vulnerabilidad del agua subterránea en el área de estudio. Como se definió en la metodología, se evalúan los parámetros propuestos para cada uno de los puntos de muestreo, ya que cada uno de ellos presenta características muy diferentes. Las áreas naturalmente vulnerables son zonas más susceptibles donde el suelo, la zona saturada y el macizo rocoso no proporcionan una protección adecuada, facilitando el rápido transporte de contaminantes hacia el agua subterránea. Las zonas más vulnerables son las áreas de recarga en acuíferos someros (Vrba y Zaporozec, 1994); pero además de estas existen también las áreas vulnerables por la influencia antropogénica.

Para la cuestión de los análisis se combinan los dos conceptos, ya que el medio geológico e hidrogeológico favorece la afectación de la calidad del agua subterránea. Como se ha determinado en el capítulo IV, existen contaminantes provenientes de actividades urbanas (sólidos totales, disueltos sólidos disueltos, totales y suspendidos; cloruros, coliformes totales fecales, sulfatos y cloruros, así como de sólidos), pero algunos provienen también del medio físico natural (cloruros, sólidos totales, disueltos y suspendidos).

En base a la ubicación de las principales fuentes de contaminación como son el relleno municipal, granjas porcícolas, fosas sépticas y letrinas dentro del área de estudio y las áreas de cultivo, sería muy sencillo determinar que las zonas de mayor vulnerabilidad se localizan precisamente en estos puntos analizados. Sin embargo, no debe olvidarse que además de estos factores, es importante conocer el tipo de consumo de agua, el uso de suelo y la ubicación de las fuentes de contaminación, pues esta información contribuye a delimitar con mayor aproximación las zonas de mayor a menor vulnerabilidad.

Acorde a la información obtenida para el presente trabajo, se propone un método de análisis que comprende los factores que a raíz de su evaluación, al parecer mantienen una relación respecto a la vulnerabilidad del agua subterránea (Tabla VI.3). Este método consiste en asignar un valor decimal a cada factor en orden de importancia hasta completar la unidad. Este factor decimal se multiplica por cada variable (A, B, C y D) y la suma de estos productos entra en una clasificación también propuesta (E) que permite identificar las diferentes zonas de vulnerabilidad y representarlas por áreas en el mapa de vulnerabilidad. La fórmula de análisis se define de la siguiente forma:

$$0.3A + 0.1B + 0.4C + 0.2D = E$$

DONDE :

A = Profundidad del agua subterránea

C = Uso del agua

E = Índice de clasificación

B = Medio acuífero

D = Uso del suelo

Se ejecutó una revisión de literatura sobre el método de aplicación para el análisis de vulnerabilidad del agua subterránea, de los cuales únicamente es posible aplicar el presente estudio el método GOD. El resto de los métodos comúnmente utilizados en investigaciones (DRASTIC-Aller et al. 1987-, SEEPAGE – Navulur y Engel, sin publicar-, SINTACS – Civita, 1994-. ISIS – Civita y De Regibus, 1995- y AVI – Van Stempvoort et al, 1993-) no fueron posibles de aplicar debido a la escasez de información con que se cuenta. El método GOD propuesta por Flores en 1987 (menc. En Gogu y Dassarges, 2000), se aplica en la determinación de áreas naturalmente vulnerables, en zonas que son más susceptibles donde el

suelo, la zona no saturada y el medio geológico, no proporcionan una protección adecuada contra la rápida infiltración de contaminación hacia el acuífero.

Los valores de clasificación se indican en la carta de vulnerabilidad (anexo 4) y los parámetros que este método considera para el análisis son los siguientes:

- G** (ground water occurrence-naturaleza del acuífero).
- O** (overall aquifer cllas-naturaleza de la zona saturada).
- D** (depth-Profundidad del agua o del acuífero).

