

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA DEL
TIRADERO MUNICIPAL Y LA PETACA, LINARES, N. L., MÉXICO**

TESIS

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

PRESENTA:

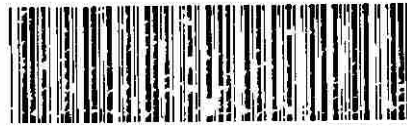
LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA

LINARES, NUEVO LEÓN

JUNIO 2003

TM
Z5818
.E3
PCT
2003
.L5

GUANNA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA MAESTRÍA 2003



1020148516



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA DEL
TIRADERO MUNICIPAL Y LA PETACA, LINARES, N. L., MÉXICO

UANL

TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

PRESENTA:

LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA

LINARES, NUEVO LEÓN

JUNIO 2003



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

HDA. DE GUADALUPE CARR. A CERRO PRIETO KM. 8, A.P. 104
67700 LINARES. NUEVO LEÓN MÉXICO
TELS. (821) 2 43 02 Y 2 20 13, FAX (821) 2 43 26



La tesis

**“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA DEL TIRADERO
MUNICIPAL Y LA PETACA, LINARES, N.L., MÉXICO”**

elaborada por

LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA

ha sido aceptada como requisito parcial para optar al grado académico de

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Vo. Bo.

DIRECTOR DE TESIS

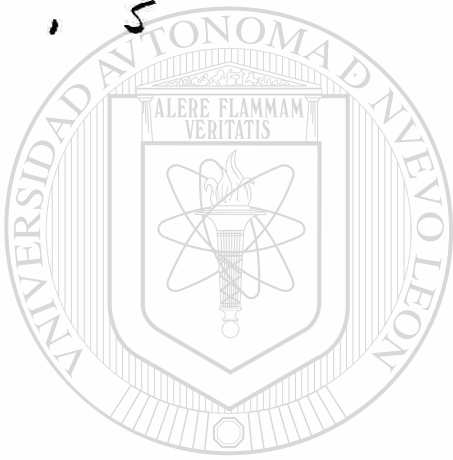
DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

LINARES, N.L.

MAYO 2003

—H
Z5
1.3

003
1.5



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**FONDO
TESIS**



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

HDA DE GUADALUPE CARR A CERRO PRIETO KM 8, A P 104
67700 LINARES NUEVO LEON MEXICO
TELS 821) 2 43 02 Y 2 20 13 FAX (821) 2 43 26



La tesis

**“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA DEL TIRADERO
MUNICIPAL Y LA PETACA, LINARES, N.L., MÉXICO”**

elaborada por

LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA

ha sido aceptada como requisito parcial para optar al grado académico de

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

**Vo. Bo.
COMITÉ DE REVISIÓN**



DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ




DR. FRANCISCO MEDINA BARRERA



DR. JOSÉ DE JESÚS NAVAR CHÁIDEZ
Fac. Ciencias Forestales, UANL

**Vo. Bo.
SUBDIRECTOR DE POSGRADO**



DR. JUAN ALONSO RAMÍREZ FERNÁNDEZ

LINARES, N.L.

JUNIO 2003



**“Análisis y evaluación del agua subterránea del área del
Tiradero Municipal y La Petaca, Linares, N.L., México”**

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos son dedicados a todos aquellos que han contribuido al logro de una más de mis metas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la concesión de la beca-crédito.

Gracias al proyecto PAICyT CT346-00 fue posible la realización de análisis en muestras de agua.

Toda mi gratitud a los Dres. Héctor de León Gómez y Francisco Medina Barrera por su asesoría y apoyo durante el desarrollo de este trabajo, así como por la revisión y correcciones del mismo.

Al Dr. José de Jesús Nívar Cháidez por su asesoría, apoyo técnico y económico durante todo este proceso de mi formación y durante el desarrollo de esta tesis. Un agradecimiento especial por las revisiones de este trabajo y por su invaluable ayuda.

Un sincero agradecimiento al Dr. Fernando Velasco Tapia por sus comentarios y sugerencias.

Al personal docente, técnico y administrativo que labora en la Facultad de Ciencias de la Tierra (FCT) por su ayuda durante mi estancia en esta institución. A mis compañeros becarios y amigos por sus contribuciones y compañía durante la fase de campo.

Mi más grande y profundo agradecimiento a mi familia, por ser parte vital en mi vida, por representar el mayor apoyo que he recibido siempre y por permitirme formar parte de ellos: a mis padres, abuelos y tíos. En especial a Graciela, por toda su paciencia y comprensión durante esta etapa.

ÍNDICE

PÁG.

Lista de figuras	i
Lista de fotos	iii
Lista de tablas	v
Lista de anexos	vii
Nomenclaturas y abreviaturas	viii
Resumen	xi
Summary	xiii
Introducción	xv

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Revisión de literatura	2
1.1.2 Hipótesis	3
1.1.3 Objetivos	3
1.1.4 Metas	4
1.2 Rasgos geográficos	5
1.2.1 Localización y vías de acceso	5
1.2.2 Clima y vegetación	6
1.2.3 Suelos	7
1.2.4 Hidrología	7
1.2.5 Fisiografía	8
1.2.6 Literatura citada	8

CAPÍTULO 2 GEOLOGÍA

Introducción	10
2.1 Metodología	10
2.2 Geología regional	11
2.3 Geología del área de estudio	12
2.4 Estratigrafía	13

2.4.1	Formación Méndez	13
2.4.2	Depósitos terciarios	17
2.4.3	Depósitos cuaternarios	17
2.5	Geología estructural	21
2.6	Discusión y análisis del fracturamiento	23
2.7	Literatura citada	26

CAPÍTULO 3 HIDROGEOLOGÍA

	Introducción	28
3.1	Metodología	29
3.2	Sistema hidrogeológico	31
3.3	Unidades hidrogeológicas	31
3.3.1	Acuífero de poros	32
3.3.2	Acuífero de grietas	32
3.4	Discusión y análisis de carta hidrogeológica	33
3.5	Discusión y análisis del monitoreo mensual	36
3.6	Literatura citada	38

CAPÍTULO 4 HIDROGEOQUÍMICA

	Introducción	40
4.1	Metodología	41
4.2	Distribución de parámetros físicos e hidrogeoquímicos	44
4.2.1	Caracterización hidrogeoquímica del tipo de aguas (según Piper)	51
4.2.2	Caracterización de las aguas según el contenido de TSD	54
4.2.3	Clasificación del tipo de aguas por su dureza	55
4.2.4	Clasificación SAR	55
4.2.5	Parámetros que sobrepasan los límites máximos permisibles (LMP)	57
4.3	Análisis del monitoreo mensual	60
4.4	Variaciones espacio/temporales en las concentraciones	64
4.5	Discusión de resultados hidrogeoquímicos	69
4.6	Discusión sobre la calidad del agua	70

4.7 Literatura citada	72
-----------------------	----

**CAPÍTULO 5 RELACIONES ENTRE GEOLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA E
HIDROGEOQUÍMICA**

Introducción	74
Análisis preliminar y discusión	74

**CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA A
LA CONTAMINACIÓN**

Introducción	76
6.1 Metodología	77
6.2 Análisis de vulnerabilidad del área	79
6.3 Discusión de resultados	83
6.4 <i>Literatura citada</i>	84

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES	86
---	-----------

LITERATURA CITADA	89
--------------------------	-----------

ANEXOS	90
---------------	-----------

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



LISTA DE FIGURAS

PÁG.

Fig. 1	Localización y vías de acceso del área de estudio (Modificado de la carta topográfica Linares G14C58 INEGI, 1999)	6
Fig. 2	Columna estratigráfica general de la Curvatura de Monterrey en el NE de México (modificada de De la Garza-González, 2000)	12
Fig. 3	Estado de las fracturas cuando estas se encuentran cerradas, abiertas y rellenas, (tomado de Barton et al., 1978)	24
Fig. 4	Tipos de intersticios y relación entre la 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 colmatación de los intersticios con materiales finos. (e) La porosidad de las rocas se debe a la disolución. (f) Rocas porosas por fracturación (Davis y De Wiest, 1971)	33
Fig. 5	Camino local del agua a través de las fracturas abiertas (flechas pequeñas). La línea punteada indica la dirección del agua subterránea (Werner, 1996)	34
<hr/>		
Fig. 6	Diagrama de dispersión en el que se indican las variaciones del nivel freático (media) respecto a la duración del monitoreo realizado en el 2002	37
Fig. 7	Comportamiento de la precipitación y la evaporación durante el período de monitoreo realizado en el 2002	37
Fig. 8a	Zona 1: Muestras tomadas del cauce del río Pabillo y sus zonas aledañas. Aguas de tipo cálcico-sulfatadas (predomina el calcio)	52
Fig. 8b	Zona 2: Muestras tomadas en la colonia La Petaca que presentan concentraciones similares. Aguas de tipo cálcico-bicarbonatadas (predomina el calcio)	53

Fig. 8c	Zona 3: Muestras tomadas de los alrededores del antiguo tiradero municipal. Aguas de tipo bicarbonatada-cálcicas (predominan bicarbonatos)	53
Fig. 9	Diagrama de clasificación para aguas destinadas al riego según el U.S. Salinity Laboratory Staff (tomado de Custodio y Llamas, 1996)	56
Fig. 10a,b,c, d,e,f,g,h	Diagramas de distribución de cada elemento analizado durante el monitoreo hidrogeoquímico, indicando las variaciones observadas para cada uno de ellos durante el período de mediciones comprendido entre marzo y agosto del 2002	62
Fig. 11	Análisis de correspondencia canónica para detectar agrupamientos y tendencias de aprovechamientos hidráulicos y elementos químicos analizados en laboratorio, en Linares, N.L. México	65
Fig. 12	Análisis de correspondencia canónica para detectar agrupamientos y tendencias de aprovechamientos hidráulicos y elementos químicos analizados durante el monitoreo mensual, en Linares, N.L. México	66
Fig. 13	Sistema empírico GOD, por medio del cual se realiza el análisis de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación (traducción de Foster, 1987)	81

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTA DE FOTOS

PÁG.

Foto 1	Bloques de areniscas en la parte alta de El Cerrito, con espesor de 1.50 m. El buzamiento de sus estratos tiene una orientación hacia el SE con 42°	14
Foto 2	Bloques de areniscas intercaladas con material lutítico altamente intemperizado, mostrando una estratificación semi-horizontal con 14° de buzamiento hacia el SE. Afloramiento cercano al punto E. (Anexo 1)	14
Foto 3	Bloques de areniscas que muestran un alto intemperismo. Es una secuencia intercalada con rocas lutíticas, localizada en la cima del cerro La Tortuga	15
Foto 4	Distintos grados de intemperismo en rocas lutíticas. Se observa foliación y rellenos de calcita, los que indican antiguas infiltraciones (sobre el flanco N-NE del cerro La Tortuga)	16
Foto 5	Sobre la roca consolidada se deposita una cubierta de suelo intercalada con material calichoso, la cual contiene restos de materia orgánica y raíces. El espesor varía desde pocos cm a 1 m	16
Foto 6	Conglomerados (T 4) poco consolidados, con intercalación de material limoso-arcilloso. Descansa sobre lutitas de la Formación Méndez muy intemperizadas. En la superficie se deposita una cubierta de material húmico. Afloramiento H. (Anexo 1)	18
Foto 7	Conglomerados poco consolidados intercalados con material calichoso, forman la parte superior del acuífero de poros. Sobre la terraza No. 3 se asienta la colonia La Petaca	19

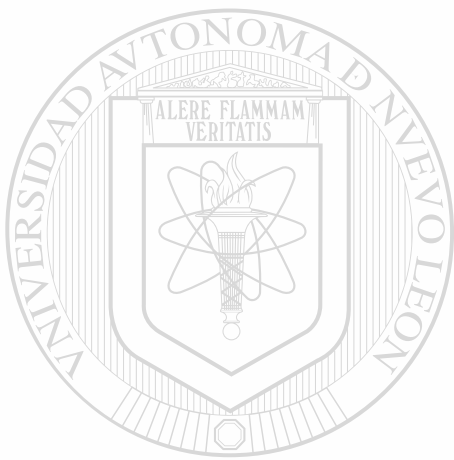
Foto 8	Terraza No. 1 sobre el cauce del río Pabillo. Estos son los sedimentos aluviales más recientes, ya que continuamente se están retransportando y depositando. Presenta una interacción de influencia del río con el acuífero de poros	20
Foto 9	Residuos sólidos en contacto directo con las rocas fracturadas. La apertura entre fracturas y la ausencia de geomembranas facilitan la infiltración de lixiviados hacia el subsuelo. El nivel freático se localiza a 17 m de profundidad en esta zona	25
Foto 10	Punto de monitoreo (P16). Equipo empleado para la localización de los aprovechamientos hidráulicos y el estudio hidrogeológico (sonda sonora, GPS y altímetro)	29
Foto 11	Punto de observación (P39), en el que se observa la litología del acuífero que comprende las gravas semi-cementadas con material arcilloso de la terraza No. 3. La profundidad del nivel freático es de 11.33 m	32
Foto 12	Titulación de una solución (EDTA); el pH es controlado por un potenciómetro (a) para obtener la concentración de dureza parcial.	45
Laboratorio de geoquímica, Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L.		
Foto 13	Filtración al vacío de muestras para la obtención de los sólidos disueltos	46
Foto 14	Determinación de la alcalinidad de las muestras mediante un método volumétrico ácido-base	46
Foto 15	Residuos sólidos de todo tipo depositados sin control en el tiradero municipal; incluyen envases de aceites y grasas, sólidos oxidables; se encuentran sin cubierta impermeable	69
Foto 16a, b	Combustión de los residuos sólidos generando además de la infiltración de lixiviados al subsuelo, proliferación de gases en la atmósfera	70

LISTA DE TABLAS

PÁG.

Tabla 1	Descripción de las aperturas en base a su separación (tomado de Barton et al., 1978)	24
Tabla 2	Información tomada de Drescher (1995) para el acuífero de poros dentro del área de estudio	35
Tabla 3	Parámetros hidrodinámicos en diferentes medios acuíferos (citados por algunos autores)	35
Tabla 4	Métodos empleados para el análisis hidrogeoquímico de las muestras en Laboratorio	42
Tabla 5	Clasificación según Piper por iones predominantes (Custodio y Llamas, 1996)	52
Tabla 6	Clasificación del tipo de aguas en base a su conductividad eléctrica (Custodio y Llamas, 1996)	52
Tabla 7	Clasificación hidrogeoquímica de las muestras tomadas durante el 2002 en el área de estudio	54
Tabla 8	Clasificación del tipo de aguas en base a su concentración del total de sólidos disueltos (Davis & De Wiest, 1971; Werner, 1996))	54
Tabla 9	Clasificación del tipo de aguas en base a su dureza (como CaCO ₃ mg/L). Tomada de Custodio y Llamas, 1996	55
Tabla 10	Tipo de aguas para riego según el Salinity Laboratory Staff (Custodio y Llamas, 1996)	56
Tabla 11	Límites máximos permisibles (LMP) establecidos por diversos organismos para la calidad del agua	60

Tabla 12	Datos recopilados a lo largo del periodo de monitoreo, aplicados para la evaluación de la vulnerabilidad en el área	78
Tabla 13	Parámetros de clasificación empleados en base a las características del área de estudio	79
Tabla 14	Resultados obtenidos del análisis de vulnerabilidad empleando dos métodos de análisis	82



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Carta geológica-estructural del área del Tiradero municipal y La Petaca, Linares, N.L., México

Anexo 2 Perfiles geológicos en cerro La Tortuga

Anexo 3 Localización de los aprovechamientos hidráulicos monitoreados y las características litológicas de los acuíferos explotados

Anexo 4 Carta hidrogeológica del área del Tiradero municipal y La Petaca, Linares, N.L., México

Anexo 5 Registro de la información obtenida en los distintos aprovechamientos hidráulicos durante el monitoreo llevado a cabo en los meses de febrero a septiembre del 2002

Anexo 6 Perfiles hidrogeológicos del área Tiradero municipal-La Petaca, Linares, N.L., México

Anexo 7 Resultados obtenidos durante los análisis químicos realizados en laboratorio el 5 de marzo del 2002

Anexo 8 Resultados de análisis químicos realizados durante el monitoreo hidrogeoquímico

Anexo 9 Características físicas de los puntos de muestreo

Anexo 10 Carta de vulnerabilidad del área del Tiradero municipal y La Petaca, Linares, N.L., México

NOMENCLATURAS Y ABREVIATURAS

ac	Diaclasas de extensión
AP	Aprovechamientos hidráulicos
As ⁺²	Ión Arsénico
Ba ⁺²	Ión Bario
BaSO ₄ ²	Sulfato de bario
°C	Grados centígrados
Ca ⁺²	Ión Calcio
CaCO ₃	Carbonato de calcio
C.E.	Conductividad eléctrica
Cl	Ión Cloruro
cm	Centímetros
CNA	Comisión Nacional del Agua
Com. Pers.	Comunicación personal
CO ₂	Dióxido de carbono
CVM	Cinturón Volcánico Mexicano
Dbas	Distancia al tiradero municipal
Dmarr	Distancia a granjas porcícolas
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
D.T.	Dureza total
ECOL	Ecología
EDTA	Ácido etilendiamintetraacético
EEC	European Economic Community
et al.	Y colaboradores
Fac.	Facultad
Fig.	Figura
GM	Golfo de México
GPS	Geoposicionador satelital
hk0	Diaclasas de cizallamiento o corte
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

K	Ión Potasio
K	Permeabilidad
k	Conductividad hidráulica
km ²	Kilómetros cuadrados
LMP	Límite máximo permisible
M	Metros
mm	Milímetros
m/d	Metros por día
meq	Miliequivalente
mg/L	Miligramos por litro
Mg ⁺²	Ión Magnesio
μ mhos/cm	Micromhos por centímetro
mmhr	Milímetros por hora
m ³	Metros cúbicos
msnm	Metros sobre el nivel del mar
N	Norte
NE	Noreste
N.L.	Nuevo León
NMP	Número más probable
No.	Número
NOM	Norma
PAICyT	Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica
PCG	Planicie Costera del Golfo
PEMEX	Petróleos Mexicanos
Piez	Piezometría
pH	Potencial de hidrógeno
PO ₄ ⁻³	Fosfato
ppm	Partes por millón
R ²	Coefficiente de variación
RH	Región hidrológica
nNa	Miliequivalentes de sodio

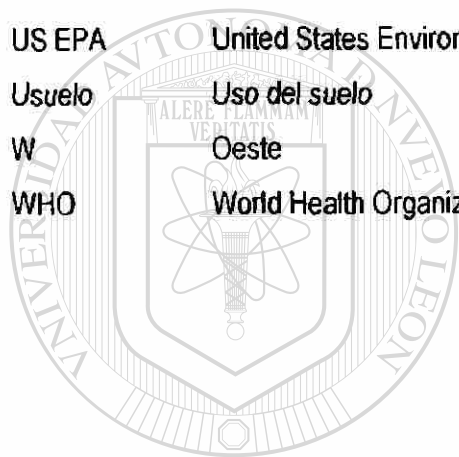
U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RP-1	Río Pablillo – 1
SAR	Índice de adsorción del sodio
SE	Sureste
Se ²	Selenio
SEV's	Sondeos eléctricos verticales (Schlumberger)
SMO	Sierra Madre Oriental
SO ₄ ²	Sulfatos
SW	Suroeste
T1 (2,3,4,5)	Terraza No. 1 (No. 2, No. 3, No. 4, No. 5)
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
US EPA	United States Environmental Protection Agency
Usuelo	Uso del suelo
W	Oeste
WHO	World Health Organization



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RESUMEN

En el área de estudio existen fuentes de contaminación puntuales (tiradero de basura municipal) y difusas (granjas porcinas, fosas sépticas y letrinas, zonas agrícolas, ganaderas, vertido de aguas residuales municipal e industriales) que favorecen la infiltración de contaminantes hacia el agua subterránea. Esta se transporta a través de dos medios acuíferos de profundidad somera, que están conectados hidráulicamente: el de grietas formado por las rocas de la Formación Méndez, que permiten 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 antiguo tiradero municipal, en el que se depositaron aproximadamente 300,000 toneladas de residuos sólidos durante su período de actividades, comprendido entre 1980-2001. Este sitio carece del diseño de sistemas colectores de lixiviados y gases, así como geomembranas que eviten su infiltración hacia el agua subterránea (NOM ECOL-084-1994; NOM-ECOL-083-1996). La dirección principal del fracturamiento coincide con la dirección general del flujo del agua subterránea (SW-NE) y con el transporte de contaminantes a través de las líneas de flujo subterráneo. Sobre el acuífero de poros se concentra la mayor influencia antropogénica, ya que es ahí donde se ubican las fosas sépticas y letrinas.

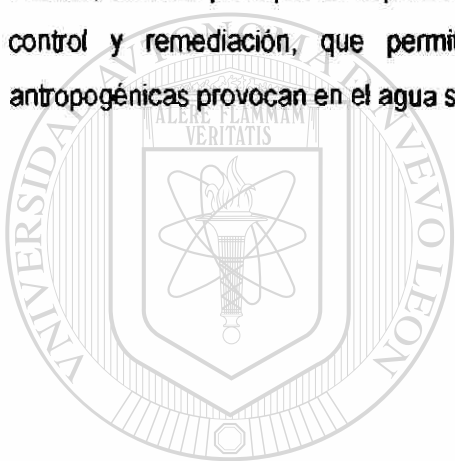
Se realizaron análisis físicos, químicos, bacteriológicos y de metales pesados en muestras de agua evaluados en base a normas oficiales según el consumo humano, doméstico y agrícola.

Según los LMP establecidos para agua potable, existen altas concentraciones de sólidos disueltos, coliformes totales y fecales; contaminación por sulfatos, según WHO, por nitratos, según USEPA, WHO, EEC y NOM-ECOL-127-1996, por bario, según la NOM-ECOL-127-1996 y por mercurio, según USEPA, WHO, EEC y NOM-ECOL-127-1996.