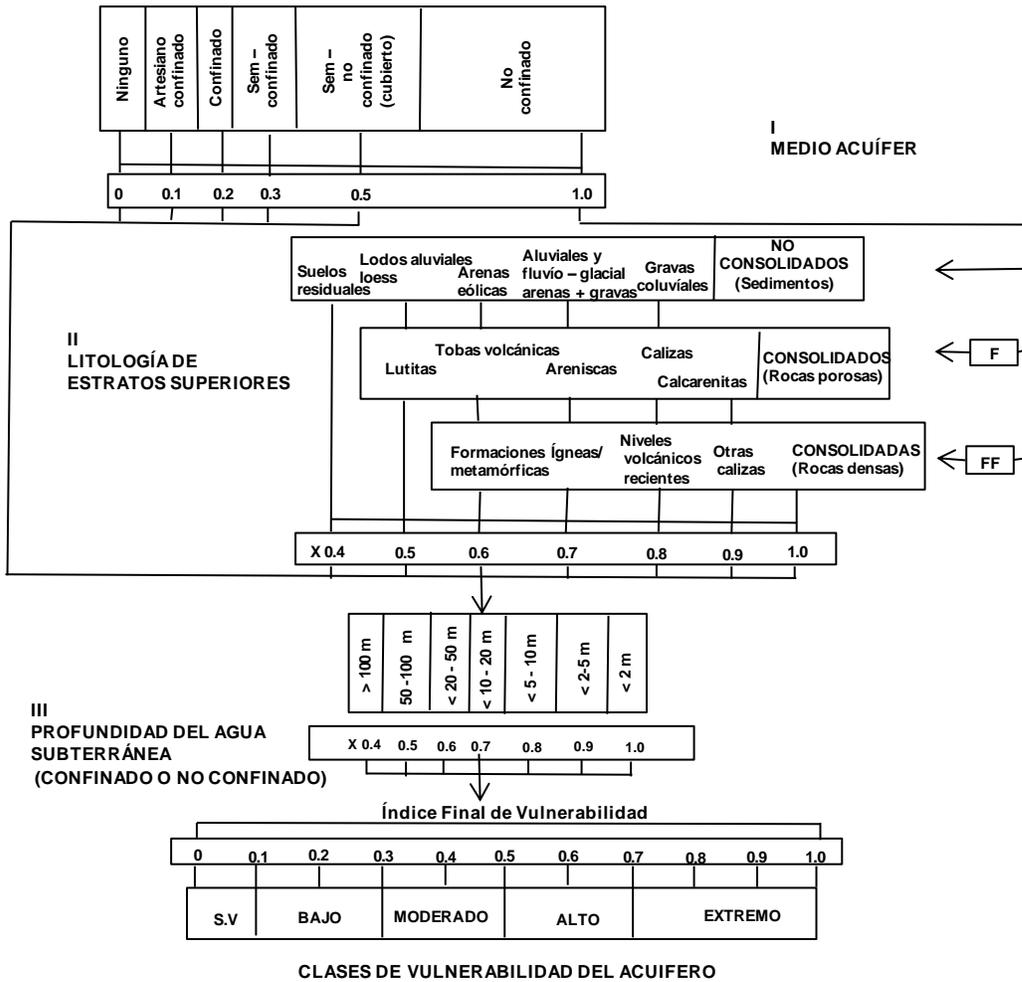


Figura VI.1. Sistema empírico GOD, por medio del cual se realizó el análisis de la vulnerabilidad del acuífero del Relleno Sanitario de Saltillo Coahuila. (traducción de Foster, 1987), (tomado Lizárraga Mendiola L.G 2003).

Clave	Método propuesto						Método God			
	A	B	C	D	E	Simbología	G	O	D	GOD
AL	15.26	2	5	3	7.37	IV	0.3	0.5	0.7	L
NF	16.22	2	3	3	6.8	IV	0.3	0.4	0.7	L
PF	19.25	2	3	3	7.77	IV	0.3	0.4	0.7	L
LG	18.34	2	5	5	7.58	IV	0.3	0.5	0.7	L
RC	39.48	2	3	3	13.84	I	1	0.7	0.6	L
EP	16	2	3	3	6.80	IV	0.3	0.5	0.7	L
MSJ	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
RP	16.89	1	6	6	8.13	III	0.3	0.4	0.7	L
EP	21	1	6	5	9.8	III	0.3	0.4	0.7	L
LT	18.91	1	6	6	9.37	III	0.3	0.5	0.7	L
BL	16.68	1	6	6	8.7	III	0.3	0.5	0.7	L
EPV	49.91	1	6	5	18.47	I	1	0.7	0.6	L

Tabla VI.3. Datos del muestreo, para la evaluación de la vulnerabilidad en el área de estudio

VI.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de las evaluaciones realizadas muestran cierto grado de relación entre ambos métodos. Puede observarse en la carta de vulnerabilidad (Anexo 2) que el área de estudio es subdividida en distintas categorías. Las discrepancias encontradas en el método se deben el tipo y número de datos empleados para cada uno de ellos. Como se definió anteriormente, el método propuesto busca evaluar el medio geológico y el hidrogeológico, así como la influencia antropogénica. El método GOD sin embargo, solamente comprende el análisis de la vulnerabilidad que el medio natural presenta a la entrada de contaminantes (Vrba y Zaporozec. 1994).