De acuerdo a los parámetros uso de suelo, uso del agua, tipo de acuífero, 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 evalúa 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 a la presencia de actividades urbanas (especialmente sobre el cauce del río Pabillo). Por otro lado, el acuífero de grietas es considerado como de baja vulnerabilidad respecto al medio natural, mientras que los grados de 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 antiguo tiradero municipal, granjas porcinas, poliductos de hidrocarburos, así como las fosas sépticas y letrinas, representan la principal amenaza a la calidad del agua subterránea (pozos y norias en Linares y La Petaca) y escurrimientos superficiales (río Pabillo, colector principal de la presa Cerro Prieto). En el presente trabajo se proponen medidas de control y remediación, que permitan disminuir el impacto ambiental que las actividades antropogénicas provocan en el agua subterránea.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SUMMARY

In the study area exist sources of puntual (municipal landfill) and diffuse contamination (porcine farms, septic tanks, latrines, agricultural zones, cattle zones, domestic and industrial residual water spills) that favours the infiltration of polluting agents towards the ground water. This flows are transported through two aquifer types of shallow depth, which are connected hydraulically: the fractured aquifer is formed by rocks of the Méndez Formation, that allows the infiltration of leachates and its transport through the fracturing (secondary porosity), and the porous aquifer is made up of semi-consolidated granular sediments (conglomerate, gravel) of high permeability.

On the fractured aquifer the municipal landfill is located, in which were deposited around 300.000 tons of solid wastes during its period of activities, comprended between 1980-2001. This site lacks of the design of collectors systems of leachates and gases, as well as geomembranes that avoid their infiltration towards the ground water (Nom-Ecol-084-1994; Nom-Ecol-083-1996). The main direction of the fracturing correspond with the main direction of the ground water flow (SW-NE) and with the transport of polluting agents through the ground water flow lines. On the porous aquifer the antropogenic influence is concentrated, due to there is where the septic tanks and latrines are located.

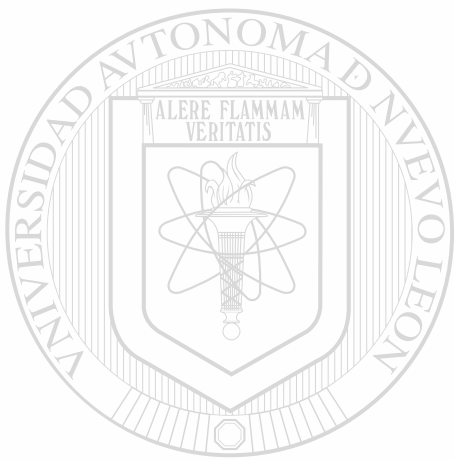
Physical, chemical, bacteriological and of heavy metals analyses were made in water samples, and the results were evaluated on the basis of official norms according to the human consumption, agricultural and domestic use. According to the established Permissible Maximum Limits for potable water, high dissolved solid concentrations and total and fecal coliforms exist, as well as contamination by sulphates (WHO), nitrates (USEPA, WHO, EEC and Nom-Ecol-127-1996), barium (Nom-Ecol-127-1996) and mercury (USEPA, 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 sources, has been proposed a method to evaluate the conditions of vulnerability that the ground water presents. In addition, method GOD is applied (Foster, 1987) to evaluate the conditions of vulnerability with respect to the natural media (G = aquifer media, O = litology of overall layers, D = depth of phreatic level), that evaluate 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 to the presence of urban activities (specially on the Pabillo river channel). On the other hand, the fractured aquifer is considered as low vulnerability with respect to natural environment,

whereas the degrees of vulnerability respecting to the antropogenic activities vary depending on the distance towards the main sources of contamination, the depth of phreatic level and the soil use.

It 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 Linares and La Petaca) and superficial flows (Pabillo river, main collector of the Cerro Prieto Lake). In the present work measures of control and remediation are proposed, that contribute to diminish the environmental impact that the antropogenic activities cause in the ground water.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

INTRODUCCIÓN

La población en el Municipio de Linares Nuevo León se ha ido incrementando de 33,012 habitantes en 1980 a 69,205 habitantes en el 2000 (INEGI, 2001). El constante crecimiento de su población, así como el desarrollo de las actividades industrial, agrícola y los diferentes usos de suelo, demandan una mayor cantidad de agua con la calidad adecuada para satisfacer sus necesidades, ejerciendo presión sobre los acuíferos del área. Parte del agua que se consume es extraída del subsuelo. Existen numerosos aprovechamientos hidráulicos –pozos y norias- que son utilizados para satisfacer las demandas municipales (consumo humano, doméstico, comercial, residencial y de servicios), agrícolas, ganaderas e industriales de la región.

Existen indicios de sobre-explotación y contaminación del agua subterránea (De León-Gómez y Medina-Barrera, 2000) y de aguas superficiales (Rodríguez de Barbarín y Barbarín-Castillo, 1996; Návar, 1999; 2001; Flores-Laureano y Návar, 2002) en el nordeste de México. 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 Skinner, 1996; Jeong, 2001; Edmunds, et al., 2002).

Las fuentes de contaminación del agua subterránea se han clasificado como difusas y puntuales. En el área de Linares, los cambios de uso del suelo de matorrales nativos a terrenos agropecuarios desmontaron el 1.9% del municipio durante el periodo de 1973 a 1993 (Treviño et al., 1996), causando probablemente la aparición de fuentes difusas de contaminación. Los residuos sólidos (basureros municipales, residuos industriales) y líquidos (lagunas de oxidación, descargas municipales en los ríos, letrinas y fosas sépticas), además de otros, son causantes de la contaminación puntual.

En la región de Linares existen antecedentes de contaminación de acuíferos por nitratos (De León-Gómez y Medina-Barrera, 2000). Aunque las fuentes de origen no se han determinado, se sugiere que pueden ser el tiradero de basura municipal y las granjas porcícolas localizadas en las vecindades del mismo sitio. A pesar de esta problemática ambiental con repercusiones sociales, económicas, ecológicas y sanitarias, no se han realizado trabajos para evaluar la contaminación, sus fuentes, sus variaciones espacio7temporales así como las condiciones de vulnerabilidad en los acuíferos de la región.

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

En la región de Linares, N.L. México existen diversas zonas que facilitan la probable infiltración de contaminantes hacia el agua subterránea. En dirección SW-NE fluye el río Pabillo, el cual presenta una directa conexión hidráulica con el agua subterránea. Sobre su cauce se descargan aguas residuales de origen doméstico e industrial.

En la parte Este de la mancha urbana se localiza el tiradero municipal, en el cual se depositaron alrededor de 300,000 toneladas de residuos sólidos domésticos, municipales e industriales durante su periodo de actividad, que abarcó desde 1980 a febrero de 2000, año de su clausura. Este sitio fue ubicado directamente sobre el macizo rocoso, en una estructura de lomerío. Carece de sistemas de drenaje que desvían los escurrimientos superficiales producto de la precipitación, de una geomembrana en su base 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 (NOM-ECOL-084-1994; NOM-ECOL-083-1996).

A 590 m al Oeste del antiguo tiradero se ubican granjas porcícolas, que mantienen una intensa actividad y escasas medidas de control de aguas superficiales, originando fuentes potenciales de contaminación puntual del acuífero. Entre las principales sustancias contaminantes que pueden generarse, se encuentran bacterias, virus, cloruros y nitratos, los cuales al entrar en contacto con el agua de precipitación pueden infiltrarse al subsuelo, según lo mencionan en trabajos relacionados Tchobanoglous (1993), Fetter (1993) y Murck y Skinner (1996).

Muy cerca del cauce del río Pabillo se encuentra la colonia La Petaca, en donde la red de drenaje es compuesta principalmente por fosas sépticas y letrinas, en donde se descargan las aguas residuales generadas por los habitantes, generando fuentes difusas de contaminación. Distribuidas por el área de estudio se localizan zonas de cultivos, así como aprovechamientos hidráulicos que sirven para fines de consumo humano, uso doméstico, riego y consumo de animales.

La preservación 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 del agua subterránea y el medio geológico adquiere mayor importancia cuando este último favorece la entrada de contaminantes hacia el acuífero, por lo tanto, es necesario conocer el comportamiento geológico/estructural y su conexión con las condiciones hidrogeológicas existentes en el área, así como observar estas variaciones tanto en espacio como en tiempo, que permitan analizar de manera preliminar la vulnerabilidad que el acuífero presenta a la contaminación.

1.1.1 REVISIÓN DE LITERATURA

La cercanía entre las provincias de la Sierra Madre Oriental (SMO) y la Planicie Costera del Golfo (PCG) ha originado el interés de algunos investigadores en estudiar la situación geológica, tectónica, así como condiciones hidrogeológicas para la prospección de agua, entre otras.

En 1978 Padilla y Sánchez elaboró un estudio geológico/estructural de la SMO en el área entre Linares-San Roberto. En 1986 Rojas-Ruiz y Méndez-Delgado realizaron un estudio para determinar el comportamiento del agua subterránea en la Ciudad Universitaria. Rangel-Rodríguez (1989) realizó un estudio hidrogeológico en el Centro de Producción Agropecuaria de la UANL, en Linares, Nuevo León, teniendo como objetivo principal la prospección de sitios de explotación para su aprovechamiento. Rodríguez de Barbarin y Barbarin-Castillo (1993) realizaron una evaluación de los efectos que pueden ejercer el ambiente geológico, el clima y los asentamientos humanos en la calidad del agua transportada a través de los principales cauces que atraviesan Linares (ríos Pabillón, Camacho, Hualahuises y Camachito).

En 1993, De León-Gómez desarrolló un estudio geológico/hidrogeológico en el área de la presa Cerro Prieto en Linares, para realizar una evaluación sobre el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Prado (1997) aplica métodos geofísicos (SEV's) para investigar zonas de canales de gravas en el área de Hualahuises-Linares, elaborando prospecciones geoelectricas entre estas zonas. De León-Gutiérrez (1999) establece una estratigrafía del Cuaternario en el Noreste de México. De la Garza-González (2000) realizó un estudio geológico-hidrogeológico en el área Linares-Hualahuises, N.L., para la explotación moderada del acuífero.

Los trabajos mas recientes relacionados con el area de estudio fueron publicados por De León-Gómez y Medina-Barrera (2000). Ambos investigadores realizaron un estudio sobre los procesos de contaminación del agua subterránea por lixiviados originados en el tiradero municipal en Linares, N.L., realizando diversos análisis de calidad del agua. Cabe señalar que este estudio en particular se considera un antecedente para la realización del presente trabajo de tesis.

1.1.2 HIPÓTESIS

En la zona de estudio existen las condiciones geológicas e hidrogeológicas que favorecen la entrada y el transporte de contaminantes hacia los acuíferos alterando la calidad del agua. Los contaminantes provienen de fuentes puntuales y difusas y muestran variaciones espacio/temporales por una interacción de factores físicos y bióticos.

1.1.3 OBJETIVOS

El presente trabajo de investigación se desarrolló con el principal objetivo de 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 contaminantes al acuífero.

Al determinar lo anterior, las condiciones geológicas e hidrogeológicas que conllevan a estas variaciones fueron evaluadas, permitiendo detectar las posibles fuentes emisoras de contaminantes y delimitar las zonas de vulnerabilidad a la contaminación. Para ello se plantearon los siguientes 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 en el área, manteniendo un monitoreo mensual del nivel freático en los diversos aprovechamientos hidráulicos existentes y disponibles en la zona

- Realizar análisis físicos, químicos y bacteriológicos en laboratorio de 10 muestras de agua y 7 muestras más para el análisis de la concentración de metales pesados, las cuales fueron extraídas de aprovechamientos hidráulicos previamente seleccionados para determinar las concentraciones actuales de los elementos en el agua en condiciones de ausencia de precipitación
- Realizar mensualmente análisis físicos y químicos cuantitativos de aproximación en muestras de agua tomadas en los 10 aprovechamientos hidráulicos seleccionados, para determinar si existen variaciones espacio/temporales detectables
- Revisar las normas oficiales que establecen límites máximos permisibles (LMP) para el consumo de agua potable, agrícola y uso urbano, determinando si existen zonas que presentan contaminación
- Identificar las zonas más vulnerables a la contaminación y evaluar la influencia que ejercen fuentes puntuales y difusas sobre la calidad del agua subterránea
- Proponer alternativas de remediación y control de la contaminación al medio acuifero

1.1.4 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 carta la geológica-estructural (a escala 1:10,000) se representan las condiciones de fracturamiento existentes en el macizo rocoso, que permiten identificar la relación entre sus orientaciones principales, la infiltración y el movimiento horizontal del agua subterránea, así como de sus contaminantes
- En la carta hidrogeológica (a escala 1:10,000) se representan las direcciones preferentes del flujo del agua subterránea, observando además mediante histogramas las fluctuaciones mensuales en el nivel piezométrico
- 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 representen 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 período 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

1.2 RASGOS GEOGRÁFICOS

1.2.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio se localiza en la periferia Este de la ciudad de Linares. Las coordenadas del área quedan comprendidas entre los paralelos $24^{\circ} 50'$ y $24^{\circ} 52' 30''$ de latitud Norte y los meridianos $99^{\circ} 33' 48''$ y $99^{\circ} 30' 39''$ de longitud Oeste y abarca una superficie aproximada de 36 Km². El área de estudio es atravesada transversalmente por las vías de ferrocarril en el tramo Monterrey-Tampico y se comunica a través de la carretera Linares-Lucio Blanco. De Norte a Sur atraviesa la carretera que comunica Linares-Villagrán y de Oeste a Noreste se comunica mediante el camino que conecta a Linares con la presa Cerro Prieto. Existen además caminos de terracerías que comunican a Linares con rancherías y comunidades circunvecinas (Fig. 1).

climas subtropicales o semi-áridos del Nordeste de México. Se caracteriza por la presencia de arbustos medianos de 1 a 2 m de altura, compuestos predominantemente por especies inermes y más o menos caducifolias, combinadas con especies espinosas. Entre las primeras, las más comunes son: *Leucophyllum texanum* (cenizo), *Cordia boisieri* (anacahuita), *Portiera angustifolia* (guayacán). Entre las segundas especies se encuentran: *Acacia rigidula* (chaparro prieto), *Pithecellobium brevifolium* (tenaza), *Lycium Carolinianum* (cruceto), entre otras.

1.2.3 SUELOS

La cubierta superficial más reciente en el área es compuesta por suelos provenientes del material aluvial, predominando en la zona del valle los Vertisoles que tienen textura arcillosa. Los suelos localizados en las laderas y sobre los lomeríos tienen una textura limo-arenosa, clasificados como Rendzinas con un cementante calichoso (INEGI, 1996; Manzano-Camarillo, 1997).

1.2.4 HIDROLOGÍA

La zona queda comprendida en la porción N de la Subcuenca del río Limón (río Pablillo), localizada a su vez dentro de la Cuenca del río San Fernando, en la Región Hidrológica RH-25 San Fernando-Soto La Marina, abarcando una superficie de 1708 km² (INEGI, 2001). El drenaje es de tipo dendrítico e intermitente, conformado por el río Pablillo el cual nace al SW del área, en la Sierra Madre Oriental. Su cauce atraviesa transversalmente de SW a NE el área hasta desembocar en la presa Cerro Prieto, siendo su colector principal; aporta un promedio anual de 138 millones de m³ (De León-Gómez, 1993). Existen además pequeños tributarios que se desprenden de las elevaciones al S y SW del área.

1.2.5 FISIOGRAFÍA

La zona de estudio se localiza al pie de la Sierra Madre Oriental (SMO), dentro de la Planicie Costera del Golfo (PCG). Esta ubicación la convierte en una zona transicional entre estas dos provincias fisiográficas, ya que está formada por un amplio valle cubierto por material aluvial, en el que se localizan algunos lomeríos de poca elevación. Dichos lomeríos están constituidos por rocas lutíticas de la Formación Méndez las cuales están altamente fracturadas. El intenso fracturamiento es producto de los esfuerzos compresivos que actuaron en la deformación sobre la SMO durante la Orogenia Laramide (Padilla y Sánchez, 1978; 1985). La cercanía del área de estudio respecto al pie de la SMO permite suponer que los pequeños plegamientos que aquí se localizan, así como su intenso fracturamiento son producto de dichos eventos compresivos. Sobre los valles se depositan sedimentos de origen aluvial en diferentes terrazas o niveles de edad cuaternaria, producto de la erosión de rocas consolidadas.

1.2.6 LITERATURA CITADA

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 p.

De León-Gómez H. (1993): Evaluación de las experiencias durante la operación de la Presa Cerro Prieto, Linares N.L., México, en la perspectiva de la Ingeniería Geológica e Hidrogeología. Universidad Técnica de Aachen, Alemania. Tesis doctoral.

De León-Gómez H., Medina-Barrera F. (2000): Impacto ambiental del tiradero de basura de Linares/México, en las aguas subterráneas. Actas del XI Congreso Latinoamericano de Geología y III Congreso Uruguayo de Geología, Edición Electrónica CD-Rom, Pág. 1-6 Uruguay.

De León-Gutiérrez (1999): Investigación sobre las terrazas fluviales del Cañón Santa Rosa, Iturbide, N.L., como base para el establecimiento de una estratigrafía del Cuaternario en el Noreste de México. Tesis de Maestría Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., 119 pp.

Fetter C.W. (1993): Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company, 445 pp.

González-Elizondo M. (1996). Análisis de la vegetación secundaria de Linares, N.L., México. Tesis de Maestría Fac. Ciencias Forestales, U.A.N.L., 103 pp.

INEGI(1996): Carta Edafológica Linares G14C58. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

INEGI (2001): Información estadística de los estados en la República Mexicana. www.inegi.gob.mx

- Manzano-Camarillo M G F (1997) Procesos de desertificación asociados a sobrepastoreo por caprinos en el matorral espinoso de Linares, N.L. Tesis de Maestría Fac. Ciencias Forestales, U.A.N.L., 87 pp.
- Murck B. S , Skinner B J , Porter S C. (1996) Environmental Geology. John Wiley and Sons, Inc. 535 págs.
- Navar-Chaidez J., Synnott T J (2000): Soil infiltration and land use in Linares, N.L., Mexico. TERRA vol. 18, no. 3, pp. 255-262.
- NOM-083-ECOL-1996 (1996): Norma que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los 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 la construcción de sus obras complementarias. www.semarnat.gob.mx
- Padilla y Sánchez R.J. (1978): Bosquejo geológico-estructural de la Sierra Madre Oriental en el área Linares-Galeana-San Roberto, Estado de Nuevo León. Revista del Instituto de Geología, U.N.A.M., vol. 2, no. 1, pp. 45-54.
- Padilla y Sánchez R.J. (1985): Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. UNAM, Instituto de Geología, Revista vol. 6, no. 1, pp. 1-20.
- Prado (1997). Aplicación de métodos geofísicos (SEV's) para investigar zonas de canales de gravas en el área de Hualahuises-Linares, Nuevo León, México. Tesis de Licenciatura Fac. Ciencias de la Tierra U.A.N.L., 97 pp.
- 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 Barbarin C., Barbarin-Castillo J.M. (1993): Influencia de la geología regional, los ciclos estacionales y los asentamientos humanos en la caracterización de las aguas superficiales de la cuenca de Linares-Cerro Prieto, N.L., México. Geofísica Internacional, vol. 32, no. 2, pp. 221-235.
- Rojas-Ruiz G. y Méndez-Delgado S. (1986): Consideraciones sobre el comportamiento de pozos hidrológicos en terrenos impermeables en la Planicie frente a la Sierra Madre Oriental, Nuevo León, Mexico. Actas Fac. Cienc. Tierra, UANL, vol. 1, pp. 88-101.
- Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S.A. (1994): Gestión ambiental de residuos sólidos. Ed. McGraw-Hill, 1107 pp.

CAPÍTULO 2 GEOLOGÍA

INTRODUCCIÓN

El área de estudio se localiza al NE de México dentro de la SMO en su parte marginal Este, provincia que se vio influenciada por los eventos compresivos que la deformaron. Las estructuras existentes en el área de estudio presentan una orientación general al NW–SE, que concuerda con el tren estructural de la SMO. El intenso fracturamiento que predomina en las rocas es debido a dichos esfuerzos compresivos (Tardy et al., 1975; Padilla y Sánchez, 1978; 1985). La geología del área la conforman rocas de la Formación Méndez de edad cretácica, así como conglomerados terciarios y sedimentos aluviales del Cuaternario.

Rocas consolidadas pertenecientes a la Formación Méndez son compuestas principalmente por lutitas y areniscas 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 el acuífero de poros, cuyo espesor somero y sus propiedades de permeabilidad facilitan la infiltración y el transporte de contaminantes. En el presente capítulo se determina la relación existente entre estas dos unidades acuíferas y la forma en que favorecen la entrada de contaminantes.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

2.1 METODOLOGÍA

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La metodología de trabajo consistió en la revisión de fotografías aéreas, consulta de mapas y recorridos de campo. El papel que desempeña el macizo rocoso en el área desde el punto de vista de la permeabilidad, puede evaluarse partiendo de la observación directa de su composición geológica, la medición del espesor de conglomerados en los distintos aprovechamientos hidráulicos y el estado tectónico que presentan los afloramientos estudiados.

Para tal efecto, se llevó a cabo la cartografía geológica a detalle con base en un mapa topográfico de escala 1:10,000 así como el inventario tectónico, considerando mediciones de rumbo de buzamiento medidos con brújula Clar en todos los afloramientos disponibles en el área.

Posteriormente, la información obtenida durante la cartografía fue digitalizada mediante el programa CANVAS 6 y los datos estructurales fueron analizados por medio del programa StereoNet. Las proyecciones estereográficas se incluyeron en la carta geológica-estructural (Anexo 1).

2.2 GEOLOGÍA REGIONAL

La SMO es una cadena montañosa de origen estructural, formada por una serie de plegamientos alargados orientados al NNW–SSE. Es compuesta por una gruesa secuencia de rocas carbonatadas y terrigenas 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 paleogeográfica (Padilla y Sánchez, 1978; 1985; Meiburg et al., 1987; Michalzik, 1987; Peterson-Rodríguez, 1998; 2001; De León-Gutiérrez, 1999; De la Garza-González, 2000).