El acuífero de poros muestra una alta vulnerabilidad respecto al medio físico natural y una vulnerabilidad muy alta a alta en la relación a la influencia antropogénica de acuerdo al método propuesto. Respecto al acuífero de grietas, el análisis por medio del método GOD determina que el medio físico natural presenta baja vulnerabilidad, lo cual puede comprenderse fácilmente al observar que este método considera el macizo rocoso como impermeable, pero no toma en cuenta que la alta densidad de fracturamiento que este presenta favorece a la porosidad secundaria de la roca. En cuanto al método propuesto, el acuífero de grietas se divide en distinto grado de vulnerabilidad, de acuerdo a la distancia de los pozos a las principales fuentes de contaminación, a la profundidad del nivel freático y el uso de suelo.

El método propuesto para este estudio se consideró de la siguiente forma: zonas de muy alta vulnerabilidad a los pozos AL, NF, PF Y LG, localizados en la cercanía del relleno municipal y en el cruce donde se unen los ríos el Mulato y el Duraznal, su litología que los constituye son de terrazas de espesores de 6 a 13 m. constituidas por limos, arenas, gravas (Figura VI.2), su alta vulnerabilidad se pudiera considerar por esta ubicados en la zona de terrazas y a la presencia de las fuentes de contaminación directamente en el sitio o muy cercanas. Los pozos LP, LT, EP, LB localizados al este y noreste del relleno, localmente en el valle de Saltillo. Esta área se clasificó como alta-baja vulnerabilidad, en donde la profundidad reconocida es entre 16 y 20 m estos pozos se pudieran considerarse que se encuentran en la zona de transición entre el acuífero de poros y el acuífero de grietas. Por último se tiene los pozos EPV Y RC que se localizan en una zona muy baja-baja vulnerabilidad, en donde la profundidad del acuífero es de 30 a 40 m. Esta baja vulnerabilidad pudiera estar relacionada por la cercanía del acuífero y el sistema de fracturamiento que existe en estos pozos, su dirección coincide con la dirección de flujo superficial y el flujo subterráneo.



Figura IVI. 2. - Litología donde se aprecian los pozos de alta vulnerabilidad localizados en el acuíferos de poros.

Como conclusión, la localización de los puntos, la profundidad del nivel freático, tipo de litología, las condiciones del suelo uso, la distancia que existe entre los pozos a las fuentes de contaminación y el tipo de acuífero, son parámetros muy importantes que se tomaron en cuenta para el presente análisis, cabe mencionar que este estudio solo se realizó como una interpretación preliminar de la vulnerabilidad del agua subterránea que cubre el área de estudio. Para tener una mayor confiabilidad en este tipo de estudios se requiere una área mas extensa, así mismo una base de datos con mas información que contenga monitoreos hidrogeológicos y de calidad de agua durante largos periodos de tiempo (años). Complementar también esta base de datos con otros parámetros que indiquen las propiedades hidrodinámicas del acuífero, tales como la velocidad de transporte del agua y de contaminantes, velocidad de infiltración a través de la zona no saturado, su capacidad de atenuar la concentración de contaminantes, Estos parámetros mencionados nos producen zonas de vulnerabilidad para obtenerse con más exactitud y precisión y así determinar las zonas en que exista presencia de contaminantes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Se realizaron conclusiones de cada capítulo conforme al tema desarrollado, destacando lo más importante de manera puntual, enlazándolas con las recomendaciones sugeridas de acuerdo a los resultados obtenidos.

Se elaboraron graficas del clima y temperatura, se determinó el tipo de vegetación, suelo, así como tipo de hidrogeología, fisiografía, química del agua y se realizó la carta geológico-estructural (a escala 1: 40,000) del área de estudio. Por existir una amplia relación con presiones que ejercen las actividades antropogénicas sobre la calidad de agua subterránea, los cambios del diseño de uso de suelo, las cuales vienen asociados al crecimiento de la población, contribuyen a la alteración y disponibilidad de los recursos hidráulicos.

Se interpreta el análisis geológico estructural en el macizo rocoso dentro del área de estudio, donde se concluye que las estación 3 del análisis de fracturamiento, pudiera estar asociada con el flujo del agua superficial ya que conservan la misma dirección y pudiera existir la facilidad del transporte a de lixiviados a aguas subterráneas.

Se realizó la carta hidrogeológico del área a escala 1:40.000 y se determinó la dirección del flujo subterráneo.

Se obtuvieron los resultados del muestreo geoquímico y se evaluó la calidad del agua subterránea en puntos de muestreo seleccionados, observandose que todavía no existe presencia de contaminantes que contribuyan a la afectación de la calidad del agua extraída. Por otro lado, la evaluación de la vulnerabilidad que presenta el agua subterránea, indica que su calidad de agua se ve mayor afectad, siendo las fosas sépticas, letrinas, relleno municipal, granjas porcícolas, así como áreas agrícolas las principales fuentes de contaminación presentes en el área de estudio.