El área de estudio se localiza en el extremo E de la SMO, dentro de una zona transicional, colindando hacia el E con la Cuenca de Burgos y hacia el Sur con la Sierra de Tamaulipas. En esta parte de la provincia existen lomeríos suaves que se ven bordeados por amplios valles. Debido a los esfuerzos generados durante la Orogenia Laramide sobre la SMO, se formaron series de plegamientos recumbentes, los cuales se van suavizando más hacia el NE donde se dio lugar la deposición de sedimentos terrigenos, formando diferentes unidades litológicas durante el Terciario y Cuaternario, mismas que están presentes en el área de estudio. Estas rocas son de origen marino y tienen una permeabilidad mínima, por lo que no existen acuíferos regionales de importancia, debido a la predominancia de sedimentos como las lutitas (de coloraciones que van desde el gris oscuro a negro, azul, marrón y rojo) y areniscas compactas (de coloración gris oscuro que intertemperiza a café, con estratificaciones que varían de media a gruesa), así como a la ocurrencia de material granular en una matriz de sedimentos de grano fino (Grubb y Carrillo, 1998).

Gran parte del área está cubierta en la superficie por depósitos aluviales compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas, producto de la erosión de rocas consolidadas durante el Cuaternario (Anexo 1).

2.4 ESTRATIGRAFÍA

2.4.1 FORMACIÓN MÉNDEZ

Se designa con este nombre a una secuencia de lutitas limosas de colores que varían desde gris oscuro a negro, azul, marrón y rojo, hasta lutitas y margas de estratificación laminar a delgada, de color gris claro, gris oscuro y verde olivo (López-Ramos, 1980; Padilla y Sánchez, 1978; 1985; Anderson y Aguilera, 1986). Tienen una edad Campaniano-Maastrichtiano y un espesor de 500 m aproximadamente (Anderson y Aguilera, 1986), aunque otros autores mencionan espesores variables (De la Garza-González, 2000). Esta unidad presenta intercalaciones con estratos de areniscas con estratificación media a gruesa, cuyo color es gris oscuro e interperiza a café; ambas unidades presentan indicios de bioturbación. El ambiente de depositación es de aguas marinas profundas, en una cuenca con gran subsidencia, lo cual provocó los grandes espesores que presenta esta unidad (López-Doncel, 1990).

El macizo rocoso dentro del área de estudio se compone por lutitas intercaladas con areniscas calcáreas. Su estilo de fracturamiento es muy característico, es de tipo *concordal* y en algunas áreas está muy interperizada, mostrando desde una estructura de laminillas, que cambian de una coloración en la roca sana a café amarillento, hasta suelos. En el área se distribuye principalmente en el lomerío El Tepeyac-San Paulo, El Cerrito y el Cerro La Tortuga.

En El Cerrito se observan las lutitas altamente interperizadas, con una coloración que varía de gris a amarillento en forma de material suelto o suelo arcilloso semiconsolidado. En afloramientos medidos presentan un intenso fracturamiento, con extensión entre fracturas desde mm hasta 2 cm, algunas de ellas con rellenos de calcita, mostrando en algunas zonas una cubierta de caliche en su superficie. Existen intercalaciones con estratos de areniscas masivas, cuyos espesores varían desde 0.4 m hasta 1.5 m aproximadamente. Estas rocas presentan un fracturamiento alto y la extensión entre fracturas varía en ocasiones desde 1 hasta 10 cm (Foto 1).

NNW

SSE



Foto 1 Bloques de areniscas en la parte alta de El Cerro, con espesor de 1.50 m. El buzamiento de sus estratos tiene una orientación hacia el SE con 42°

En el lomerío El Tepeyac-San Paulo afloran rocas lutíticas altamente fracturadas, en ocasiones material suelto, cuya coloración cambia del gris al amarillento. Afloramientos en las partes más bajas del lomerío muestran capas de calcita de hasta 2 cm de espesor, depositados sobre la estratificación (Foto 2).

NNW

SSE



Foto 2 Bloques de areniscas intercaladas con material lutítico altamente intemperizado, mostrando una estratificación semi-horizontal con 14° de buzamiento hacia el SE. Afloramiento cercano al punto E (Anexo 1)

En el Cerro La Tortuga se observa una estructura anticlinal general, cuya orientación del eje es hacia el NW, con inmersión muy suave en dirección NNW y vergencia ligeramente hacia el E (Anexo 2). En su extremo N presenta una flexura intermedia, formándose un pequeño sinclinal interno, con una orientación de su eje e inmersión casi paralelos con la estructura principal. El macizo rocoso es compuesto por intercalaciones de estratos de lutitas y areniscas, con espesores variables: los estratos de lutitas muestran espesores de hasta 0.4 m, mientras que la estratificación de las areniscas presentan espesores grandes de hasta 1 m (Foto 3).

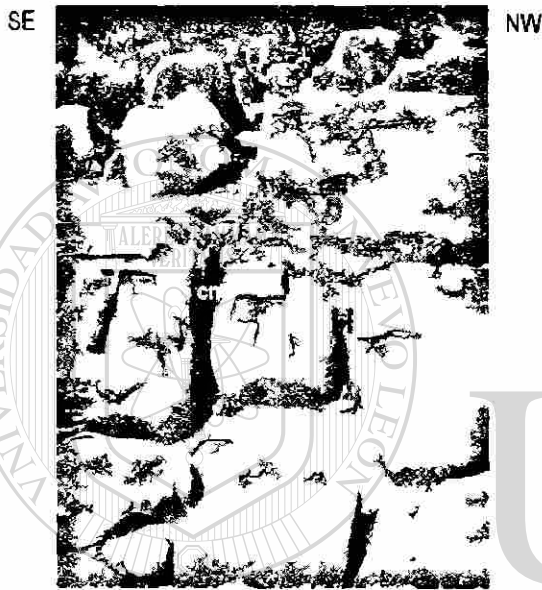


Foto 3 Bloques de areniscas que muestran un alto intemperismo. Es una secuencia intercalada con rocas lutíticas, localizada en la cima del cerro La Tortuga

Las rocas lutíticas muestran la coloración típica gris en la roca sana y café amarillento en la roca intemperizada. Su fracturamiento es muy intenso, presentan foliación y estrías, que son producto del desplazamiento y la deformación de las rocas. Los espesores entre fracturas son muy variables, siendo desde menos de 1 mm hasta 3 cm. En ocasiones estas aperturas están rellenas de calcita, lo cual indica antiguas infiltraciones a través de ellas. La densidad del fracturamiento varía entre 5 y 12 fracturas por metro en promedio. En las areniscas este fracturamiento se distribuye más ampliamente, existiendo aperturas desde 1 mm hasta 10 cm (Foto 4).

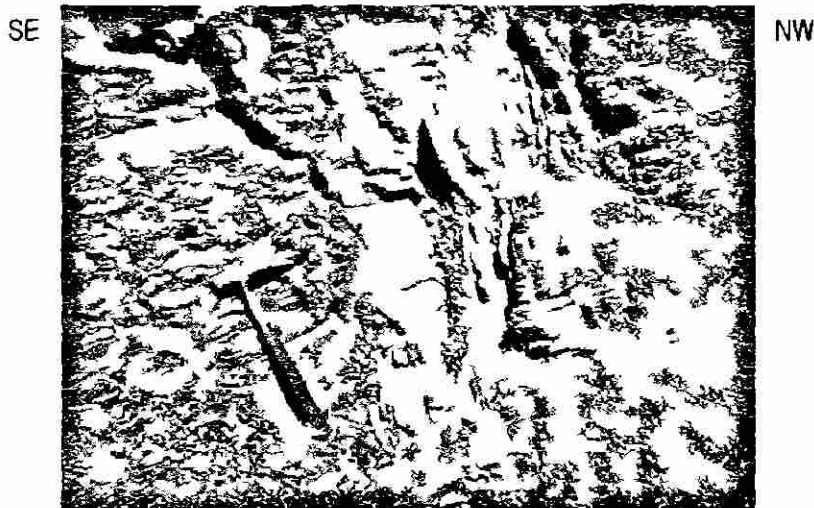


Foto 4. Distintos grados de intemperismo en rocas lúticás. Se observa foliación y rellenos de calcita, los que indican antiguas infiltraciones (sobre el flanco N-NE del cerro La Tortuga)

Sobre estas rocas se encuentra una capa de suelo, compuesto por material limo-arcilloso intercalado con raíces y materia orgánica. Su coloración es gris a café oscuro y su espesor varía desde unos pocos cm hasta 1 m aproximadamente. Se encuentra solo en algunas zonas de este afloramiento donde la vegetación es más densa (Foto 5).

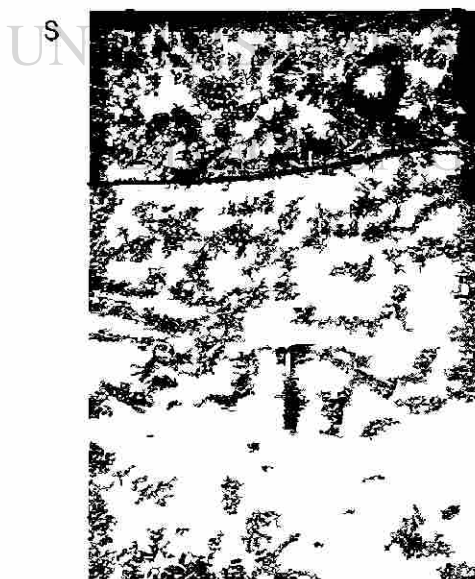


Foto 5. Sobre la roca consolidada se deposita una cubierta de suelo intercalada con material calichoso, la cual contiene restos de materia orgánica y raíces. El espesor varía desde pocos cm a 1 m

2.4.2 DEPÓSITOS TERCIARIOS

Estos depósitos son compuestos por el material aluvial que fue transportado a través de antiguos cauces, como resultado del intemperismo y la erosión de las rocas que conforman la SMO. Estos conglomerados se depositaron formando planicies, que posteriormente se vieron modificadas en distintos niveles como respuesta a un levantamiento de la región por efectos tectónicos, formándose las terrazas fluviales que se localizan topográficamente en distintos niveles (Ruiz, 1990). En el área de estudio solamente puede asociarse la terraza No. 5 a este tipo de depósitos, ya que el resto de las terrazas o niveles de conglomerados pertenecen a depósitos recientes (De León-Gutiérrez, 1999; De la Garza-González, 2000).

Terraza No. 5 (T5)

De León-Gutiérrez (1999) correlaciona la terraza más antigua y más alta localizada en el Cañón Santa Rosa con la terraza T5, cuyo único relicto conservado fue determinado en el lomerío del Tepeyac-San Paulo. Esta es la terraza más antigua de los depósitos aluviales, depositada en estructuras aisladas debido a los procesos de la erosión fluvial, coronando sobre las partes altas como son el lomerío El Tepeyac-San Paulo y en el afloramiento F, localizado en el límite SE del área (Anexo 1).

Esta terraza consiste de conglomerados formados por gravas, fragmentos de lutitas y areniscas, así como pedernal, los cuales provienen de la erosión de las rocas de la SMO. Estos son cementados por material areno-arcilloso, sus diámetros varían de 10 a 20 cm y su espesor es de aproximadamente 1.8 m en su parte gruesa, disminuyendo gradualmente hasta unos pocos centímetros.

2.4.3 DEPÓSITOS CUATERNARIOS

El material aluvial producto del intemperismo y la erosión de las rocas que conforman la SMO transportado a través de antiguos cauces, pudo ser depositado formando planicies, las que posteriormente se vieron modificadas en distintos niveles como respuesta a un levantamiento de la región por efectos tectónicos, formándose las terrazas fluviales que se localizan topográficamente en distintos niveles (Ruiz, 1990).

Dentro del área de estudio se encuentran los depósitos de conglomerados que descansan discordantemente sobre la Formación Méndez. Se encuentran en forma horizontal sobre el lecho del río Pablillo y se distribuyen hacia los lados formando cuatro diferentes niveles o terrazas aluviales. Estos fueron identificados mediante los recorridos realizados en campo y la revisión de la literatura relacionada (Ruiz, 1990; Galván-Mancilla, 1996; De la Garza-González, 2000).

Terraza No. 4 (T4)

Esta terraza presenta la misma distribución que la terraza alta No. 5. Se extiende también en bloques aislados distribuidos en el lomerío El Tepeyac-San Paulo, a menor elevación que la T5. Es compuesta por gravas, arenas, arcillas y limos de espesor variable, cementados con material arcillo-arenoso color amarillento. Sobre esta se deposita una capa húmica de poco espesor, compuesta por materia orgánica y raíces. En su superficie está cubierta por una costra de caliche de pocos centímetros de espesor (Foto 6).



Foto 6 Conglomerados (T4) poco consolidados, con intercalación de material limoso-arcilloso. Descansa sobre lutitas de la Formación Méndez muy impenetradas. En la superficie se deposita una cubierta de material húmico. Afloramiento H (Anexo 1)

Terraza No. 3 (T3)

Se deposita principalmente en el área ocupada por la colonia La Petaca. Es compuesta por gravas redondeadas de diversos diámetros y bloques, intercaladas con arenas y limos, las cuales tienen un cementante calichoso. El contacto con la siguiente terraza inferior presenta intercalaciones con material fino (arenas, limos y arcillas) (Foto 7). Su espesor ha sido definido por otros autores entre 2 y 5 m (Galván-Mancilla, 1996; De la Garza-González, 2000).

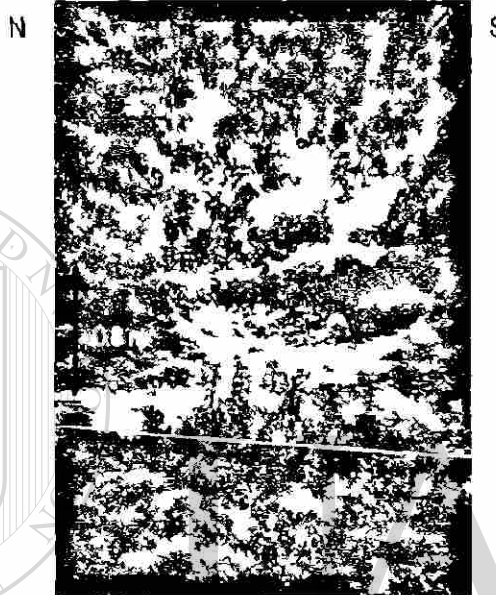


Foto 7 Conglomerados poco consolidados intercalados con material calichoso, forman la parte superior del acuífero de poros. Sobre la terraza No. 3 se asienta la colonia La Petaca

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Terraza No. 2 (T2)

Estos depósitos aluviales se localizan en los extremos del río Pabillo y sobre los pequeños arroyos dispersos por el área. Su espesor varía desde 2 a 23 m (Galván-Mancilla, 1996) y están compuestos por material poco consolidado, formado por gravas, arenas, limos y arcillas intercalados. Muestran horizontes de gravas y algunos bloques y sus espacios son rellenados con arenas y algo de arcillas. Su granulometría tan variable, el material de relleno así como su espesor, la convierten en parte importante en la conexión hidráulica entre los escurrimientos superficiales y subterráneos, ya que en gran parte de los aprovechamientos hidráulicos monitoreados el nivel freático se encuentra en esta terraza, alternando con la T1.

Terraza No. 1 (T1)

Se deposita sobre el lecho de ríos y arroyos. Es la terraza más reciente, ya que actualmente los escurrimientos superficiales continúan depositando y retransportando el material. Es una alternancia de horizontes de gravas, espacios rellenos con arenas y horizontes de materiales finos como arcillas y limos sin consolidar. Su porosidad entre granos es tal, que interactúa con la T2 para favorecer la influencia y efluencia en la relación río-acuífero. Su espesor varía de 1 hasta 7 m (Foto 8).

SW

NE



Foto 8 Terraza No. 1 sobre el cauce del río Pabillo. Estos son los sedimentos aluviales más recientes, ya que continuamente se están retransportando y depositando. Presenta una interacción de influencia del río con el acuífero de poros

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Suelos

La parte superficial es compuesta por depósitos de material aluvial formando suelos. Los suelos predominantes en las partes bajas sobre el valle son los Vertisoles, que son profundos y arcillosos. En estado seco son fuertemente agrietados en los primeros 50 a 100 cm. y su color es muy oscuro. Los suelos de los lomeríos se clasifican como Rendzinas de textura limo-arenosa, de poca profundidad, con un drenaje interno medio, limitados por una capa cementada de caliche (INEGI, 1996; Manzano-Camarillo, 1997).

2.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Durante los últimos años, el creciente interés en estudiar el movimiento y transporte de fluidos y contaminantes a través de medios porosos y medios fracturados, ha originado investigaciones en diferentes partes del mundo para comprender la ocurrencia de dichos fenómenos, así como la prevención de la contaminación en el agua subterránea (Lee et al., 1995; Lee y Chang, 1996; Odling y Roden, 1997; Lin y Lee, 1998; Dahan et al., 1998; Akgün 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 radioactivos (Lee et al., 1995; Lee y Chang, 1996; Odling y Roden, 1997; Lin y Lee, 1998; Dahan et al., 1998; Akgün y Doyuran, 2000).

La presencia de fracturas, en especial aquellas que son abiertas son parte importante en el transporte de contaminantes, ya que pueden generar plumas de contaminación complejas, espacialmente 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 de fracturamiento pueden influir en la distribución de contaminantes (Lee et al., 1995; Lee y Chang, 1996; Odling y Roden, 1997; Lin y Lee, 1998).

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 que se localizan en la parte central, se encuentran las diversas granjas porcinas y el tiradero municipal. Dichas fuentes de contaminación se ubican directamente sobre el macizo rocoso, de ahí el interés en analizar si existe relación entre las condiciones estructurales del área con la infiltración, así como la dirección y el transporte de lixiviados hacia el agua subterránea.

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 una brújula Clar y los datos fueron almacenados para su posterior análisis. Una vez que los afloramientos fueron medidos se procedió al análisis geológico/estructural de la información recopilada mediante el programa Stereonet, misma que se representa en los distintos estereogramas (diagramas de Schmidt) en carta geológica-estructural (Anexo 1).

Esta interpretación permitió determinar los principales sistemas de fracturamiento, así como la relación que guardan con la infiltración y el transporte de escurrimientos y contaminantes hacia el acuífero. Se aprecia una orientación preferente de los sistemas en dirección SW-NE, con direcciones perpendiculares y diagonales al sentido de la estratificación. Los afloramientos medidos se distribuyen por las principales estructuras que sobresalen en el área de estudio, dividiéndose en las siguientes localidades:

- Los afloramientos marcados en los diagramas de Schmidt como A y B se localizan en el cerro La Tortuga en la parte central del área de estudio (Anexo 1). La importancia en el análisis del fracturamiento en esta zona tiene su origen en que es aquí donde se localiza el tiradero municipal de la ciudad de Linares, lugar en el cual la basura se encuentra depositada directamente sobre el macizo rocoso. 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 generan lixiviados que se infiltran hacia el agua subterránea. Además del tiradero municipal, a 590 m aproximadamente hacia el W-NW se localizan las granjas porcícolas.

La estructura general es un anticlinal cuyo eje tiene una orientación de 160° en dirección NW-SE, cuya inmersión es casi horizontal, con 4° hacia el NW. En su extremo N se forma una flexura intermedia, la cual es una estructura sinclinal, cuya orientación del eje es muy similar a la estructura principal, con una dirección de 170° NW-SE e inmersión casi horizontal de 6° hacia el NW (Anexo 2). Este tipo de plegamientos internos pueden asociarse a las propiedades de rocas de composición arcillosa, como son las rocas de la Formación Méndez, que se encuentra muy deformada. En ocasiones se observa abundante foliación paralela a los planos de estratificación, aunque también existen planos de foliación perpendiculares a la estratificación, que se encuentran sobre todo en las partes de mayor flexión en los pliegues de la estructura.

Este lomerío es conformado por una intercalación de rocas lutíticas altamente fracturadas e intemperizadas, de espesores que varían desde pocos cm hasta 0.4 m, con capas de areniscas menos intemperizadas, de espesores medios a gruesos (0.4 a 0.8 m), con fracturamiento distribuido más ampliamente. Las rocas lutíticas tienen una densidad de fracturas de 4 a 15 por metro y apertura desde <1 mm a 5 cm, en ocasiones con rellenos de calcita y en otras totalmente sin rellenar. El sistema de fracturamiento predominante es diagonal de tipo hk0 y en menor grado el de tipo ac con buzamientos muy verticales, variando en promedio entre 80° y 88° .

La dirección general del sistema de fracturamiento se orienta principalmente hacia el E-NE, la cual será determinante para permitir una asociación entre estas y la posible dirección que puede tomar el transporte de los lixiviados generados por las fuentes de contaminación ya mencionadas; además, la semi-verticalidad que presentan los buzamientos de fracturas indica que mientras estas están abiertas, permiten la fácil infiltración de los lixiviados hacia el agua subterránea.