La contaminación del agua subterránea es un claro ejemplo de un riesgo inducido, es decir, que la influencia ejercida por las actividades humanas representan una amenaza hacia la calidad del agua y la conservación del agua subterránea, por lo tanto es importante considerar lo siguiente:

- La contaminación del agua subterránea es un proceso que se lleva a cabo muy lentamente (durante largos periodos de tiempo).

- La falta de concientización de la educación y cultura ambiental origina la atención prestada a esta problemática, la cual es el proceso evitable.
- La contaminación es predecible y su predicción es económicamente viable.
- El proceso de mitigación es más costoso que su predicción.

Es por ello que habiendo identificado de forma preliminar el grado y las zonas de vulnerabilidad en el área de estudio, se propone diseñar un programa de monitoreo, que proporcione una amplia base de datos necesarias para análisis completo de la situación actual que presenta al agua subterránea y un análisis actual, pues las actividades humanas, el diseño de uso de suelo y el grado de explotación del acuífero varían con el tiempo.

RECOMENDACIONES

- Establecer redes de monitoreo hidrogeológicas y de calidad de agua, que cubran una mayor superficie y una menor especificación entre puntos de monitoreo, manteniendo una vigilancia mensual durante largos periodos de tiempo (caso recomendable durante varios años), así como la observación de las precipitaciones ocurridas durante el periodo de monitoreo.
- Concientizar a la población para clausurar definitivamente la depositación de residuos sólidos sin control alguno.
- Diseñar y construir sistemas de geomembranas en relleno ya que no se observó, para que impida el contacto de las precipitaciones con los residuos sólidos y generen los lixiviados que se infiltren hacia el agua subterránea.
- Existen gran cantidad de norias, pozos papalotes al descubierto, es recomendable sellar para impedir el transporte de los contaminantes con mayor facilidad.
- En cuanto a las granjas porcícolas, estos sitios requieren de medidas correctivas que controlen la generación y dispersión de los residuos generados por los animales.

- Pavimentar los caminos de terracería que existen alrededor del relleno, ya que el tráfico es constante la circulan de camiones de desechos industriales, generando un medio de transporte y dispersión de los contaminantes.
- Realizar un estudio de vulnerabilidad más amplio con mas información que contenga monitoreos hidrogeológicos y de calidad de agua durante largos periodos de tiempo (años).
- Proponer sistemas de recolección de lixiviados y gases del relleno sanitario.

BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Rukah Y., Al-Kofahi O. (2001): The assessment of the effect of landfill leachate on ground-water quality-a case study-. El Akader landfill site-north Jordan. *Journal of Arid Environments* no. 49, pp. 615-630.
- Akgün H., Doyuran V. (2000): Environmental geological investigations at the Ven open dump site, southeastem Turkey. *Environmental Geology*, vol.39, no. 6, pp.660-666.
- Anderson B.D., Aguilara V.M., (1986): Push faults, a conceptual model for groundwater exploration in the Sierra Madre Oriental Forleand, Mexico. *Zbl. Geol. Paläont. Teil, I*, NO, 9/10, pp. 1149-1160.
- Barrret M., Howard G., Pedley S., Taylor R., Nalubega M. (2000): A comparison of the extent and impacts of sewage contamination on urban groundwater in developed and developing countries. *Water, sanitation and health Organization Series*. Edited by developing countries. *Water, sanitation and health. World Health Organization Series*. Edited by Chorus I., Ringelband U., Schlog G. and Schmoll O. IWA Publishing, Germany. Pp. 179-185.
- Barton N., Bamford W.E., et al., (1978): Suggested methords for the quantitative description of discontinuities in rock *Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Abstracts*, Vol. 15, no. 6, pp.319-368.
- Bernache, G. (2003). The environmental impact of municipal waste manegement: The case of Guadalajara metro area. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 39, pp.223-237.
- Bocanegra E., Massone H., Martínez D., Civit E., Farengé M. (2001): Groundwater contamination:risk management and assessment for landfills in Mar del Plata, Argentina. *Environmental Geology* vol.40, no. 6, pp.732-741.
- Böhlke J.K. (2002): Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrology Journal*, no.10, pp. 153-179.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). , (2010). Datos en archivos en excel de las temperaturas máximas y mínimas del periodo 2000-2009. De las estaciones climatológicas. Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Fue de 2000 al 2009.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). , (2010). Datos en archivos en excel de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). , (2010). Datos en archivos en excel de la