- En El Cerrito se localizan los afloramientos C y D en los diagramas de Schmidt (Anexo 1). Se observa que la estratificación es semi-horizontal, con un buzamiento de 42° hacia el SE y una dirección 220° al NE-SW. Este lomerío está conformado por rocas lutíticas muy intemperizadas con un grado de fracturamiento muy alto, cuya densidad es de 4 a 7 fracturas por m y aperturas entre ellas desde menos de 1 mm hasta 1 cm. Existen intercalaciones de capas de areniscas con espesores gruesos hasta de 1.5 m. La densidad del fracturamiento es más espaciada, presentando 3 a 4 fracturas por metro, con aperturas entre fracturas de 1 a 3 cm. El fracturamiento predominante es del tipo ac y en menor grado de importancia el fracturamiento diagonal de tipo hk0.
- En el lomerío El Tepeyac-San Paulo, los afloramientos medidos E, F, G y H, se encuentran más espaciados debido a la dificultad para llegar hacia ciertas zonas y en ocasiones por estar estos cubiertos por una densa vegetación. La orientación general de este lomerío es hacia el NW-SE, con buzamiento promedio semi-horizontal de 14° hacia el E-SE y sistema de fracturamiento diagonal predominante de tipo hk0 con dirección al NE de 108° y buzamientos casi verticales de 85°. La densidad del fracturamiento es de 4 a 7 por metro y aperturas desde <1 mm a 5 cm. Al pie de los cerros se encuentra altamente intemperizada, con estructura de suelos y la roca consolidada con una apariencia laminar.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

2.6 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DEL FRACTURAMIENTO

Aunque la composición del macizo rocoso sea impermeable, la densidad del fracturamiento facilita la infiltración y el flujo del agua subterránea. Las fracturas que presentan aperturas entre ellas pueden aumentar el flujo, mientras que cuando estas están rellenas se forman barreras que impiden la infiltración (Odling y Roden, 1997). La apertura es la distancia perpendicular que separa a dos paredes de roca adyacentes de una discontinuidad abierta, en la que el espacio es relleno con aire o agua (Barton et al., 1978); por lo tanto, esta se distingue según el espesor de la discontinuidad (Tabla 1, Fig. 3):

Apertura	Descripción	
<0.1 mm	Muy cerrada	Cerrada
0.1 – 0.25 mm	Cerrada	
0.25 – 0.5 mm	Parcialmente abierta	
0.5 – 2.5 mm	Abierta	Abierta
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 1 Descripción de las aperturas en base a su separación (tomado de Barton et al., 1978)

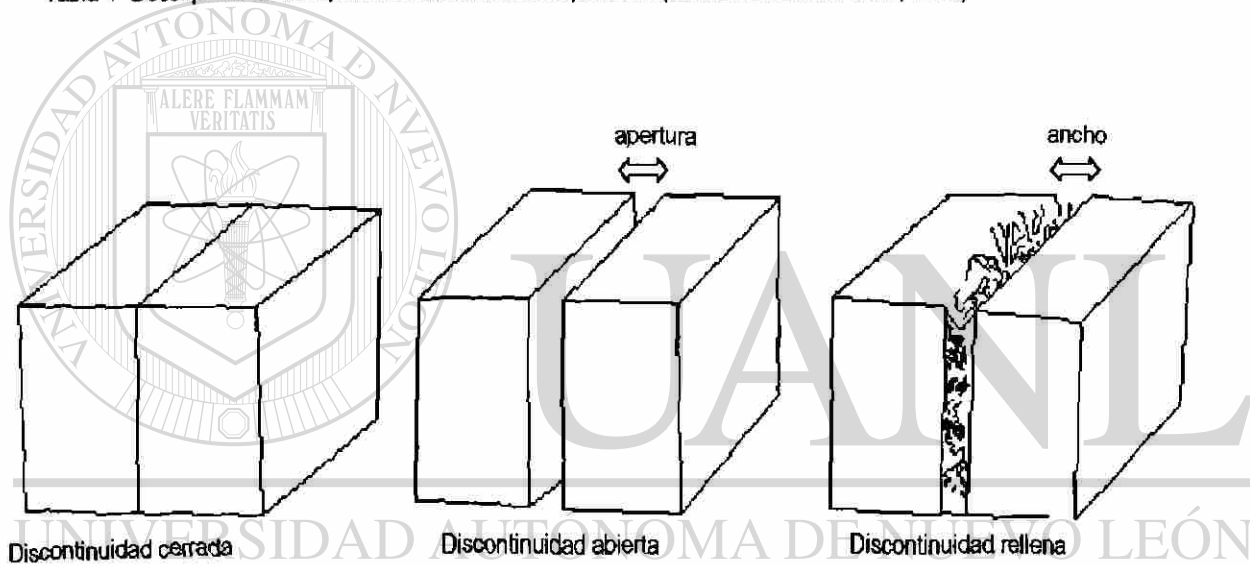


Fig. 3 Estado de las fracturas cuando estas se encuentran cerradas, abiertas y rellenas (tomado de Barton et al., 1978)

En el área de estudio, la zona de mayor importancia dentro del análisis estructural es el cerro La Tortuga, como se menciona en el punto 2.4. En este sitio la densidad del fracturamiento es de alrededor de 4 a 15 fracturas por metro aproximadamente, mientras que la apertura entre fracturas es muy variable, siendo sus valores desde <1mm hasta 5 cm de separación. Según la clasificación que hace Barton et al. (1978), por la apertura que presentan las fracturas pueden considerarse como abiertas a moderadamente abiertas, facilitando la infiltración de los escurrimientos hacia el acuífero (Tabla 1, Fig. 3). Gran cantidad de estas fracturas contienen rellenos de calcita, formando una barrera impermeable (Foto 4).

El buzamiento promedio de las fracturas varía entre 80° y 85° , conservando su verticalidad en casi toda su superficie (Anexo 1). Este favorece una infiltración más directa cuando las fracturas están abiertas, permitiendo el paso de los escurrimientos y contaminantes hacia el acuífero (Foto 9).



Foto 9 Residuos sólidos en contacto directo con las rocas fracturadas. La apertura entre fracturas y la ausencia de geomembranas facilitan la infiltración de lixiviados hacia el subsuelo. El nivel freático se localiza a 17 m de profundidad en esta zona

La orientación general de los sistemas de fracturamiento predominantes en el cerro La Tortuga es hacia el E-NE y se pueden asociar con la dirección de transporte de dichos escurrimientos en la misma dirección. En el siguiente capítulo se discute la relación entre el análisis tectónico y el comportamiento del flujo subterráneo.

2.7 LITERATURA CITADA

- Akgün H., Doyuran V. (2000): Environmental geological investigations at the Van open dump site, southeastern Turkey. *Environmental Geology*, vol. 39, no. 6, pp. 660-666.
- Anderson B.D., Aguilera V.M., (1986): Push faults, a conceptual model for groundwater exploration in the Sierra Madre Oriental Foreland, Mexico. *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, no. 9/10, pp. 1149-1160.
- Barton N., Bamford W.E., et al., (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Abstracts*, Vol. 15, no. 6, pp. 319-368.
- Dahan O, Nativ R., Adar 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.
- 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 pp.
- De León-Gutiérrez, A. (1999): Investigación sobre las terrazas fluviales del Cañón Santa Rosa, Iturbide, N.L., como base para el establecimiento de una estratigrafía del Cuaternario en el Noreste de México. Tesis de Maestría, FCT/UANL, 119 pp.
- Galván-Mancilla, S.M. (1996): Cartografía hidrogeológica de la terraza baja entre Hualahuises y Linares, N.L. Tesis de Licenciatura, FCT/UANL, 63 pp.
- Grubb H.F., Carrillo-Rivera J. (1998): Gulf of México Coastal Plain. *Hydrogeology, the Geology of North America*. Geological Society of America, 524 pp.
- López-Doncel, F. (1990): Mapeo geológico en el área de Puente de Dios al norte de Galeana N.L. y desarrollo facial de las Formaciones Aurora, Cuesta del Cura y Agua Nueva (Albiano-Turoniano) en las regiones de Galeana e Iturbide, N.L. Tesis de Licenciatura, Fac. Ciencias de la Tierra U.A.N.L., 113 pp.
- INEGI (1996): Carta Edafológica Linares G14C58. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- 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., Chang J.L. (1995): A continuum approach for estimating permeability in naturally fractured rocks. *Engineering Geology*, no. 39, pp. 71-85.
- Lin B.Sh., Lee Ch.H. (1998): Percolation and dispersion of mass transport in saturated fracture networks. *Water Resources Management*, no. 12, pp. 409-432.
- López-Ramos E. (1980): Geología de México, Tomo II. 2ª. ed., S.E.P., 454 pp.

- Manzano-Camarillo, M.G.F. (1997): Procesos de desertificación asociados a sobrepastoreo por caprinos en el matorral espinoso de Linares, N.L. Tesis de Maestría, Fac. Ciencias Forestales, U.A.N.L., 87 pp.
- Meiburg, P. (1987): Paleogeografía y desarrollo estructural del Cretácico de la Sierra Madre Oriental septentrional, México. *Actas de la Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L.*, vol. 2, pp. 197-199.
- Michalzik, D. (1987): Sedimentación y sucesión de facies en un margen continental pasivo del Triásico al Cretácico temprano del noreste de la Sierra Madre Oriental, México. *Actas de la Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L.*, vol. 2, pp. 27-31.
- Morán-Zenteno, D. (1994): *Geology of the Mexican Republic. AAPG Studies in Geology #39. Published by the American Association of Petroleum Geologists*, 160 pp.
- 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.
- Padilla y Sánchez R.J. (1978): Bosquejo geológico-estructural de la Sierra Madre Oriental en el área Linares-Galeana-San Roberto, Estado de Nuevo León. *Revista del Instituto de Geología, U.N.A.M.*, vol. 2, no. 1, pp. 45-54.
- Padilla y Sánchez R.J. (1985): Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. *Revista del Instituto de Geología, U.N.A.M.*, 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.
- Peterson-Rodríguez, R.H. (2001): Análisis estructural en el anticlinorio de La Casita, Sierra de Parras, Coahuila, México. Tesis de Maestría, Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., México. 173 pp.
- Prado-Gómez, E. (1997): Aplicación de métodos geofísicos (SEV's) para investigar zonas de canales de gravas en el área de Hualahuises-Linares, Nuevo León, México. Tesis de Licenciatura Fac. Ciencias de la Tierra U.A.N.L., 97 pp.
- Rojas-Ruiz G. y Méndez-Delgado S. (1986): Consideraciones sobre el comportamiento de pozos hidrológicos en terrenos impermeables en la Planicie frente a la Sierra Madre Oriental, Nuevo León, México. *Actas Fac. Cienc. Tierra, UANL*, vol. 1, pp. 88-101.
- Ruiz, M. (1990): Zur Gliederung Verbreitung und ökologischen Bewertung der Böden im Gebiet von Linares, N.L., Göttingen Beitr. Z. Land U. Forstw. Tropen and Suptropen, 56: 184 pp., Göttingen, Alemania.
- Sedlock R.L., Ortega-Gutiérrez F. y Speed R.C. (1993): Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America GSA. Special paper 287, 153 pp.
- Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP) (1982): *Geología de la República Mexicana*. SPP, 82 pp.
- 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 Alta-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.

CAPÍTULO 3 HIDROGEOLOGÍA

INTRODUCCIÓN

La evaluación 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 futura de los recursos hidrogeológicos 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 de suelo se combinan, contribuyen a la alteración de la calidad del agua. Los acuíferos en el área de estudio son sometidos a presiones antropogénicas (fosas sépticas y letrinas, granjas porcinas, el tiradero municipal y zonas agrícolas). Estas presiones se ven influenciadas temporalmente, ya que la composición química del agua varía de acuerdo a los períodos de máximas y mínimas precipitaciones ocurridas durante el año. Además, la transición de un medio acuífero de grietas a un medio acuífero de poros cuya zona no saturada es de espesor somero y con propiedades de permeabilidad alta, sugieren condiciones de vulnerabilidad en la calidad del agua.

Una herramienta importante para la preservación de los acuíferos, consiste en la implementación de redes de monitoreo que permitan un mejor control y la observación de fuentes de contaminación potencial (Melloul y Collin, 1998; Granel et al., 1999; Mahar y Datta, 2000), mediante las cuales se obtienen bases de datos que contribuyen a 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, 1998; Sidauruk et al., 1998; González et al., 1999). Por otra parte, además de estos sistemas de monitoreo, con la información obtenida se realizan análisis geoestadísticos mediante el manejo de los datos y la evolución 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. Mediante el análisis del monitoreo mensual 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.

3.1 METODOLOGÍA

Se realizó una campaña de monitoreo en diferentes aprovechamientos hidráulicos (pozos, norias), registrándose la siguiente información: clave, tipo de aprovechamiento, localización, elevación del terreno, profundidad del nivel freático, nivel piezométrico y litología (Anexo 3). El estudio fue realizado el 12 de abril de 2002, en un periodo de ausencia de precipitaciones anteriores 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), cuya precisión es de ± 5 mm. La localización de los aprovechamientos hidráulicos se realizó con el empleo de un geoposicionador marca Magellan (GPS Field proV) y un altímetro digital marca Sokkia (Foto 10). 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 obtenida se muestra en la carta hidrogeológica (Anexo 4).

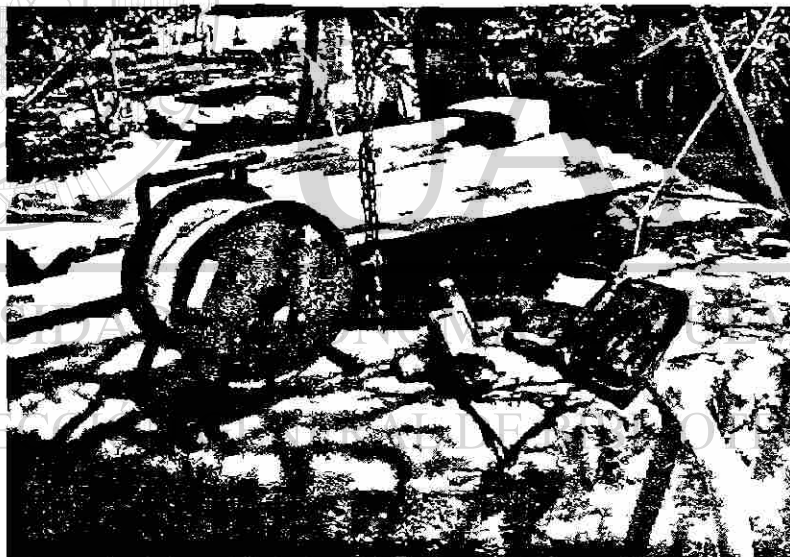


Foto 10 Punto de monitoreo (P16). Equipo empleado para la localización de los aprovechamientos hidráulicos y el estudio hidrogeológico (sonda sonora, GPS y altímetro)

Monitoreo mensual

Con el fin de observar las variaciones en el nivel piezométrico, su relación con los cambios espacio/temporales y con la concentración de parámetros hidrogeoquímicos, se estableció una red de monitoreo en los mismos aprovechamientos hidráulicos utilizados para el estudio piezométrico. Mediante la observación directa también se identificaron el uso de 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 localizan las principales fuentes de contaminación.

Con la información obtenida se crea una base de datos, en la cual se registra la siguiente información: clave, tipo de aprovechamiento, uso del agua, uso del suelo, fecha del monitoreo, profundidad del nivel freático. Dicho monitoreo se realizó mensualmente, durante el periodo que comprendió de febrero a septiembre del año 2002 (Anexo 5).

Debido a que no existen mediciones previas del nivel piezométrico en el área, los datos obtenidos durante el periodo de estudio son los únicos considerados para el análisis de la vulnerabilidad del acuífero.

Construcción de carta hidrogeológica

Con base en la información obtenida durante la realización de la piezometría (Anexo 3), se elaboró la carta hidrogeológica, cuyo principal objetivo consiste en representar la configuración espacial del nivel piezométrico del acuífero, localizar los aprovechamientos hidráulicos que sirvieron como puntos de observación, identificar las direcciones principales 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 realizó mediante el método del triángulo hidrológico, que consiste en la interpolación lineal de los niveles piezométricos entre dos puntos de diferente elevación que se van ligando con puntos adyacentes, lo que permite el trazo de las curvas piezométricas. Para el caso del presente estudio, las curvas piezométricas equidistantes se trazaron a cada 2 m. La carta hidrogeológica fue realizada de forma manual y posteriormente se verificó mediante el empleo del software SURFER para contar con una mayor confiabilidad en su representación. La digitalización de la carta fue realizada utilizando el software CANVAS 6.

3.2 SISTEMA HIDROGEOLÓGICO

El área de estudio se localiza en una zona de valle considerada como zona de descarga, donde las principales fuentes de aportación hacia el acuífero están constituidas por el flujo subterráneo y el flujo superficial formado por el cauce del río Pablillo, que provienen de la zona de recarga en la SMO. Además, existen escurrimientos secundarios, precipitaciones periódicas ocurridas durante el año, así como el uso del suelo, que contribuyen también a su recarga. La dirección de flujo de las corrientes superficiales es dominada por la topografía del terreno, cuya dirección general es de SW a NE y la orientación del flujo del agua subterránea es definida por el gradiente hidráulico en la misma dirección (Anexo 4).

3.3 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

En la literatura, un acuífero se define como la 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 acuífero regional comprende una unidad de gravas de edad cuaternaria, compuesta por canales de gravas aluviales, mientras que en el área existe además una unidad acuífera compuesta por rocas fracturadas de edad cretácica de la Formación Méndez. Aunque sus parámetros hidráulicos son diferentes, estos dos tipos de acuíferos están hidráulicamente conectados por el flujo del agua subterránea (Masuch-Oesterreich et al., 1999). Mediante el estudio geológico y la medición del nivel freático en la red de monitoreo establecida, se identifican las condiciones litológicas e hidrogeológicas que conforman el medio acuífero dentro del área de estudio.

3.3.1 ACUÍFERO DE POROS

El acuífero de poros se encuentra distribuido a través de las tres terrazas aluviales definidas en el capítulo anterior como T1, T2 y T3 (Foto 11).

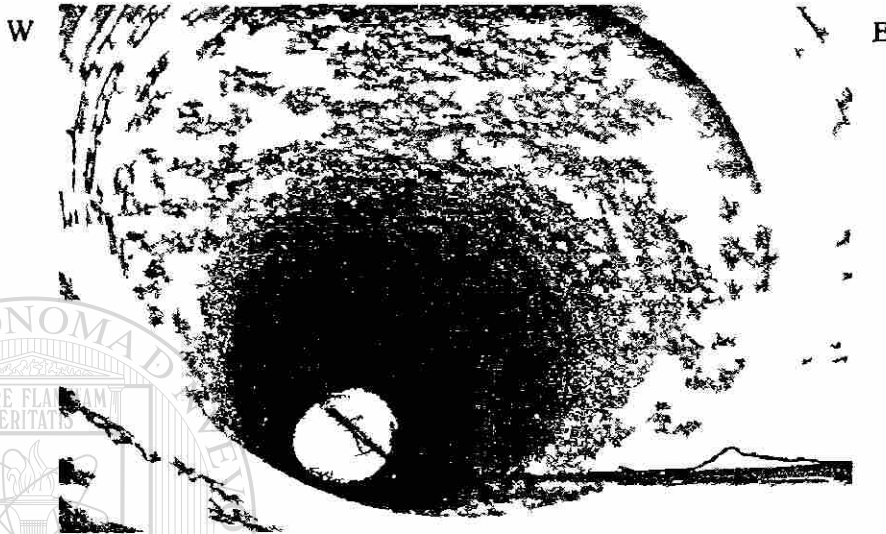


Foto 11 Punto de observación (P39) en el que se observa la litología del acuífero que comprende las gravas semi-cementadas con material arcilloso de la terraza No. 3. La profundidad del nivel freático es de 11.33 m

Como se menciona previamente, estas terrazas están depositadas a lo largo del cauce del río Pabillón (T1) y hacia los lados en distintos niveles topográficos (Anexo 6). Gran parte de los aprovechamientos hidráulicos observados se localizan dentro de esta zona y la profundidad del nivel freático varía también de acuerdo a las condiciones topográficas, siendo sus espesores desde 5.75 m (P31) hasta 16.42 m (P45) (Anexo 4).

3.3.2 ACUÍFERO DE GRIETAS

Existe una transición entre el acuífero de poros y un acuífero de fracturas, el que pudo observarse en los aprovechamientos hidráulicos localizados en el área del lomerío El Tepeyac-San Paulo, así como en el cerro La Tortuga. Estos aprovechamientos indican que el agua es transportada a través de sus fracturas (Anexo 6). Los valores del nivel freático en estos aprovechamientos varían desde 11.64 m (P6) hasta 40.07 m (P44) en su parte más profunda. La influencia que ejercen las condiciones tectónicas sobre el comportamiento general del acuífero de fracturas tiene su

importancia debido a que el alto grado de intemperismo de la roca, la profundidad del nivel freático, así como su intenso fracturamiento parecen tener relación con la dirección de infiltración y el transporte de los lixiviados que se generan en las distintas fuentes de contaminación cercanas.

3.4 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE CARTA HIDROGEOLÓGICA

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 saturada y no saturada 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 mayores velocidades de transporte entre sus poros. Este tipo de acuíferos posee buenas condiciones de recarga, buena permeabilidad y por lo tanto produce buenos caudales de explotación (Custodio y Llamas, 1996).

La orientación general del flujo subterráneo es W-NE y SW-NE, similar a la dirección que presenta el acuífero regional, como lo indican investigaciones realizadas anteriormente (Galván-Mancilla, 1996; De la Garza-González, 2000). El flujo es casi paralelo al cauce del río Pablillo, mismo que recarga al acuífero. El movimiento del agua subterránea y su velocidad son definidos por el grado de cementación de los granos, así como por la distribución de su tamaño (Fig. 4).

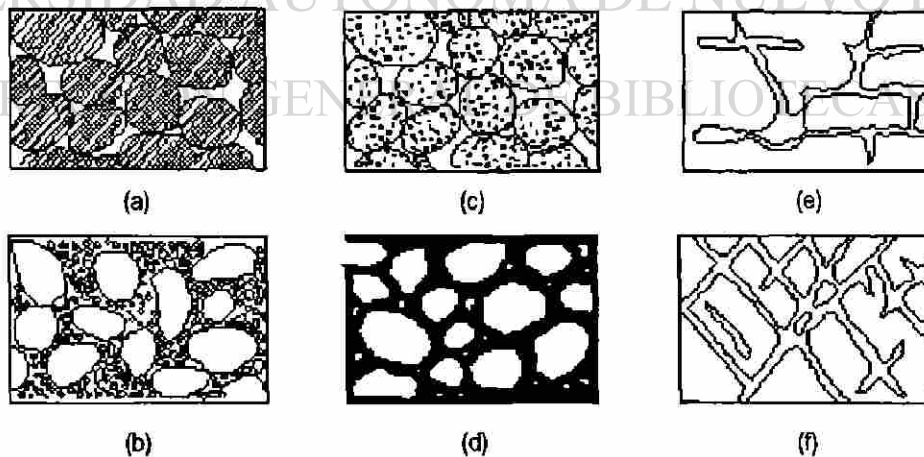


Fig. 4 Tipos de intersticios y relación entre la textura y la porosidad de las rocas. (a) Elementos de tamaño uniforme; porosidad alta. (b) Elementos homogéneos; baja porosidad. (c) Cantos rodados porosos heterogéneos; porosidad muy alta. (d) La porosidad ha disminuido por colmatación de los intersticios con materiales finos. (e) La porosidad de las rocas se debe a la disolución. (f) Rocas porosas por fracturación (Davis & De Wiest, 1971)

El agua subterránea dentro del acuífero de grietas se transporta a través de sus fracturas (Anexos 4 y 6). La matriz de la roca tiene permeabilidad primaria muy baja, sin embargo, las discontinuidades geológico-tectónicas contribuyen al aumento de permeabilidad (permeabilidad secundaria) a través de ellas y su 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 están abiertas, pueden contribuir a un transporte rápido de fluidos 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 reducido, sin embargo en el acuífero de grietas el macizo rocoso presenta un intenso fracturamiento. Las fracturas abiertas se presentan en densidad abundante, lo cual aumenta la permeabilidad de la roca. El determinar las direcciones principales del flujo es difícil, ya que generalmente presentan variaciones, las cuales pueden deberse a que las fracturas estén interconectadas y desvían los caminos principales (Fig. 5), o cuando no existe saturación en la matriz de roca y esta almacena agua entre sus poros (Dahan et al., 1998).