- precipitación del periodo 2000-2009. De las estaciones climatológicas. Saltillo y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Fue de 2000 al 2009
- Christensen S., Rasmussen K.R., Moller K. (1998): Prediction of regional groundwater flow to streams. *Ground Water* vol. 36, no.2 pp. 351-360.
- Chave P.A. (2000): Groundwater protection policies and practices in the United Kingdom. *Water, sanitation and health. World Health Organization Series.* Edited by Chorus I., Ringelband U., Schlog G. and Schmoll O. IWA Publishing, Germany. Pp. 159-165.
- Custodio E., Llamas M.P. (1996): *Hidrología Subterránea, Tomos I y II, 2ª ed.*, 2100 p. Barcelona.
- Cruz Vega, C.R. (2009): Impacto ambiental originado por los lixiviados del relleno sanitario municipal de Linares, N.L. México. Tesis de Maestría, Fac. Ciencias de La Tierra, U.A.N.L.
- Chave P.A. (2000): Groundwater protection policies and practices in the United Kingdom. *Water, sanitation and health. World Health Organization Series.* Edited by Chorus I., Ringelband U., Schlog G. and Schmoll O. IWA Publishing, Germany. Pp. 159-440 p.
- Dahan O, Nativ R., Ader E., Berkowitz B. (1998): A measurement system to determine water flux and solute transport through fractures in the unsaturated zone. *Ground Water*, Vol. 36, no. 3, pp. 444-449.
- Davis S.N. & De Wiest R. (1971): *Hidrogeología.* Ed. Ariel, 156 p., Barcelona.
- De la Garza-González, S.I. (2000): Estudio geológico/hidrogeológico en la región Citrícola (Linares Hualahuises) Nuevo León, México. Tesis de Licenciatura Fac. Ciencias de La Tierra, U.A.N.L., 131.
- De León-Gomez H., Medina-Barrera F. (2000): Impacto ambiental del tiradero de basurero de Linares/México en las aguas subterráneas. *Actas de XI Congreso Latinoamericano de Geología y III Congreso Uruguayo de Geología, Edición Electrónica CD-Rom, Pag. 1.6 Uruguay.*
- De León Gutiérrez (1999): Investigación sobre las terrazas fluviales del Cañón Santa Rosa, N.L. Como base para el establecimiento de una estratigrafía del Cuaternario en el Noroeste de México. Tesis de maestría Fac. Ciencias de La Tierra, U.A.N.L., 199 pp.
- DeZuane J. (1997): *Handbook of Drinking Water Quality 2ª Ed.* John Wiley & Sons, 575 p.

- Dirección General de Geografía del Territorio Nacional: Carta Estatal de Vegetación y usos Actual Escala 1: 1,000, 0000.
- Dirección General de Geografía del Territorio Nacional: Carta Estatal de Suelos Escala 1: 1,000, 0000.
- Drescher H. (1995): Geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Raum Linares, N.L., México. Diplomarbeit, 177 p. Kiel/Alemania.
- EEC-2000: Guidelines for drinking water quality. EEC 2000.
- Fatter C.W. (1993): Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company, 445. pp.
- Freeze R.A., Cherry J.A. (1979): Groundwater, 1st ed. Prentice Hall, 603 p. Estados Unidos.
- Galván-Mancillas. S.M. (1999): Cartografía-hidrológica de la Terraza baja ente Hualahuises y Linares, N.L., Tesis de Licenciatura, FCT/UANL, 63 pp.
- Gómez, G., Meneses, M., Ballinas, L., Castells, F. Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico. Waste Manegament. Vol. 28, 2008, pp.2465-2471.
- Gogu R.C., Dassargues A. (2000): Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology, vol.39, no. 6, pp. 549-559.
- González R., Marín L.E., Córdova G. (1997): Hydrogeology and groundwater pollution of Yaqui Valler, Sonora, Mexico. Geofísica Internacional, vol. 36, no 1, pp. 49-54.
- González-Morán T., Rodríguez R., Cortés S.A. (1999): The basin of México and its metropolitana area: wáter abstraction and related environmental problems. Journal of South American Earth Sciences, no.12, pp. 607-613.
- Granel C.E., Morris L.B., Carrillo Rivera J.J. (1999): Effects of urbanization on groundwater resources of Merida, Yucatan Mexico. Environmental Geology, vol. 37, no. 4, pp. 303-312.
- Grubb H.F., Carrillo-Rivera J. (1998): Gulf of de México Coast Plain. Hydrogeology, the geology of North America. Geological Society, of America, 524 pp.
- Howard-F. K., Eyles N., Livingstone S. (1996): Municipal landfilling practice and its impact on groundwater resources in and around urban Toronto, Canada. Journal of Hydrogeology, vol.4, no.1, pp. 64-79.
- Hsu Sh.K. (1998): Plan for a groundwater monitoring network in Taiwan. Hydrogeology Journal, no. 6, pp. 405-415.

- Imlay R. W., 1936, Geology of the western part of the Sierra de Parras, Geol. Soc. America Bull., vol. 47.
- Imlay R. W., 1937, Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Geol. Soc. America Bull., vol. 48.
- Imlay R. W., 1938, Studies of the Mexican Geosyncline, Geol. Soc. America Bull., vol. 49.
- INEGI: Carta Hidrológica de Aguas Superficiales Monterrey G14- 7, Escala. 1:250,000.
- INEGI: Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas Monterrey G14- 7, Escala. 1:250,000.
- INEGI: Información estadística de estado de Coahuila www.inegi.gob.mx.
- INEGI Carta Topográfica de Saltillo G14-C33 Escala 1:50 000.
- INEGI Carta Topográfica de Arteaga G14-C34 Escala 1:50 000.
- INEGI 2010: Informe estadístico de Saltillo, Coahuila, México www.inegi.gob.mx.
- Istok J.D., Rautman CH.A. (1996): Probabilistic assessment of ground-water contamination: 2. Results of case study. Ground Water vol. 34, no. 6, pp. 1050-1064.
- Jeong Ch.H. (2001): Effect on land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea. Journal of Hydrology, vol. 253, pp. 194-210.
- KAOSER, S., BARRINGTON, S. y ELEKTOROWICZ, M. Compartments for the managements for the management of municipal solid waste. Solid waste. Soil and Sediment Contamination.
- Langmuir D. (1997): Aqueous environmental geochemistry. Ed. Prentice Hall, 600 pp.
- Lee Ch.H., Chang J.L., Hsu K.T.(1996): Investigation of hydraulic aperture at surface-exposed rock fractures in situ. Geotechnique, vol. 46, no.2, pp.343-349.
- Lee Ch.H., Deng B.W., Chan J.L. (1995): A continuum approach for estimating permeability in naturally fractured rocks. Engineering Geology, no. 39, pp. 71-85.
- Lee Ch.H., Lee Ch. H. (1998): Percolation and dispersion of mass transport in saturated fracture networks. Water Resource Management, no.12, pp.409-432.
- Ling B. (2000): Health impairments arising from drinking water polluted with domestic sewage and exceta in China. Water, Sanitation and Schmoll O. IWA Publishing, Germany. Pp.43-46.
- Lizárraga-Mendoza L.G. (2003): Análisis y evaluación del agua subterránea del área del tiradero municipal y La Petaca, Linares, N.L., México. Tesis de Maestría Fac. Ciencias

de La Tierra, U.A.N.L.

López-Ramos E. (1980): Geología, Toma II, 2a. ed., S.E.P., 454 pp.

Mahar P.S., Datta B. (2000): Identification of Pollution Sources in Transient Groundwater Systems. Water Resource Management no. 14, pp. 209-227.

Masuch-Oesterreich D., Schuster S., Soto-Villalobos R. (1999): A GIS- Based Municipal Groundwater Data Base for Linares, Nuevo León. Artículo enviado a “Geofísica Internacional”, Revista del Instituto de Geofísica, UNAM.

Melloul A.J., Collin M. (1998): A proposed index for aquifer water-quality assessment: the case of Israel's Sharon region. Journal of Environmental Management, no.54, pp. 131-142.

Morán-Zenteno, D. (1994): Geology of the Mexican Republic. AAPG Studies in Geology No.39. Published by the American Association of petroleum Geologists, 160 pp.

Muñoz-Cadena, C.E., Arenas-Huertero, F.J. y Ramón-Gallegos, E. Comparative analysis of the street generation of inorganic urban solid waste (IUSW) in two neighborhoods of Mexico City. Waste Management, Vol. 29, 2009, en prensa.

Murck B.S., Skinner B.J., Porter S.C. (1996): Environmental Geology. John Wiley and Sons, Inc. 535 págs.

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

NOM-001-1996: Norma que establece los límites máximos permisibles para la calidad del agua para uso urbano y agrícola. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

NOM-083-ECOL-1996 (1996): Norma que establece las condiciones que debe reunir los sitios destinados a la disposición final de residuos sólidos municipales www.semarnat.gob.mx.

NOM-084-ECOL-1994 (1994): Norma que establece los requisitos para el diseño de un relleno sanitario y construcción de sus obras complementarias. www.semarnat.gob.mx

Odling N.E., Roden J.E., (1997): Contaminant transport in fractured rocks with significant matrix permeability, using natural fracture geometries. Journal of contaminant Hydrology, no. 27, pp. 263-283.