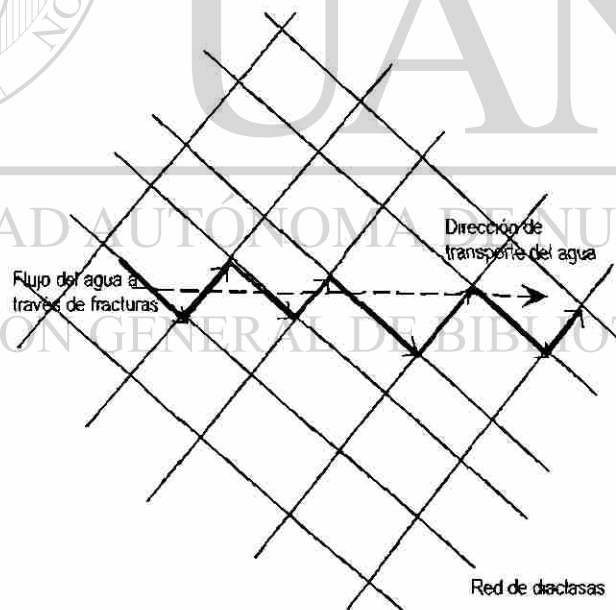


Fig. 5 Camino local del agua a través de las fracturas abiertas (flechas pequeñas). La línea punteada indica la dirección del agua subterránea (Werner, 1996)

Se realiza una revisión bibliográfica, en la cual 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. En el área de estudio se carece de información suficiente que permita realizar este análisis hidrodinámico, teniéndose únicamente los datos tomados del trabajo de Drescher (1995) (Tabla 2).

Clave: La Petaca 1	Clave: La Petaca 2
Localización: N24°51'80"/W99°32'23"	Localización: N24°50'67"/W99°34'06"
Permeabilidad: 0.995 m/d	Permeabilidad: 0.89 m/d

Tabla 2 Información tomada de Drescher (1995) para el acuífero de poros dentro del área de estudio

Debido a la escasez de información útil, se realiza una recopilación de datos en las fuentes antes mencionadas, para crear una sobrevista del posible comportamiento del medio acuífero (tanto fracturado como poroso) en la zona (Tabla 3):

Custodio y Llamas (1996)		Werner (1996)		Freeze y Cherry (1979)		
<i>Porosidad eficaz (%)</i>		<i>Permeabilidad</i>		<i>Cond. Hidrául. (k)</i>	<i>Permeab.(K)</i>	
Areniscas	20-10	Gravas	0.5-30m/día	Areniscas	10 ⁻¹⁰ -10 ⁻¹³	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁸
Aluviones	35-5			Arenas	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁹	1-10 ⁻¹
Gravas	35-15			Gravas	10 ⁻³ -10 ⁻⁶	10 ² -10 ¹
Arenas	35-10	Arenas	0.1-1 m/día	<i>Porosidad (%)</i>		
Limos	20-2			Areniscas	5-30	
<i>Permeabilidad (m/día)</i>				Gravas	25-40	
Lutitas	10 ⁻³ -10 ⁻⁸	Grietas	10-150 m/h	Arenas	25-50	
				Limos	35-50	

Tabla 3 Parámetros hidrodinámicos en diferentes medios acuíferos (citados por algunos autores)

De acuerdo con la información contenida en las tablas 4 y 5, en acuíferos de poros se tienen altas condiciones de permeabilidad y conductividad hidráulica, que facilitan la infiltración y el transporte del agua así como de contaminantes. La permeabilidad en rocas consolidadas se ve incrementada por la densidad del fracturamiento y la ausencia de relleno entre fracturas. Además, de acuerdo al análisis tectónico realizado (punto 2.4), se conoce también que las fracturas tienen un buzamiento muy vertical (80° a 85°), lo que favorece la infiltración más directa. La orientación principal de los sistemas de fracturamiento coincide con la dirección que toma el flujo subterráneo en la zona, por lo tanto, la conexión hidráulica que existe entre los dos medios acuíferos favorece la migración de contaminantes hacia el acuífero de poros, en el cual el movimiento y transporte de estos, así como del agua subterránea se producen debido al gradiente hidráulico en una dirección general SW-NE.

3.5 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DEL MONITOREO MENSUAL

El monitoreo hidrogeológico fue realizado durante el periodo comprendido entre el 17 de febrero y el 24 de septiembre del 2002. La medición del nivel piezométrico se realizó mensualmente en los 44 puntos de muestreo (Anexo 5). El análisis de esta base de datos se realizó de forma estadística para obtener una mejor representación e interpretación de la información recolectada durante el periodo de monitoreo. Se calculó la media del nivel piezométrico y el tiempo fue distribuido mensualmente. La evaluación de la información obtenida se realizó mediante análisis de tendencias, empleando el método de regresión lineal, por medio del cual se observa la relación existente entre el nivel piezométrico, la evaporación, la precipitación y el tiempo (Figs. 6 y 7). Además, mediante el coeficiente de variación (R^2) fue posible comparar el grado de dispersión de los datos.

Cabe mencionar que esta interpretación es solo la información básica necesaria para conocer sobre el comportamiento del agua subterránea respecto a influencias climatológicas y antropogénicas. Para una mejor interpretación del comportamiento del acuífero, es necesario mantener un monitoreo constante durante periodos más largos de tiempo (generalmente años).

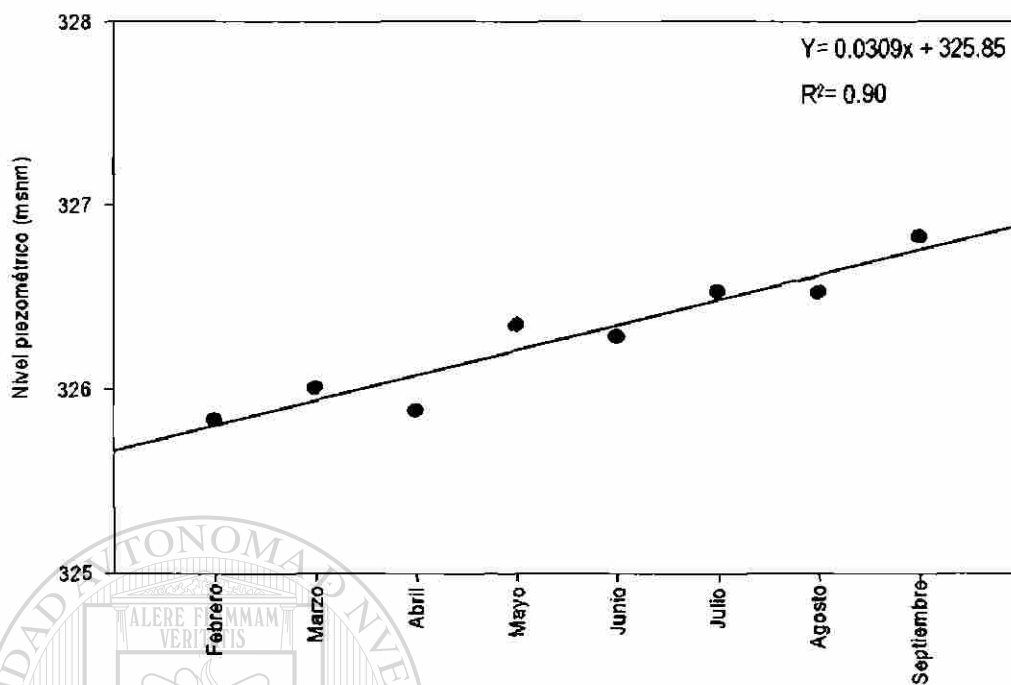


Fig. 6 Diagrama de dispersión en el que se indican las variaciones del nivel freático (media) respecto a la duración del monitoreo realizado en el 2002

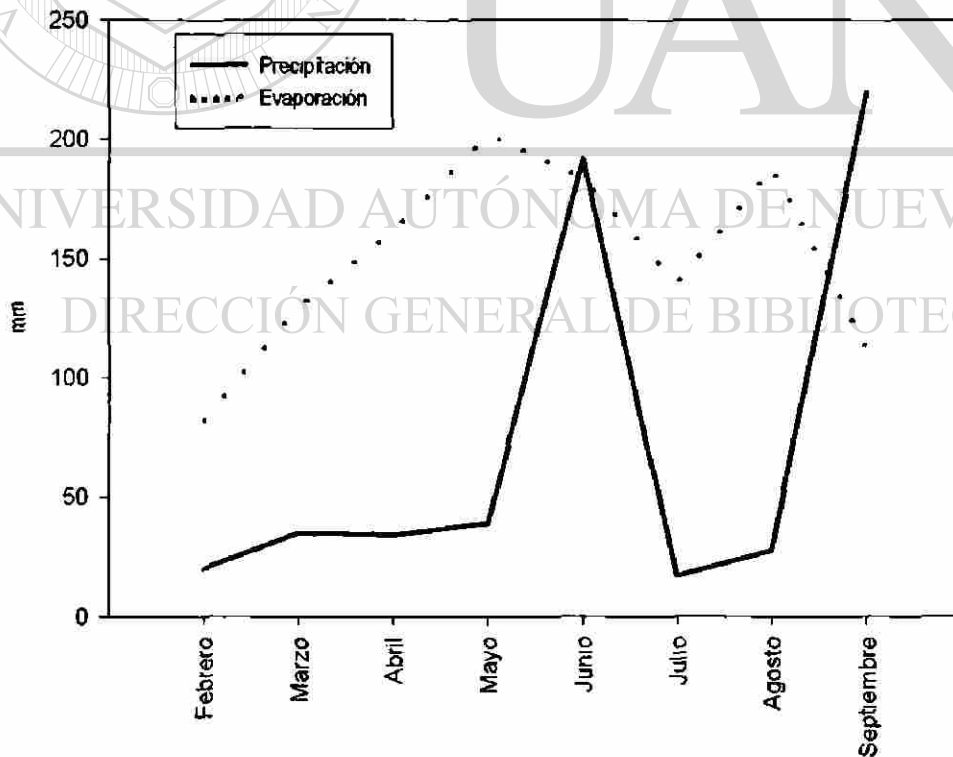


Fig. 7 Comportamiento de la precipitación y la evaporación durante el periodo de monitoreo realizado en el 2002

De acuerdo a las figuras 6 y 7, se observa una tendencia de recarga en el nivel piezométrico a través del tiempo, por lo que puede suponerse que uno de los factores al parecer relacionados con esta tendencia es la precipitación, ya que mientras en los meses de febrero y marzo se presenta escasa pluviometría, son los meses de julio, agosto y septiembre cuando existe mayor precipitación y el nivel piezométrico tuvo un ascenso en sus niveles. Por otra parte, se observa la marcada predominancia de la evaporación sobre la precipitación y los ascensos y descensos de esta última. Sin embargo, aún cuando es evidente que la recarga al agua subterránea por medio de la precipitación no se produce instantáneamente, sino que el tiempo y cantidad de infiltración dependen de la permeabilidad de la zona no saturada, su espesor, el tipo de uso de suelo, entre otros factores, puede inferirse la influencia que ejercen las lluvias sobre el nivel del agua subterránea, aún cuando no se infiltre al 100%.

Debe considerarse además, que existen otras causas que pueden favorecer dicha tendencia, por lo que no se propone a la precipitación como primer parámetro de influencia. Entre los factores posiblemente asociados a este cambio en los niveles, pueden mencionarse la aplicación temporal de grandes láminas de riego en zonas agrícolas, así como un incremento en la extracción del agua en pozos y norias durante los períodos de sequía (sobreexplotación del acuífero) y una disminución en la extracción durante los períodos de máximas precipitaciones, por mencionar solo algunos de ellos.

3.6 LITERATURA CITADA

- Christensen S., Rasmussen K.R., Moller K. (1998): Prediction of regional groundwater flow to streams. *Ground Water* vol. 36, no. 2, pp. 351-360.
- Custodio E., Llamas M.P. (1996): *Hidrología Subterránea*, Tomos I y II. 2ª ed., 2100 p. Barcelona.
- Dahan O., Nativ R., Adar 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, 563 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 p.
- Drescher H. (1995): *Geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Raum Linares, N.L., México*. Diplomarbeit, 117 p. Kiel/Alemania.

- Galván-Mancilla S.M. (1996): Cartografía hidrogeológica de la terraza baja entre Hualahuises y Linares, N.L. Tesis de Licenciatura, Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., 63 pp.
- González R., Marín L.E., Córdova G. (1997): Hydrogeology and groundwater pollution of Yaqui Valley, 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 metropolitan area: water 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.
- Freeze R.A., Cherry J.A. (1979): *Groundwater*, 1st ed. Prentice Hall, 603 p. Estados Unidos.
- Hsu Sh.K. (1998): Plan for a groundwater monitoring network in Taiwan. *Hydrogeology Journal*, no. 6, pp. 405-415.
- INEGI (1983): Carta Hidrológica de aguas subterráneas Linares G14-11. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- 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.
- 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.
- Mahar P.S., Datta B. (2000): Identification of Pollution Sources in Transient Groundwater Systems. *Water Resources 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 Leon. 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.
- Sidauruk P., Cheng A.H.D., Ouazar D. (1998): Ground water contaminant source and transport parameter identification by correlation coefficient optimization. *Ground Water*, vol. 36, no. 2, pp. 208-214.
- 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* vol. 35, no. 6, pp. 20-36.
- Vrba J., Zaporozec A. (1994): Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, volume 16. International Association of Hydrogeologists, 131 pp.
- Werner J. (1996): *Introducción a la hidrogeología*. 1^a ed. Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., 174 pp.

CAPÍTULO 4 HIDROGEOQUÍMICA

INTRODUCCIÓN

Estudios realizados por Van den Brink y Zaadnoordijk (1995), Howard y Livingstone (1996), Soliman et al. (1998) y Abu-Rukah y Al-Kofahi (2001) indican sobre la presencia de vertederos no controlados que amenazan la calidad de aguas superficiales y subterráneas. El problema asociado a este tipo de sitios es la rápida urbanización en sus cercanías, ya que la principal amenaza la constituyen los materiales químicamente peligrosos contenidos en los residuos sólidos depositados sin ninguna restricción, puesto que pueden ser movilizados por medio de la infiltración en forma de lixiviados. 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 prácticas agrícolas es el nitrato. Sin embargo, además de este se agregan también iones tales como Cl⁻, K⁺, Ca⁺², Mg⁺², PO₄⁻³ y SO₄⁻² (Böhlke, 2002).

En la zona de estudio se localizan diversas fuentes que pueden contribuir a la afectación de la calidad en el agua subterránea, por lo que puede suponerse que tanto su preservación como su vulnerabilidad están estrechamente relacionadas con el uso y manejo del suelo. Las condiciones del medio geológico que interactúan con el agua subterránea están asociadas con la afectación de su calidad, debido a la presencia del macizo rocoso muy fracturado en contacto directo con fuentes de contaminación (en el caso de este estudio puede mencionarse el tiradero municipal y granjas porcícolas), así como la presencia de sedimentos granulares permeables que forman el medio acuífero, en zonas donde prolifera la descarga de aguas domésticas en fosas sépticas y letrinas (colonia La Petaca).

En estudios realizados anteriormente se ha detectado la presencia de contaminación. Rodríguez de Barbarin y Barbarin-Castillo (1993) monitorearon altas concentraciones en organismos coliformes sobre el cauce del río Pabillo, encontrándose estas sobre todo en la cercanía de las descargas domésticas hacia su cauce. De León-Gómez y Medina-Barrera (2000) observaron altas concentraciones de nitratos en pozos cercanos al antiguo tiradero municipal, en pozos localizados en áreas de cultivos, además de concentraciones en sulfatos.

En la actualidad, por cuestiones administrativas el organismo responsable del suministro de agua potable a la ciudad de Linares (CNA) no realiza análisis químicos periódicos para el control de su calidad (com. pers. Maldonado M., 2002). Algunas de estas fuentes son utilizadas para el consumo humano, mientras que otras solo satisfacen necesidades agropecuarias o se encuentran sin explotar.

Por esto, en el presente capítulo se evalúan los resultados obtenidos de los análisis químicos y bacteriológicos realizados en laboratorio, dentro del marco del proyecto PAICYT CT346-00, así como los análisis de metales pesados. Se realiza un monitoreo mensual y la recopilación de información en análisis químicos realizados anteriormente en la zona, para observar las variaciones espacio/temporales 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 de humanos y/o animales.

4.1 METODOLOGÍA

Dentro del trabajo hidrogeoquímico se realizaron las siguientes fases:

- Muestreos de campo y análisis en laboratorio
- Monitoreo químico mensual de los aprovechamientos hidráulicos disponibles
- Evaluación de las condiciones de calidad del agua

Campo y laboratorio

Para la toma de muestras se realizó una campaña de un día, observando que las condiciones climáticas fueran estables –ausencia de precipitaciones-. Previo a dicha campaña, se realizó la selección de diez puntos de muestreo en lugares estratégicos, tomando en cuenta factores como la explotación para agua potable, uso doméstico, ganadero y riego, así como sobre el río Pablillo. También se consideró que la ubicación de los puntos seleccionados fuera cercana a las principales fuentes de contaminación existentes en el área.

Después de extraer las diez muestras, se realizó la medición de los parámetros físicos pH, conductividad eléctrica y temperatura. Se envasaron en recipientes de 1 y 4 litros de inmediato, evitando reacciones que puedan alterar su composición original al ser llevadas al laboratorio de la

Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L. para realizar los análisis químicos, al laboratorio de la Fac. Ciencias Químicas, U.A.N.L. para el análisis de metales pesados en 7 muestras y al Laboratorio de Análisis Clínicos e Industriales en la ciudad de Linares, para el análisis bacteriológico de las muestras. Los resultados obtenidos se indican en Anexo 7 y la distribución de los distintos tipos de aguas respecto a la localización de los puntos muestreados se ilustra en las figuras 9a, b y c.

La información obtenida sobre análisis químicos realizados en años anteriores en puntos cercanos o dentro del área de estudio, 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).

Dentro de la fase de laboratorio, los análisis químicos se realizaron mediante los siguientes métodos (Tabla 4):

Determinación	Método	Norma Oficial Mexicana
Conductividad eléctrica (μ mhos/cm)	Conductivímetro	NOM-AA-93-1984
Temperatura	Termómetro de mercurio	NOM-AA-7-1980
pH	pHímetro	NOM-AA-8-1980
Dureza parcial	Método volumétrico	NOM-AA-72-1981
Dureza total		NOM-AA-72-1981
Alcalinidad		NOM-AA-36-1980
Cloruros		-----
Sodio	Método de emisión atómica	-----
Potasio		-----
Sulfatos	Método gravimétrico	NOM-AA-74-1981
Sólidos totales		NOM-AA-34-1981
Sólidos disueltos		NOM-AA-20-1980
Nitratos (como nitrógeno)	Método potenciométrico	-----
Níquel	Espectometría de absorción atómica	NMX - AA - 51
Cromo		NMX - AA - 51
Plata		USEPA - 272.1
Plomo		NMX - AA - 51
Arsénico		AWWA - AS - 3114
Mercurio		NMX - AA - 51
Selenio		AWWA - SE - 3141
Cadmio		NMX - AA - 51
Bario		NMX - AA - 51

Tabla 4. Métodos empleados para el análisis hidrogeoquímico de las muestras en laboratorio

Monitoreo hidrogeoquímico mensual

Dentro de la evaluación de la composición química del agua, además de realizarse análisis en laboratorio se mantuvo un monitoreo mensual en los mismos 10 puntos seleccionados, el cual se realizó durante el periodo marzo-agosto de 2002. Dicho monitoreo fue realizado con un equipo portátil marca Lamotte Chemical, con el cual fue posible realizar los análisis químicos directamente en campo en recorridos de un solo día. El método consiste en extraer muestras de agua de los aprovechamientos y analizar los parámetros físicos y químicos mediante técnicas de comparación colorimétricas que indican los valores de las concentraciones en ppm. Los resultados obtenidos se indican en Anexo 8.

Al observar los cambios en la composición y calidad del agua durante el periodo de análisis, se busca conocer el comportamiento químico del agua subterránea a través del tiempo y bajo distintas condiciones climatológicas, que incluyan periodos de mayor y menor explotación del acuífero. Mediante estas observaciones se pretenden identificar las zonas de mayor influencia antropogénica, así como los periodos en que el acuífero es más susceptible a cambios en su composición. Para facilitar las condiciones de predicción de estos escenarios de vulnerabilidad, es necesario contar con una amplia base de datos (Anexo 8).

Evaluación de las condiciones de 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 de 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 consumo humano (Tabla 11).

Para observar los cambios espacio/temporales ocurridos en la calidad del agua subterránea, se mantuvo el monitoreo hidrogeoquímico, que comprendió el periodo marzo-agosto del 2002 (Anexo 8). Además de la información recolectada, se tomaron en cuenta también factores tales como el tipo de uso de suelo, uso del agua, espesor de la zona no saturada, tipo de acuífero, 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 consiguiente evaluación estadística, que consistió en realizar: a) análisis de varianzas convencionales y b) análisis multivariados.

La finalidad de estos análisis es interpretar mediante diagramas las variaciones y tendencias de los elementos analizados e identificar las fuentes de contaminación que ejercen mayor influencia en sus concentraciones.

4.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS E HIDROGEOQUÍMICOS

Los valores de concentración de los parámetros analizados permiten conocer las características químicas de las aguas subterráneas, la influencia ejercida por el medio geológico e identificar las zonas en 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 de 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 uso de suelo, tipo de acuífero y profundidad del nivel freático para cada punto muestreado se indica en Anexo 9.