OJEDA, S. y BERAUD, J.L. The municipal solid waste cycle in Mexico: final disposal. Resources Conservation and Recycling. Vol. 39, 2003, pp. 239-250.

- OJEDA, S. y BERAUD, S., ARMIJO DE VEGA, C. y RAMÍREZ-BERRETO, M.E. The potencial for recycling household waste: a case study from, Mexico. *Environment & Urbanization*. Vol. 12, 2000, pp. 163-173.
- Padilla Sánchez R.J.(1985): Las estructuras de la Curvatura Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. UNAM, Instituto de la Geología, Revista vol.6, no.1, pp. 1-20.
- Peterson-Rodríguez, R.H. (1998): Estudio geológico estructural de una porción del Anticlinorio de Parras, Coahuila, México. Tesis de Licenciatura, Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., México. 108 pp.
- Raisz E., 1964, Provincias fisiográficas, mapa con texto, esc. 1:3,000,000, segunda edición, Cambridge, Mass.
- Rangel-Rodríguez (1989): Hidrogeología de la Ciudad Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, México. Tesis de Maestría, TH-Darmstadt, 97 p.
- Rodríguez de Barbarín C., Barbarín Castillo J.M. (1993): Influencia de la geología regional, los ciclo estaciones y los asentamientos humanos en las características de las aguas superficiales de la cuenca de linares-Cerro Prieto, N.L., México, geofísica internacional, vol. 32, no. 2. pp.221-225.
- Rojas-Ruíz G. y Méndez- Delgado S. (1986): Consideraciones sobre el comportamiento de pozos hidráulicos en terrenos impermeables en la planicie frente a la Sierra Madre Oriental, Nuevo León México. Actas de la Fac. Cienc. Tierra, UANL, vol. 1, pp.88-101.
- Russikoff L., Sherman Sh. J., Sherman A. (2000): Conceptos basicos de quimica. Editorial C.E C.S.A., 520 pp.
- Servicio Geológico Mexicano 2008: Informe de la carta geológico–minera Ramos Arizpe clave G14-A12, escala 1:50,000 Estado de Coahuila y Nuevo León.
- Servicio Geológico Mexicano 1999: Informe de la carta geológico–minera Monterrey clave G14-7, escala 1:250,000 Estado de Nuevo León.
- Snoeyink V.L., Jenkins D. (1990): Química del agua. Ed. LIMUSA, 508 pp.
- Solim M.M., La Moreaux P.E., Memon B.A., et al. (1998): Environmental Hydrogeology. Ed. Lewis Publishers, 386 pp.

- Sidauruk P., Cheng A.H.D., Ouarzar D. (1998): Ground water contaminant source and transport parameter identification by correlation coefficient optimization. *Ground Water*, vol. 36, no. 2, pp.208-214.
- SUMATH. V.R., NATESAN, U. y SARKAR, C. GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill. *Waste Management*. Vol. 28, 2008, pp. 2146-2160.
- Tardy M. 1972. Sobre estratigrafía de la Sierra Madre Oriental en el sector Parras, Coah. distinción de las series Coahuilenses y Parrenses. *Soc. Geol. Mexicana*.
- Tardy M. 1973. Sobre la tectónica de la Sierra Madre Oriental, en el sector de Parras, Coahuila: el cabalgamiento de la serie Parrense. *Sociedad Geológica Mexicana Bol.* 34, No. 1 y 2, p. 63 – 70.
- Tardy M., Longoria J.F., Padilla y Sánchez R.J., et al., (1975): Observaciones generales sobre la estructura de la Sierra Madre Oriental: la aloctonía del conjunto Cadena Atla-Altiplano Central, entre Torreón, Coah. Y San Luis Potosí, S.L.P., México. *Revista del instituto de Geología, U.N.A.M.*, no. 1,pp. 1-11.
- Ting Ch, Sh., Zhou Y., de Vries J.J., Simmers I. (1998): Development of a preliminary ground water flow model for water resources management in the Pingtung Plain, Taiwan. *Ground Water flow model for water resources management in the Pingtung Plain, Taiwan*. *Ground Water* vol. 35, no. 6. pp. 20-36.
- US EPA-2001: Guidelines for drinking water quality. US EPA.
- Van den Brink C., Zaadnoordijk W.J. (1995): Evaluation of ground water contamination from nonpoint source: a case of study. *Ground Water*, vol. 33, no. 3, pp. 356-365.
- Velasco-Tapia et al. (1994): reporte en preparación.
- Vega V. F. J., Mitre S. L. M., Martínez H. E. Contribución al conocimiento de la estratigrafía del Grupo Difunta (Cretácico superior – Terciario en el Noreste de México. *U.N.A.M. Instituto de Geología. Revista* vol. 8 No. 2 p. 179 - 187.
- Vrba J., Zaporozec A. (1994): *Guidabook on Mapping Groundwater Vulnerability*, volume 16. International Association of Hydrogeologists, 131 pp.
- Werner J. (1996): *Introducción a la hidrología* 1ª ed. Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., 174 PP.
- Weidie Jr., AE, 1961, *The stratigraphy and sedimentology of the Parras basin*.
- WHO-2000: Guidelines for drinking water quality. WHO, website.