- *Temperatura*

La temperatura del agua en las muestras varía desde 16 °C (RP-1) hasta 23.2 °C (P-17), siendo las más frías las extraídas del cauce del río Pablillo por estar en contacto directo con el medio atmosférico; estas variaciones son influenciadas por factores meteorológicos.

- *Conductividad eléctrica*

Los rangos de menor concentración se encuentran sobre el río Pablillo (RP-1=756 μ mhos/cm y RP-2=765 μ mhos/cm), mientras que la mayor concentración se localiza en el punto P-11 (1219 μ mhos/cm). La conductividad eléctrica permite conocer la cantidad de sales presente, de esta forma una muestra que contiene valores altos de conductividad indica mayores valores de sólidos en suspensión (Davis & De Wiest, 1971; Custodio y Llamas, 1996; NOM-ECOL-127-SSA1-1996).

El uso de suelo en la zona donde se localiza el P-11 es destinado a la ganadería, por lo que se deduce que la mayor concentración de sólidos en suspensión proviene de los desechos de animales. Además, se localiza sobre el acuífero de poros aguas abajo de las principales fuentes de contaminación (a 526.5 m de las granjas porcícolas y a 1270.8 m del tiradero municipal).

- *pH*

Los valores del pH en el total de las muestras analizadas varían desde 6.94 las mínimas (P-1) hasta 8.01 (RP-1) sobre el cauce del río Pablillo. Esta escala es utilizada para medir la acidez o basicidad de soluciones, siendo el valor de 7.0 para el agua pura (Russikoff et al., 2001).

- *Dureza total y dureza parcial*

Concentraciones mínimas de dureza total son encontradas en el P-8 (302.1 mg/L), mientras que valores máximos se presentan en el P-15 (478.1 mg/L).

Las concentraciones de dureza parcial en el agua son mínimas en P-4 (197.3 mg/L), mientras que en el mismo P-15 se localizan las concentraciones máximas (380.6 mg/L). Foto 12.



Foto 12 Titulación de una solución (EDTA); el pH es controlado por un potenciómetro (a) para obtener la concentración de dureza parcial. Laboratorio de geoquímica, Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L.

- *Sólidos totales, suspendidos y disueltos*

Las concentraciones de sólidos totales muestran fluctuaciones en todos los puntos analizados, en donde los valores mínimos se encuentran en los puntos RP-1 (629 mg/L) y RP-2 (673 mg/L), coincidiendo con los valores mínimos de conductividad eléctrica para los mismos puntos. Las concentraciones máximas se localizan en el punto P-16 (906 mg/L).

Las concentraciones de sólidos suspendidos son muy variables, siendo el valor mínimo de 0 mg/L (P-15), mientras que la máxima concentración se encuentra en el punto P-16 (205 mg/L). De la misma forma, para los sólidos disueltos se observa que los puntos RP-1 y RP-2 mantienen las concentraciones mínimas detectadas (538 y 528 mg/L, respectivamente), mientras que la máxima

concentración se encuentra en el punto P-11 (758 mg/L), punto en el que se midió el mayor valor de conductividad eléctrica. Estas concentraciones bajas pueden atribuirse a que el cauce del río Pabillo está en continuo movimiento, por lo que no permite el asentamiento de grandes cantidades de sólidos. Foto 13.

Foto 13 Filtración al vacío de muestras para la obtención de los sólidos disueltos



- **Alcalinidad total**

La alcalinidad mide la capacidad del agua para neutralizar ácidos y su valor depende en gran parte del pH (Snoeyink y Jenkins, 1990; Langmuir, 1997). De esta forma, se observa que los puntos con mayor pH observado (RP-1 y RP-2) presentan las concentraciones mínimas de alcalinidad (170.8 y 171.3 mg/L, respectivamente). La máxima concentración se mide en el P-8 (466.3 mg/L). Foto 14.



Foto 14 Determinación de la alcalinidad de las muestras mediante el método volumétrico ácido-base

- *Calcio*

Aguas subterráneas en contacto con rocas sedimentarias obtienen parte del contenido de calcio por procesos de disolución de calcita (Custodio y Llamas, 1996). Las concentraciones menores detectadas en los puntos muestreados se localizan en las zonas con menor actividad de extracción (P-4, P-8 y P-14); estos valores oscilan entre 79 y 92.7 mg/l, mientras que el resto de los puntos muestreados tienen las concentraciones más altas que oscilan entre 106 y 152.4 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 las principales fuentes en que se puede encontrar el magnesio están los sedimentos carbonatados como dolomitas 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, mientras que Davis & De Wiest (1971) indican concentraciones frecuentes entre 1-50 mg/l.

En los resultados obtenidos en los puntos muestreados se tienen concentraciones que fluctúan entre los 8.3 y 35.6 mg/l, observándose que al igual que en la conductividad eléctrica, los menores valores se encuentran en los puntos RP-1, RP-2 y P-17. La concentración mayor se presenta en el P-1 (35.6 mg/l).

- *Sodio*

La principal fuente del sodio en las aguas la constituyen el lavado de sedimentos de origen marino, arcillas y rocas evaporíticas. Otras posibles fuentes son la contaminación urbana e industrial, 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 P-4, P-8, P-11 y P-14, donde sus valores son de 99.7-155.2 mg/l, mientras que las concentraciones más bajas son de 44.1-66.9 mg/l sobre el cauce del Río Pabillo, colonia La Petaca y granjas porcícolas.

- *Bicarbonatos*

La concentración de bicarbonatos muestra variaciones en todos los puntos muestreados, fluctuando desde 208.3-568.4 mg/l. Se observa que en los puntos tomados sobre el cauce del río (RP-1 y RP-2), los cuales presentan los pH más altos (8.01 y 7.89 respectivamente) tienen las concentraciones de bicarbonatos más bajas.

- *Cloruros*

Las concentraciones más altas de cloruros se presentan en los puntos P-8, P-11 y P-15 con valores de 114.9-99.9 mg/l, mientras que en el resto de los puntos se muestran variaciones menores de 79.4-32 mg/l.

Proceden del lavado de terrenos de origen marino, aguas fósiles, agua de lluvia concentrada en el terreno y de vertidos urbanos e industriales (plantas galvanizadoras, oleoductos y refinerías). Permanecen solubles en agua, no son afectados por procesos biológicos, sin embargo son reducibles por dilución (DeZuane, 1997). Werner (1996) menciona un rango de concentración en regiones lluviosas < 30 mg/l; en regiones áridas > 1000 mg/l y en agua 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. Proceden 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 P-8 (27.6 mg/l), mientras que las máximas concentraciones son medidas sobre el cauce del río Pablillo (RP-1 y RP-2 =224.7 mg/l). Considerando las condiciones de uso de suelo y las fuentes de procedencia antes descritas, puede inferirse que los factores que contribuyen a estas altas concentraciones sean el vertido de aguas residuales en las fosas sépticas y letrinas existentes en la colonia La Petaca, así como el vertido de aguas municipales e industriales sobre el cauce del río, teniéndose así fuentes de contaminación difusas.

- *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 varían en un rango de 2.7 mg/l (P-8) a 50 mg/l (P-1) y de acuerdo a las principales fuentes que los generan, puede mencionarse que el uso de suelo, las

descargas de aguas negras en fosas sépticas y letrinas, el vertido de aguas municipales e industriales al cauce del río Pabillón, así como los diversos asentamientos de animales, granjas porcícolas y el tiradero municipal, son fuentes potenciales de los nitratos.

- *Coliformes totales y fecales*

Los coliformes fecales y la *E. Coli* provienen de heces fecales de humanos y animales. Las concentraciones mínimas de coliformes totales fueron detectadas en el P-17 (86 NMP/100 ml) y de coliformes fecales fueron de 8 (NMP/100 ml), mientras que las concentraciones máximas tanto de coliformes totales como fecales fueron detectadas en el P-1 (258 y 30 NMP/100 ml respectivamente).

Entre las probables fuentes de origen se mencionan las descargas de aguas municipales e industriales, heces fecales de animales y humanos, infiltración en zonas de cultivo así como la lixiviación de residuos sólidos y líquidos.

En cuanto a los resultados obtenidos en concentración de metales pesados, los elementos analizados fueron níquel, cromo, plata, plomo, arsénico, mercurio, selenio, cadmio y bario. Debido a que el método utilizado no indica los valores más precisos, solo fue posible detectar concentraciones en los siguientes parámetros, cuyos valores se enlistan en Anexo 7.

- *Bario*

Concentraciones de bario se detectaron en los puntos Ba-2, Ba-3 y P-8 (8.7, 2.7 y 8.7 mg/l, respectivamente). Entre las posibles fuentes de origen se mencionan: la erosión de depósitos naturales, agua de escorrentía en huertos, agua con residuos de fabricación de vidrio y productos electrónicos (USEPA, 2001). El bario es encontrado en calizas, areniscas y ocasionalmente en suelos. Entre sus usos industriales se incluyen: fabricación de pinturas, cerámica, papel, cemento especial, caucho y veneno para ratas (DeZuane, 1997).

La particularidad que presentan estos tres puntos es que la principal fuente de contaminación localizada a menor distancia es el tiradero municipal (254.16, 344.9 y 580.9 mg/l, respectivamente), por lo que la concentración de bario detectada en estos puntos puede provenir de la lixiviación de los residuos sólidos ahí depositados.

- **Mercurio**

Entre las fuentes de origen se menciona que el mercurio puede provenir de la erosión de depósitos naturales, de efluentes de refineries y fábricas, lixiviados de vertederos (equipo electrónico, termómetros, lámparas de vapor de mercurio) y de zonas agrícolas (DeZuane, 1997).

Se detectaron concentraciones altas en los puntos P-1, P-4, P-8 y P-14 (0.0013, 0.04, 0.0012 y 0.0021 mg/l, respectivamente).

Atendiendo a las probables fuentes de origen citadas, se observa que los cuatro puntos se localizan en los alrededores inmediatos del antiguo tiradero, por lo cual puede suponerse que esta puede ser una de las principales fuentes de origen, debido a la diversidad de residuos que fueron depositados sin ninguna restricción en cuanto a la depositación de residuos tóxicos. Además, en el P-4 y P-14 el uso de suelo es destinado a arbustos y pastizales, así que otra posible fuente de origen puede ser la erosión natural del suelo.

- **Arsénico**

En los puntos Ba-3, P-1 y P-8 fueron detectadas concentraciones que varían entre 0.0013 y 0.0031 mg/l. Una vez más, la fuente de origen probable puede suponerse es el tiradero municipal, ya que como se mencionó anteriormente, la falta de control en los residuos sólidos ahí depositados contribuye a su lixiviación.

La erosión de depósitos naturales, el agua de escorrentía en huertos, así como el agua proveniente de residuos de fabricación de vidrio y productos electrónicos, componen las principales fuentes de origen del arsénico. Su aplicación comprende además desde material pirotécnico, vidrio, cerámica, insecticidas agrícolas, venenos y medicinas (DeZuane, 1997).

- **Selenio**

Concentraciones de selenio fueron detectadas en los puntos P-4 y P-14. Entre las fuentes de origen para este elemento sugeridas en la literatura se tienen: efluentes de refineries de petróleo, erosión de depósitos naturales y efluentes de minas.

Conociendo que el uso de suelo para el P-14 son terrenos de pastizales, permite suponer que la posible fuente de origen puede ser la erosión natural del terreno; mientras que para el P-4 se presentan dos características: por un lado, al igual que para el P-14, es probable que la erosión natural del terreno sea una de las fuentes de origen. Sin embargo, su cercanía al tiradero municipal permite suponer también a este como una segunda fuente de origen. Por otra parte, a escasos

metros de este punto atraviesa una línea de poliductos de PEMEX, y si esta presentara filtraciones puede favorecer la presencia de selenio.

4.2.1 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL TIPO DE AGUAS (SEGÚN PIPER)

La caracterización hidrogeoquímica y la clasificación de los diferentes tipos de aguas, se realizó 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 y Medina-Barrera, 2000). Esta clasificación se realiza comparando las concentraciones de los parámetros analizados mediante los diagramas de Piper (1944). Se observa que los grupos de aguas pertenecen a tres diferentes tipos de acuerdo al área en que se localizan. Por lo tanto, la información se ha dividido en tres zonas para su clasificación: río Pablillo (zona 1), La Petaca (zona 2) y el tiradero municipal (zona 3). La concentración de los parámetros puede observarse en la Fig. 8a, b, c.

Esta 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. La principal ventaja que este método presenta es que se pueden agrupar gran cantidad de datos. Observando los diagramas de Piper se obtienen los siguientes tipos de aguas:

- a) Zona 1 (Río Pablillo): Aguas de tipo cálcico-sulfatada
- b) Zona 2 (La Petaca): Aguas de tipo cálcico-bicarbonatada
- c) Zona 3 (Antiguo tiradero municipal): Aguas de tipo bicarbonatada-cálcica

Estos grupos específicos según el tipo de agua son definidos por la predominancia de aniones y cationes según tablas 5 y 6 y la clasificación para cada muestra se menciona en la tabla 7. Para consulta del resto de las muestras representadas en los diagramas, revisar bibliografía citada (Rodríguez de Barbarín y Barbarín-Castillo, 1993; Velasco et al., 1994; Drescher, 1995; De la Garza-González, 2000; De León-Gómez y Medina-Barrera, 2000).

49516

TIPO	ANIONES	TIPO	CATIONES
1	$rCl > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$	a	$rNa^+ > rMg^{+2} > rCa^{+2}$
2	$rCl > rHCO_3^- > rSO_4^{2-}$	b	$rNa^+ > rCa^{+2} > rMg^{+2}$
3	$rSO_4^{2-} > rCl > rHCO_3^-$	c	$rMg^{+2} > rNa^+ > rCa^{+2}$
4	$rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rCl$	d	$rMg^{+2} > rCa^{+2} > rNa^+$
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 5 Clasificación según Piper por iones predominantes (Custodio y Llamas, 1996)

Adicionalmente, también se considera el valor de la conductividad eléctrica (Tabla 6):

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

Tabla 6 Clasificación del tipo de aguas en base a su conductividad eléctrica (Custodio y Llamas, 1996)

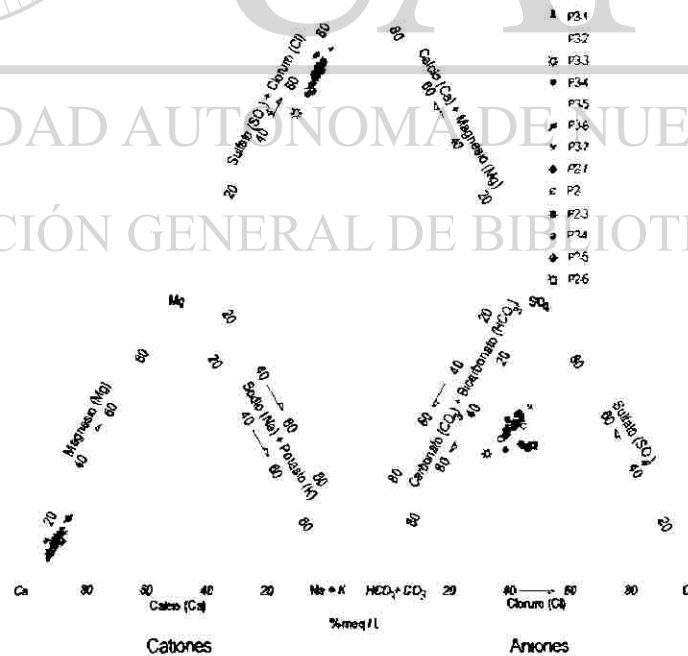


Fig. 8a Zona 1: Muestras tomadas del cauce del río Pabillo y sus zonas aledañas. Aguas de tipo cálcico-sulfatadas (predomina el calcio)

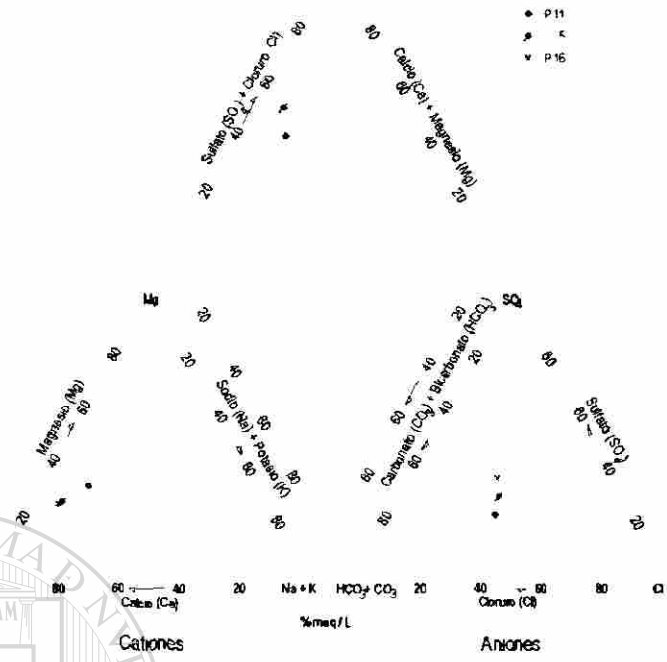


Fig. 8b Zona 2: Muestras tomadas en la colonia La Petaca que presentan concentraciones similares. Aguas de tipo cálcico-bicarbonatadas (predomina el calcio)

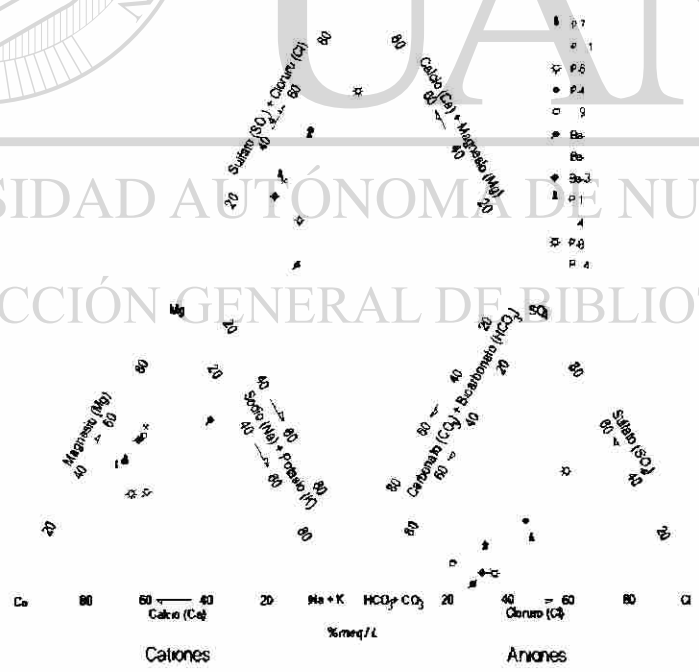


Fig. 8c Zona 3: Muestras tomadas de los alrededores del antiguo tiradero municipal. Aguas de tipo bicarbonatada-cálcicas (predominan bicarbonatos)

De acuerdo a los criterios propuestos en las tablas 5 y 6, las muestras analizadas se dividen en dos grupos muy bien diferenciados, sin embargo, debe subdividirse en una tercera categoría, pues en la zona 3 predominan los bicarbonatos en vez del calcio, denominándose aguas del tipo bicarbonatada-cálcica:

Muestra	Clasificación según Piper
P-1	5f-C3 Cálcico-bicarbonatada
P-4	6f-C3 Cálcico-bicarbonatada
P-8	5e-C3 Cálcico-bicarbonatada
P-11	5f-C3 Cálcico-bicarbonatada
P-14	5f-C3 Cálcico-bicarbonatada
P-15	6f-C3 Cálcico-bicarbonatada
P-16	6f-C3 Cálcico-bicarbonatada
P-17	4e-C3 Cálcico-sulfatada
RP-1	4e-C3 Cálcico-sulfatada
RP-2	4e-C3 Cálcico-sulfatada

Tabla 7 Clasificación hidrogeoquímica de las muestras tomadas durante el 2002 en el área de estudio

4.2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS SEGÚN EL CONTENIDO DE TSD

Los sólidos son materiales suspendidos o disueltos en aguas limpias y en aguas residuales. Cuando estos se presentan 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 agua dulce (varían de 528 – 758 mg/l) (Tabla 8).

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

Tabla 8 Clasificación del tipo de aguas en base a su concentración del total de sólidos disueltos (Davis & De Wiest, 1971, Werner, 1996)

4.2.3 CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE AGUAS POR SU DUREZA

La dureza en el agua indica el contenido en iones alcalinotérreos (Ca^{+2} y Mg^{+2}). Las concentraciones encontradas en las muestras analizadas para dureza total como CaCO_3 varían entre 302.1 y 478.1 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 9).

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

Tabla 9 Clasificación del tipo de aguas en base a su dureza (como CaCO_3 mg/l) tomada de Custodio y Llamas, 1996

4.2.4 CLASIFICACIÓN SAR

Esta clasificación sirve para determinar las condiciones de salinidad del agua al ser utilizada para riego. Se basa en la concentración total de sales solubles expresada mediante la conductividad eléctrica y la concentración relativa del sodio respecto al calcio y al magnesio, denominada índice de adsorción del sodio (SAR).

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

Después de calcular el índice SAR, los valores son comparados contra la conductividad eléctrica en el diagrama de clasificación (Fig. 9) y se determinan las características de las muestras analizadas (Tabla 10).