ANEXOS

Anexo 4.- Resultados obtenidos del muestreo de los análisis químicos con fecha del 28 de abril del 2010

Nombre	Clave	Este	Norte	PH	C.E. (μ mho/cm)	mg/L Dureza de Magnesio como CaCo3	mg/L Dureza de Calcio como CaCo3	mg/L Dureza de Total como CaCo3	mg/L Dureza de Total como CaCo3
El Palmar	EP	293095	2818668	7.25	1,069	283.2	234.3	517.5	158.4
Manantial San Juan	MSJ	293934	2815808	7.31	863	177.0	237.0	414.0	180.0
Noria de Flores	NF	294705	2817390	7.08	1,252	287.6	359.2	646.8	216.0
La Gloria	LG	294885	2818668	7.19	1,263	331,8	243.2	575.0	165.6
Rancho de Castillo	RC	294964	2818632	7.10	1,763	345.1	459.9	805.0	187,2
Puente de Flores	PF	294619	2817532	6.93	2,208	495,6	884.4	1380.0	187.2
Altamira 1	AL	292744	2817829	7.52	2,870	22.1	951.4	973.5	172.8

Clave	mg/L Cloruros (CL)	mg/L Sulfatos (SO4)	mg/L Sólidos Totales	mg/L Sólidos Suspendedidos Totales	mg/L Sólidos Disueltos	NMP/100ml Coliformes Totales	NMP/100ml Coliformes Fecales
EP	38.4	602.5	1344.0	2	1338.0	5	Presencia
MSJ	23.6	144.0	680	2	448.0	DNPC	Presencia
NF	47.3	144.1	810.0	2	806.0	DNPC	Presencia
LG	53.2	115.2	918.0	2	902.0	DNPC	Presencia
RC	54.6	263.4	764.0	8	762.0	DNPC	Presencia
PF	248.6	253.5	1694.0	6	1688.0	77	Presencia
AL	236.8	1030.2	2272.0	8	2270.0	18	Ausencia

Continuación del anexo 4

Clave	mg/L Zinc (Zn)	mg/L Sodio (Na)	mg/L Potasio (K)	mg/L Plata (Ag)	mg/L Cromo (Cr)	mg/l Cobre (Cu)	mg/L Aluminio (Al)
EP	0.018	97.25	1.10	0.010	0.020	0.002	0.15
MSJ	0.003	85.34	0.927	0.010	0.020	0.002	0.15
NF	0.019	152.4	1.20	0.010	0.02	0.003	0.15
LG	0.17	151	1.04	0.010	0.020	0.003	0.15
RC	00.005	158.67	2.34	0.010	0.020	0.002	0.15
PF	0.003	141.36	4.21	0.010	0.020	0.002	0.15
AL	0.198	270.0	3.54	0.010	0.020	0.002	0.003

Clave	mg/L Cadmio (Cd)	mg/L Fierro (Fe)	mg/L Plomo (Pb)
EP	0.003	0.040	0.010
MSJ	0.003	0.020	0.010
NF	0.003	0.020	-----
LG	0.003	0.035	-----
RC	0.003	0.020	0.010
PF	0.003	0.020	0.010
AL	0.003	0.020	0.010

Continuación del anexo 4

Clave	Temperatura (C)	C.E. a 25° C (μ mho/cm)	Potencial hidrógeno (pH)	Potencial REDOX (mV)	Magnesio (mg Mg +2/L)	Nitratos (mg NO ₃ -/L)
EP	24.0	1069	7.25	176	29.7	22.4
MSJ	22.3	863	7.31	206	13.7	11.2
NF	20.8	1252	7.08	193	24.6	27.1
LG	22.1	1263	7.19	212	36.2	19.0
RC	21.7	1763	7.10	212	51.3	32.5
PF	22.1	2208	6.93	126	71.6	32.9

Clave	mg/L Nitratos	mg/L Nitrógeno amoniacal
EP	< 2.0	< 0.5
MSJ	< 2.0	< 0.5
NF	< 2.0	< 0.5
LG	< 2.0	< 0.5
RC	< 2.0	< 0.5
PF	< 2.0	< 0.5