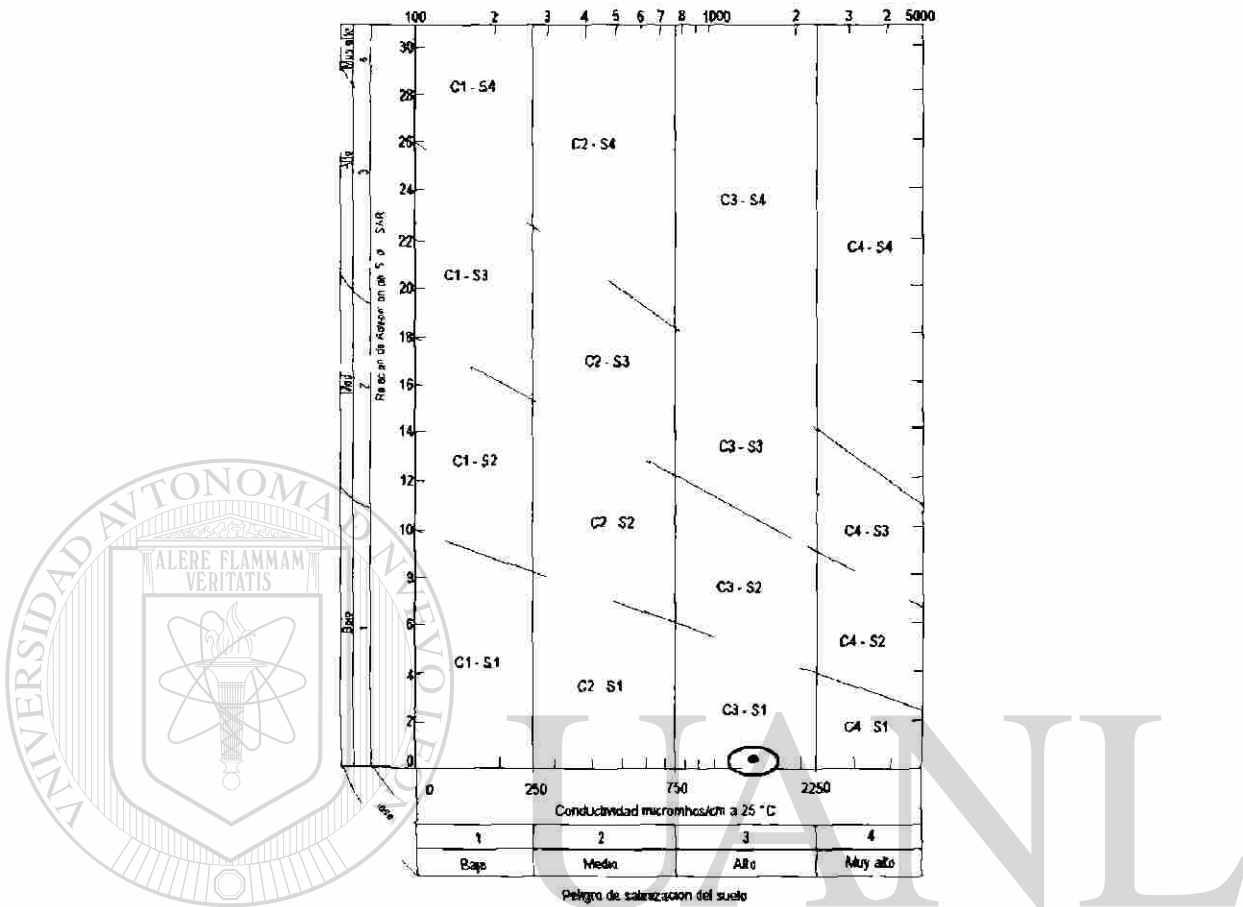


Fig. 9 Diagrama de clasificación para aguas destinadas al riego según el U.S. Salinity Laboratory Staff (tomado de Custodio y Llamas, 1996)

Muestra	C.E. (μ mhos/cm)	SAR (meq/l)	Clasificación
P-1	1035	0.5315	C3-S1
P-4	1003	0.8195	
P-8	1024	1.0174	
P-11	1219	0.6319	
P-14	1010	0.6118	
P-15	1093	0.3459	
P-16	1031	0.2905	
P-17	800	0.2623	
RP-1	756	0.3688	
RP-2	765	0.2869	

Tabla 10 Tipo de aguas para riego según el Salinity Laboratory Staff (Custodio y Llamas, 1996)

El total de las muestras pertenecen al grupo C3-S1 lo cual indica que son aguas altamente salinas, con concentración de sólidos disueltos entre 528 y 758 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 581 m respectivamente del tiradero municipal, en dirección del flujo del agua subterránea.

4.2.5 PARÁMETROS QUE SOBREPASAN LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP)

Límite máximo permisible (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 anteriormente mencionadas (Tabla 11), puede determinarse que los parámetros que exceden sus concentraciones son: sólidos totales, sólidos suspendidos, sulfatos, nitratos, coliformes totales y coliformes fecales, así como bario y mercurio.

Las concentraciones de sólidos totales y suspendidos detectadas sobrepasan los LMP para riego y uso urbano en los diez 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 el cauce superficial (río Pablillo) y al agua subterránea (fosas sépticas y letrinas en la colonia La Petaca) contribuyen a estas altas concentraciones.

Fueron detectados valores de sulfatos en cantidades superiores a los LMP para agua potable según la EEC en los puntos P-15, P-16, P-17, RP-1 y RP-2, mientras que el P-11 se encuentra muy cercano al límite recomendado. Como puede observarse, los puntos localizados en la colonia La Petaca y en el cauce del río Pablillo son los más afectados, probablemente por la intensa actividad en fosas sépticas y letrinas, así como por el vertido de aguas negras hacia el río Pablillo. Altos niveles 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).

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 exceden en casi todos los puntos muestreados, en concentraciones que varían desde 11.5 hasta 50 mg/l, a excepción del P-8, RP-1 y RP-2. Anteriormente el LMP establecido por la NOM-127-SSA1 (1994) era 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.

Los puntos analizados sobre el cauce del río Pablillo no se ven sobrepasados en los LMP. Además, a pesar de que el P-8 se localiza aguas abajo hacia el este del tiradero municipal, no presenta contaminación por nitratos, lo que hace suponer que en los puntos localizados a grandes distancias del tiradero, las concentraciones pueden provenir de fertilizantes, pesticidas y abonos aplicados en las zonas de cultivos, ya que la agricultura origina efectos directos tales como la disolución y el transporte de cantidades excesivas de fertilizantes y grandes láminas de riego. Además, ya que es el contaminante agrícola más abundante, móvil y persistente, como se menciona en distintos trabajos (Abu-Rukah y Al-Kofahi, 2001; Böhlke, 2002), aún cuando no exista aplicación de estos contaminantes, actividades tan comunes como el arado, barbechado y riego agrícola proporcionan cantidades suficientes de este contaminante. Las actividades urbanas también juegan un rol importante en la presencia de estos, ya que las descargas en fosas sépticas y letrinas contribuyen a una elevación en su concentración (Snoeyink, 1990; Custodio y Llamas, 1996; Chave, 2000; USEPA, 2001).

Entre 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; USEPA, 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 también es notoria en cantidades que exceden los LMP para consumo humano según las normas NOM-127-SSA1 (1994) y WHO (2000) en los diez puntos analizados. Las fuentes de origen son de carácter antropogénico, pudiéndose mencionar desde el tiradero municipal, granjas porcinas, así como el vertido de aguas residuales en fosas sépticas y letrinas, ya que provienen principalmente de excretas de humanos y animales y de la descomposición de materia orgánica. Esta carga de contaminación biológica puede contribuir a la proliferación de enfermedades intestinales tales como hepatitis A y E, fiebre tifoidea, disenteria, diarrea y criptosporidiosis (Ling, 2000); náuseas y cefaleas (Langmuir, 1997; Barret et al., 2000; USEPA, 2001).

En Europa se han reportado casos de gastroenteritis, tifoidea y disentería por aguas con cantidades excesivas de coliformes fecales (Chave, 2000). En el área de estudio también se han encontrado casos de enfermedades gastrointestinales por el consumo de agua extraída en el punto P-16 (com. pers. usuarios, 2002).

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 en bario y mercurio representan una amenaza a la calidad en el agua subterránea:

Altas concentraciones de mercurio fueron detectadas en los puntos P-4 (excede los LMP establecidos por todas las normas citadas para riego, uso urbano y agua potable), P-1 (excede los LMP de la NOM-127-SSA1-1994 y WHO-2000), P-8 (excede los LMP EEC-2000), y el P-14 (excede los LMP establecidos por las NOM-127-SSA1-1994, USEPA-2001, WHO-2000 y EEC-2000). El principal órgano dañado por ingerir agua con cantidades excesivas de mercurio son los riñones, los cuales pueden sufrir consecuencias neurológicas y renales (DeZuane, 1997). Respecto al bario, también se encontraron cantidades que exceden los LMP establecidos por la NOM-127 y USEPA en los puntos Ba-2, Ba-3 y P-8. Entre los efectos adversos sobre la salud del consumidor, la exposición severa al bario ocasiona efectos gastrointestinales, neuromusculares y cardíacos (corazón, vasos sanguíneos y nervios del consumidor en humanos y animales) (DeZuane, 1997). En análisis realizados en aguas potables en Estados Unidos se han detectado oscilaciones en bario entre 0.7 y 900 μ mg/l (Langmuir, 1997).

Por la naturaleza de estos metales y por la localización de los puntos que se ven afectados, puede suponerse que la posible fuente de contaminación son los residuos sólidos depositados en el tiradero municipal, ya que la depositación indiscriminada y sin control de desechos incluye también residuos industriales, de productos electrónicos, de vidrio, entre otros, que pueden contribuir a la lixiviación de bario y mercurio, por ejemplo. En cuanto al punto P-14, aunque este se encuentra aguas arriba respecto a las fuentes de contaminación descritas, no se descarta que la misma erosión natural del suelo contribuya a la presencia de mercurio. A pocos metros del punto P-4 atraviesa un poliducto de PEMEX, el cual, si presentara infiltraciones, podría ser una fuente adicional que contribuya a la presencia de bario en este lugar.

Parámetro	NOM-001 ^a		NOM-127 ^b	USEPA ^c	WHO ^d	EEC ^e
	Riego	Urbano	Agua potable			
Temperatura (°C)		40				
pH			6.5-8.5		6.5-8.5	6.5-8.5
Sólidos totales (mg/L)	150	75				
Sólidos suspendidos (mg/L)	1	1				25
Sólidos disueltos (mg/L)			1000		1000	
Cloruros (mgCl ⁻ /L)			250			200
Sulfatos (mgSO ₄ ²⁻ /L)			400			150
Nitratos (mgNO ₃ ⁻ /L)			10	10	10	25
Coliformes totales (NMP/100ml)			0		0	50
Coliformes fecales (NMP/100ml)			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	0.005	0.001	0.002	0.001	0.0005
Selenio (mgSe ²⁻ /L)				0.05	0.01	0.01
Bario (mgBa ²⁺ /L)			0.7	0		

a : NOM-001-ECOL-1996

d : World Health Organization (WHO-2000)

b : NOM-127-SSA1-1994

e : European Economic Community (EEC-2000)

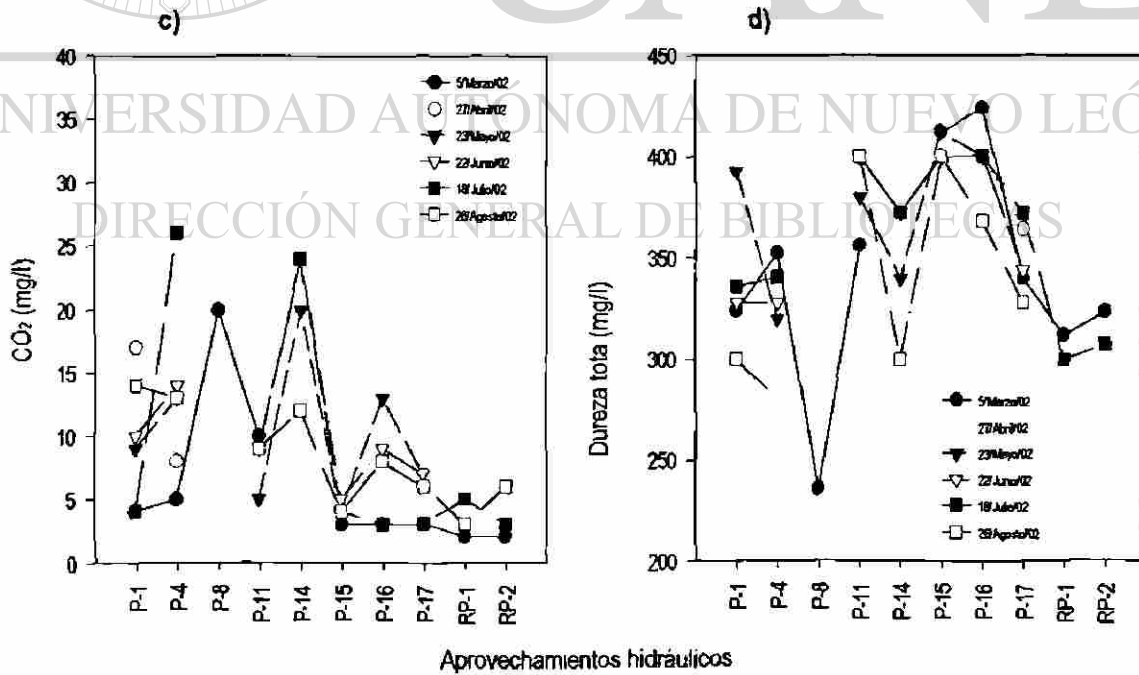
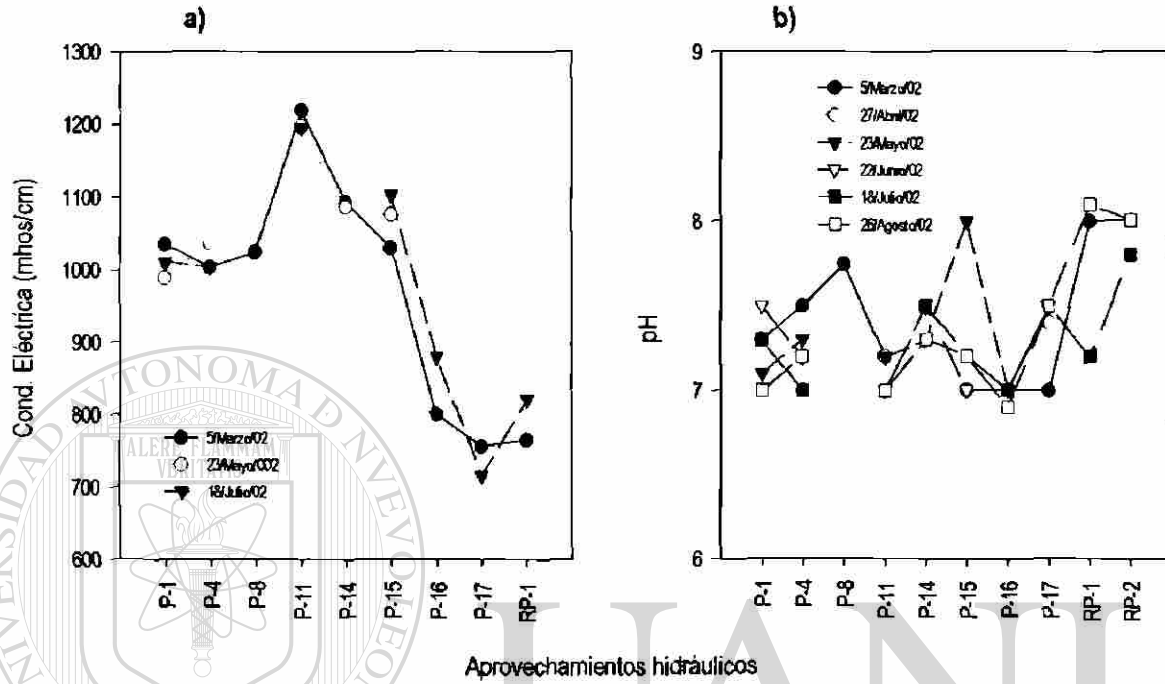
c : United States Environmental Protection Agency (US EPA-2001)

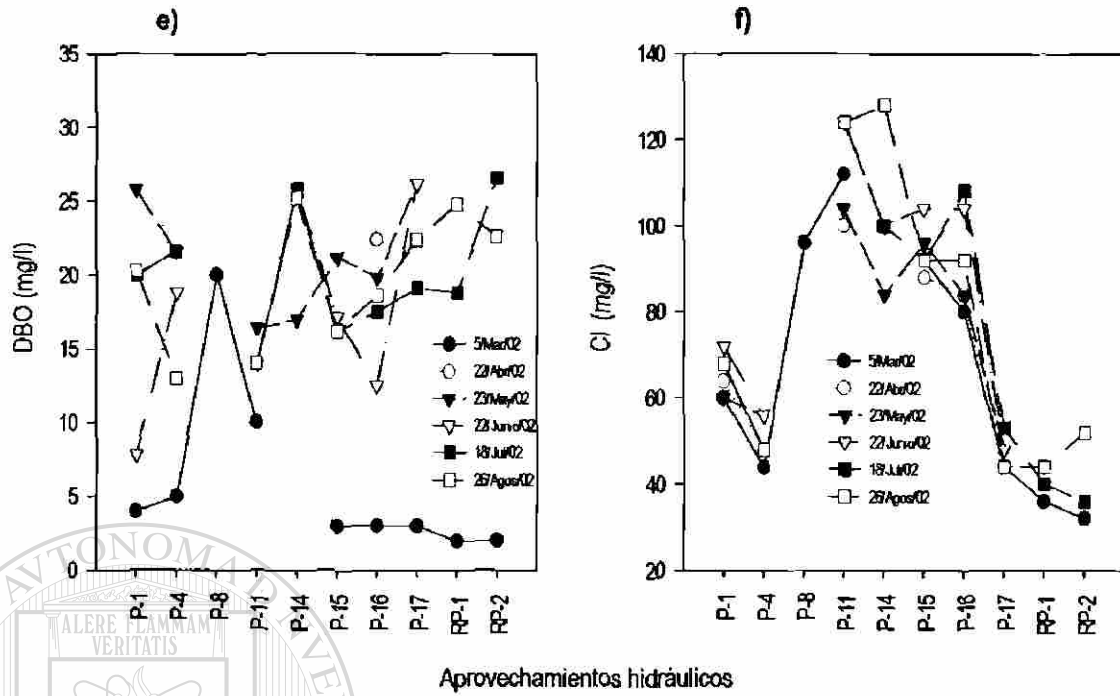
Tabla 11 Límites máximos permisibles (LMP) establecidos por diversos organismos para la calidad del agua

4.3 ANÁLISIS DEL MONITOREO MENSUAL

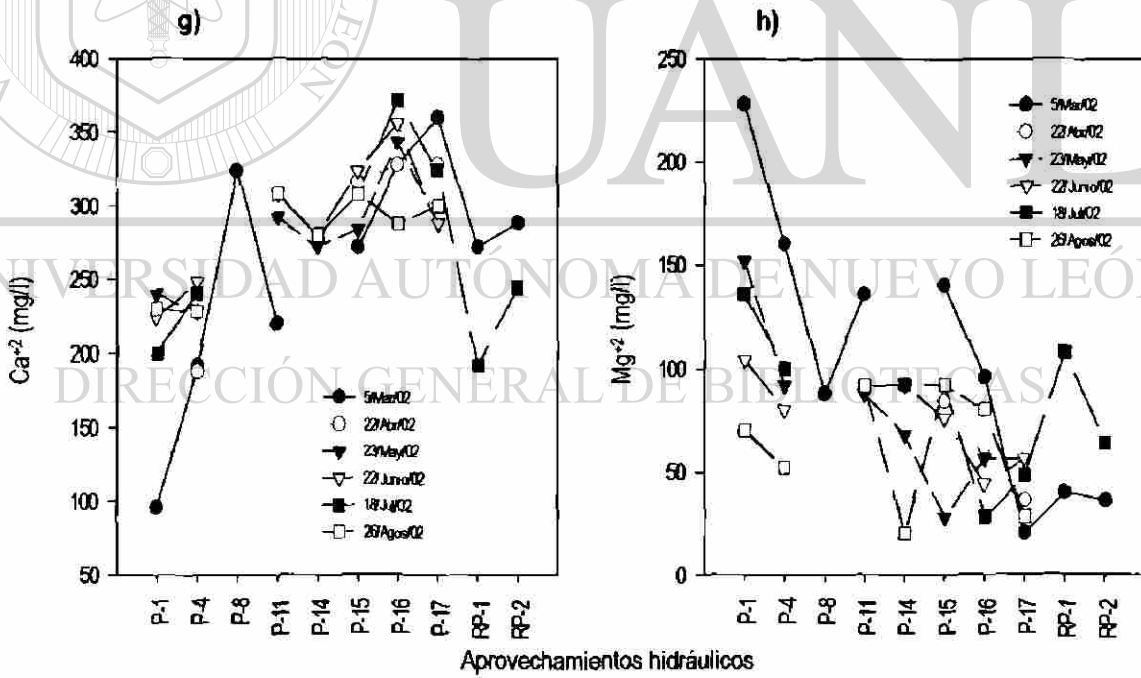
La composición química del agua subterránea es determinada por procesos tales como las condiciones atmosféricas, en particular el balance hidrológico, la interacción del suelo-agua-acuífero y la entrada de sustancias contaminantes por influencia de las actividades humanas. El objetivo de este análisis es determinar la relación entre la composición química del agua subterránea, identificando los parámetros que provienen de manera natural, los de influencia antropogénica y observando los cambios ocurridos durante el periodo de monitoreo. Se realizó un monitoreo hidrogeoquímico en diez puntos seleccionados cuya información se muestra en Anexo 8, además de las características físicas de cada uno de los puntos muestreados, como son: uso de suelo, uso del agua, medio acuífero y profundidad del nivel freático (Anexo 9). Para observar estas variaciones, se distribuyeron los elementos analizados en los 10 puntos muestreados, en los cuales se representa el

valor mensual de sus concentraciones (Fig. 10a ,b ,c ,d ,e ,f ,g ,h). La finalidad de estos diagramas es observar las variaciones espacio/temporales de cada uno de los constituyentes químicos y físicos.





Aprovechamientos hidráulicos



Aprovechamientos hidráulicos

Fig. 10a, b, c, d, e, f, g, h Diagramas de distribución de cada elemento analizado durante el monitoreo hidrogeoquímico, indicando las variaciones observadas para cada uno de ellos durante el periodo de mediciones comprendido entre marzo y agosto del 2002

De acuerdo a lo que indican las figuras 10a, b, c, d, e, f, g, h se observa que las variaciones espaciales fueron notorias en cuanto a la concentración de cada uno de los elementos. Por un lado las precipitaciones ocurridas durante el periodo de monitoreo juegan un papel importante en la dilución de los elementos. La acción antropogénica ejerce influencia también en los aumentos de las concentraciones en elementos tales como la dureza total (DT), conductividad eléctrica (C.E.) y cloruros (Cl).

Durante los periodos en ausencia de precipitaciones –marzo a junio- se observa que la conductividad eléctrica (C.E.), el potencial de hidrógeno (pH), el dióxido de carbono (CO₂), dureza total (por lo tanto calcio y magnesio) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) mantienen sus concentraciones altas, mientras que en los meses de mayor precipitación (julio y agosto) los valores descienden por lo general en todos los elementos antes mencionados. Esto muestra probablemente un efecto de dilución al entrar el agua al acuífero, pues los niveles freáticos aumentan consistentemente.

El factor indicador de las concentraciones en mineralización, es decir la C.E., presenta sus mayores valores en los puntos P-1 y P-11, en los cuales se localizan granjas porcinas y actividades ganaderas respectivamente, por lo tanto debe suponerse que los desechos generados por los animales contribuyen a la generación de sales en el agua subterránea. De la misma forma en que el pH disminuye en los meses en que ocurren lluvias, el CO₂ también desciende en concentración. Además la presencia del CO₂ actúa como reductor de la alcalinidad y contribuye al aumento en el pH. Juega un papel importante también en los procesos de reducción en elementos tales como el oxígeno (reduce a agua), el nitrato a amoníaco y nitrógeno, mientras que el CO₂ se reduce a materia orgánica y produce oxígeno en ausencia de precipitaciones. Por lo tanto, está ligado a las condiciones en que se presenta la DBO, puesto que esta es la cantidad de oxígeno necesaria para reducir la materia orgánica. Cuando existen las mayores concentraciones de CO₂, la DBO también se incrementa en consecuencia. En general, puede observarse que esta relación se cumple en la mayoría de los puntos muestreados (con excepción del P-17, RP-1 y RP-2). Según Custodio y Llamas (1996), cantidades de DBO que exceden los 6 mg/l son índices de una posible contaminación biológica.

Los valores obtenidos en D.T. indican las mayores concentraciones en los puntos localizados en la colonia La Petaca (P-11, P-15, P-16 y P-17), por lo que puede suponerse que provienen parcialmente de la infiltración de fosas sépticas y letrinas.

Entre los iones asociados a esta se encuentran el calcio y magnesio, los cuales presentan un comportamiento muy similar a lo largo del periodo de monitoreo. Estos iones provienen principalmente de la disolución de rocas sedimentarias, son elementos muy solubles y su movilidad es muy similar a la del agua. Otro elemento que presenta las mismas condiciones de movilidad respecto al agua y su solubilidad, es el cloruro. En los análisis realizados se observan sus mayores concentraciones en los puntos localizados también en la colonia La Petaca. Aunque este elemento puede provenir junto con el agua de precipitaciones, también puede asociarse su presencia a la infiltración proveniente de las fosas sépticas y letrinas que ahí se localizan.

4.4 VARIACIONES ESPACIO/TEMPORALES EN LAS CONCENTRACIONES

De acuerdo a lo descrito dentro de la metodología de trabajo, se consideraron factores tales como el monitoreo hidrogeoquímico, monitoreo hidrogeológico, análisis químicos realizados en laboratorio, uso de suelo, uso del agua, así como la ubicación del punto muestreado respecto a las principales fuentes de contaminación para la realización del análisis multivariado. Los resultados obtenidos se representaron en gráficas (Figs. 11 y 12). Mediante la interpretación de dichas gráficas se identificaron los agrupamientos de los elementos y los aprovechamientos hidráulicos analizados, las principales fuentes que ejercen influencia en los puntos muestreados y de esta forma, identificar cuales son las zonas que se ven mayormente afectadas por las fuentes de contaminación.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

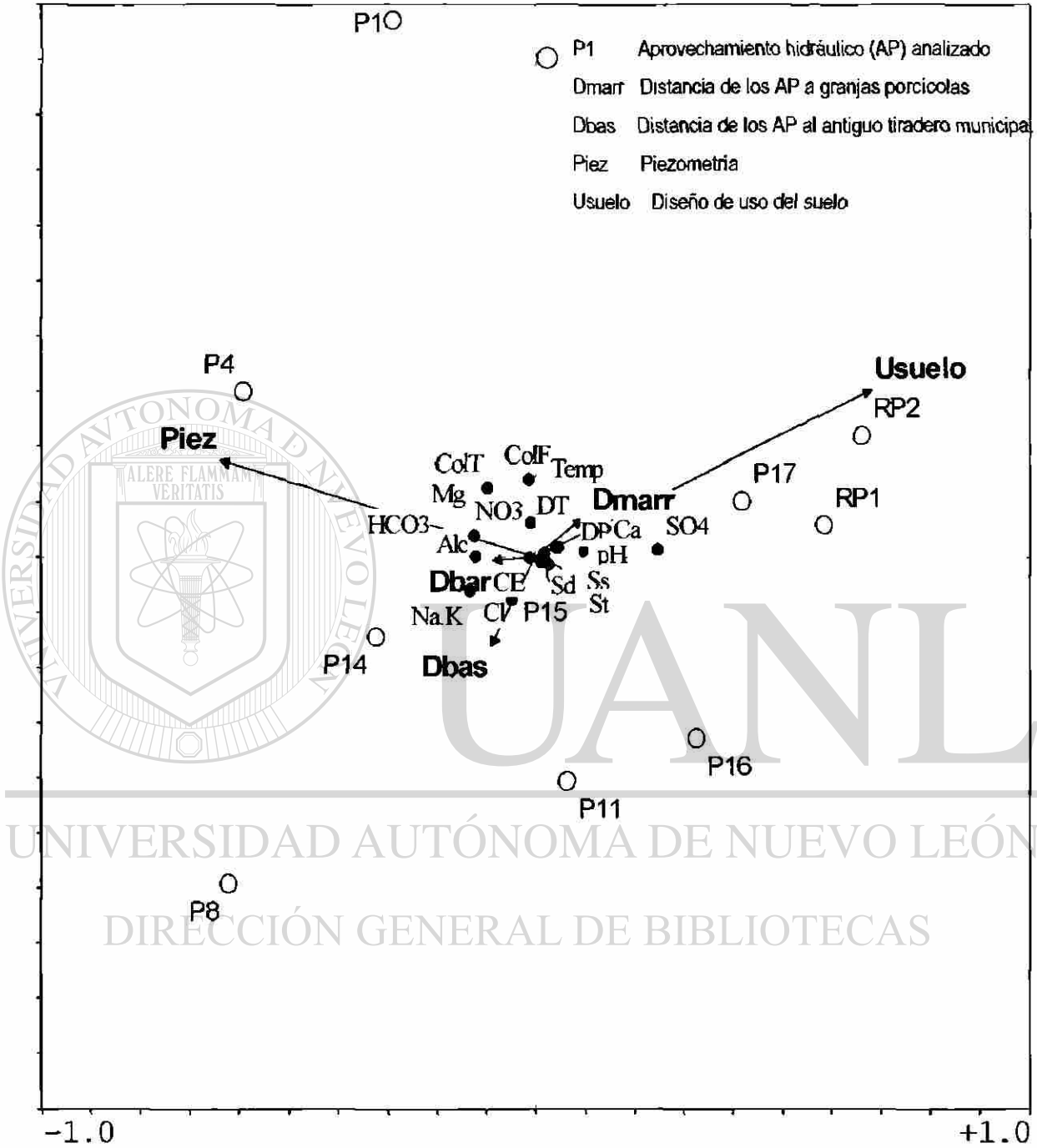


Fig. 11 Análisis de correspondencia canónica para detectar agrupamientos y tendencias de aprovechamientos hidráulicos y elementos químicos analizados en laboratorio y las fuentes de variación, en Linares, N.L. México

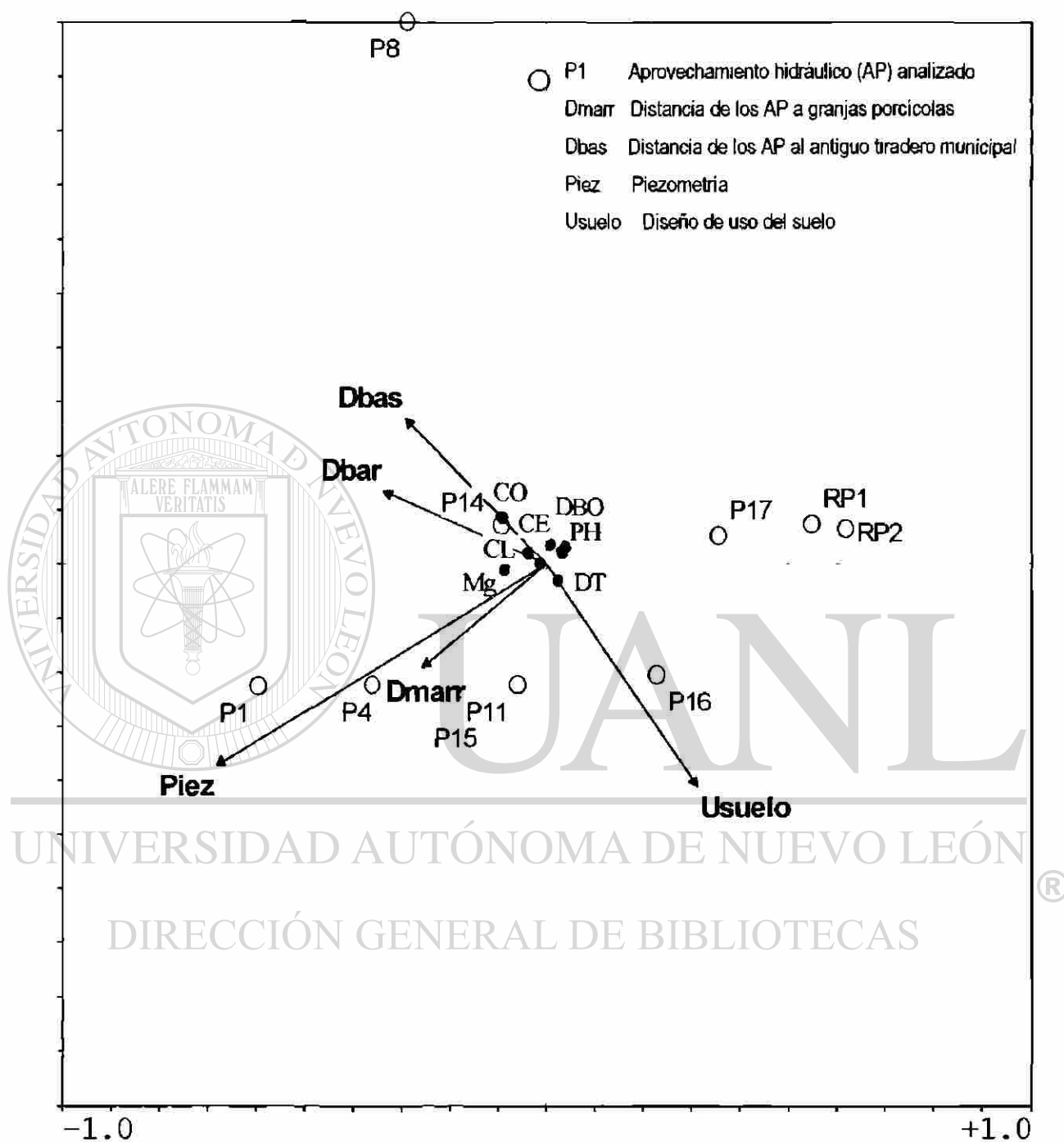


Fig. 12 Análisis de correspondencia canónica para detectar agrupamientos y tendencias de aprovechamientos hidráulicos y elementos químicos analizados durante el monitoreo mensual y las fuentes de variación, en Linares, N.L. México

En las gráficas anteriores (Figs. 11 y 12) pueden observarse las tendencias que presentan los elementos químicos, así como los diferentes aprovechamientos hidráulicos analizados. Las tendencias y agrupamientos de las figuras se describen a continuación.

Los puntos de muestreo P-17, RP-1 y RP-2 se agrupan en el cuadrante superior derecho. Estos muestran una composición química similar, donde los elementos en concentraciones similares son la temperatura, dureza total, dureza parcial, calcio y sulfatos. Estos puntos tienen similitud en cuanto a la distancia a las granjas porcícolas y uso de suelo (dominado principalmente por las descargas de aguas residuales de origen doméstico hacia el acuífero y al río Pablillo). Los puntos P-11 y P-16 se agrupan en el cuadrante inferior derecho. Estos puntos presentan una composición química más o menos similar, donde predominan los sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos suspendidos. Los puntos P-14 y P-15 se agrupan en el cuadrante inferior izquierdo, con el P-8 muy alejado del grupo. Estos poseen elementos con concentraciones similares (sodio, potasio, cloruros y conductividad eléctrica). Estos puntos se localizan a distancias similares respecto al tiradero municipal. Los puntos P-1 y P-4 se agrupan en el cuadrante superior izquierdo. Estos presentan relación con el comportamiento de la piezometría, aunque puede observarse que es el P-4 el que más se aproxima a esta tendencia. Estos puntos también presentan una composición química similar entre sí, donde los elementos en concentraciones similares son los coliformes totales, coliformes fecales, nitratos, magnesio, bicarbonatos y alcalinidad.

En esta gráfica (Fig. 11) puede observarse que la tendencia de los puntos de muestreo es mayor en las partes altas, donde se localizan el tiradero municipal y granjas porcícolas (P-1, P-4, P-8, P-14 y P-15). Esta tendencia va disminuyendo hacia la parte central del área de estudio, en la zona de la colonia La Petaca (P-11 y P-16), donde puede observarse que la contaminación es principalmente de origen biológico (debida probablemente a la descarga de aguas residuales en fosas sépticas y letrinas). La tendencia es menor hacia la zona del río Pablillo (P-17, RP-1 y RP-2), donde el flujo constante del río, así como las precipitaciones periódicas ocurridas durante el año, contribuyen en los procesos de dilución que actúan sobre la composición química del agua. Por lo tanto, se observa que es la parte central del área de estudio en donde la calidad del agua subterránea es más susceptible a la contaminación.

La información recolectada durante el monitoreo hidrogeológico e hidrogeoquímico se representa en la Fig. 12. Debido a que el monitoreo se realizó durante varios meses (febrero-septiembre del 2002), los datos empleados para esta gráfica corresponden a su valor promediado. Sin embargo, debe aclararse que esta información es representativa respecto al comportamiento químico del agua, así como el comportamiento del nivel freático.

Los puntos P-17, RP-1 y RP-2 que se agrupan en el cuadrante superior derecho en forma similar a la Fig. 13, muestran una composición química similar, donde los elementos en concentraciones similares son el pH y la demanda bioquímica de oxígeno. El punto P-16 se localiza en el cuadrante inferior derecho. Este punto presenta una mayor tendencia respecto al uso de suelo, que puede influir en la composición química del agua. El principal elemento presente en este punto es la dureza total. Los puntos P-1, P-4, P-11 y P-15 se agrupan en el cuadrante inferior izquierdo. Estos muestran concentraciones similares en magnesio. Estos puntos presentan un comportamiento similar respecto a la piezometría y distancias más o menos similares respecto a las granjas porcícolas. Los puntos P-8 y P-14 se agrupan en el cuadrante superior izquierdo. Se localizan a distancias similares respecto al tiradero municipal. Estos puntos presentan un comportamiento químico similar, donde los elementos químicos comunes son el cloruro, oxígeno disuelto y la conductividad eléctrica.

En esta gráfica (Fig. 12) puede observarse que la mayor tendencia se concentra en la parte central del área de estudio, donde se localizan el tiradero municipal y granjas porcícolas (P-1, P-4, P-8, P-11, P-14 y P-15). Esta tendencia va disminuyendo respecto a la colonia La Petaca (P-16), mientras que la menor concentración se observa en la zona del río Pablillo (P-17, RP-1 y RP-2). Aún cuando el monitoreo realizado durante el período febrero-agosto del 2002 fue promediado para su interpretación en esta gráfica, puede observarse que las tendencias de los elementos químicos y aprovechamientos hidráulicos representados mantienen una concordancia con los resultados obtenidos en la Fig. 11 y muestran algunas diferencias asociadas con las variaciones entre pozos y fechas. Estas diferencias se observan en el P-1 y P-8, los cuales en algunos periodos entran dentro de la zona de contaminación y en otras veces salen del sistema. Es decir, cambios sutiles en la dirección del flujo por extracciones de los pozos y entradas del agua al acuífero en algunos puntos, juegan un papel fundamental en este comportamiento.

4.5 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 contribuyen de manera antropogénica a esta problemática. La presencia del tiradero municipal, aún cuando este se encuentra clausurado desde hace dos años, contribuye permanentemente a la lixiviación de los residuos sólidos ahí depositados directamente sobre el macizo rocoso, ya que como se describió anteriormente, carece de una geomembrana impermeable que aisle estos del contacto con las precipitaciones, contribuyendo a su lixiviación e infiltración hacia el subsuelo a través de sus fracturas, además de su combustión produciendo gases (Fotos 15 y 16a, b). Entre los elementos detectados que pueden asociarse a este sitio se encuentran: cloruros, coliformes totales y coliformes fecales, nitratos, así como metales pesados tales como el bario, mercurio y arsénico.

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. Entre los aprovechamientos muestreados fue el P-8 el que presentó evidencias de materia orgánica y la composición del agua extraída tenía consistencia lechosa y con alto grado de turbidez.



Foto 15 Residuos sólidos de todo tipo depositados sin control en el tiradero municipal; incluyen envases de aceites y grasas, sólidos oxidables; se encuentran sin cubierta impermeable

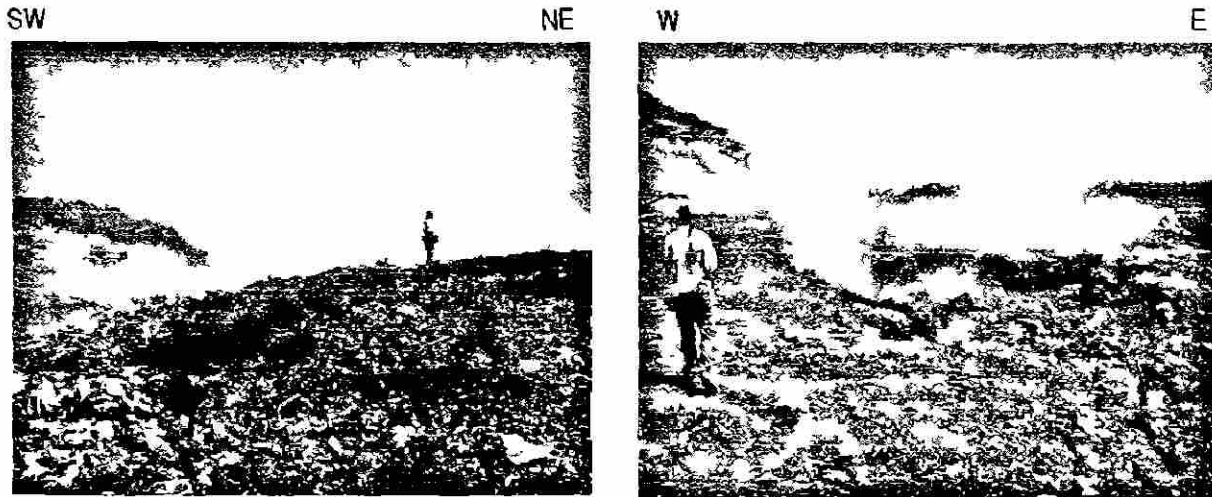


Foto 16a y b Combustión de los residuos sólidos generando además de la infiltración de lixiviados al subsuelo, proliferación de gases en la atmósfera

Como influencia antropogénica deben incluirse las fosas sépticas y letrinas dispersas en la colonia La Petaca, puesto que el nivel freático está localizado a 15 m de profundidad en promedio y 5.75 m en su parte más somera, donde el medio acuifero está compuesto por material poroso muy permeable (acuifero de poros). Entre los elementos asociados a estas fuentes pueden mencionarse los sólidos disueltos, totales y suspendidos; cloruros, coliformes totales y fecales, nitratos, fosfatos y sulfatos. Además, las zonas en donde se concentran animales (tales como las granjas porcícolas) y zonas de cultivos contribuyen también a la presencia de nitratos, fosfatos, coliformes totales y fecales, así como de sólidos (disueltos, totales y suspendidos).

4.6 DISCUSIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA

Los resultados obtenidos de acuerdo a los análisis de calidad del agua realizados identificaron los puntos de muestreo que presentan mayor vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea y sus fuentes. Los parámetros que sobrepasan los LMP indican una clara evidencia de la presencia de contaminación por sólidos totales, disueltos y suspendidos, coliformes totales y coliformes fecales, por sulfatos, nitratos, así como por metales pesados (bario y mercurio).

De acuerdo a la literatura consultada, se puede determinar de forma preliminar la influencia de las fuentes de contaminación sobre estos puntos de muestreo, considerando además que para fortalecer dicho argumento se realizó un análisis estadístico mediante el empleo de distintas técnicas

y utilizando variables medidas continuamente y en una sola etapa, las cuales mantienen relación con el medio físico natural y antropogénico presentes en la zona de estudio (Figs. 11 y 12).

Mediante este análisis puede interpretarse la influencia que el medio antropogénico ejerce sobre la alteración en la calidad del agua subterránea, pero también el medio natural manifiesta influencia sobre la infiltración y el transporte de dichos contaminantes. La relación que existe entre el sistema de fracturamiento en el Cerro La Tortuga, lugar en el que se ubican el tiradero municipal y granjas porcícolas, presenta las condiciones ideales para la infiltración de lixiviados a través de sus fracturas casi verticales hacia el subsuelo. La dirección del flujo del agua subterránea indica la conexión hidráulica entre este acuífero fracturado con el acuífero de poros, favoreciendo el transporte de contaminantes.

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 cultivos y matorrales) y antropogénicas como son las fosas sépticas y letrinas, granjas porcícolas y el vertido de aguas municipales sobre el cauce del río Pablillo, principal fuente de recarga hacia el acuífero.

Este análisis realizado durante varios meses de monitoreo, presenta información sobre las variaciones en la concentración de los distintos parámetros medidos respecto a los periodos de máxima y mínima precipitación, mostrando que aunque este no es el factor determinante y conociendo de antemano que la recarga hacia el acuífero requiere de largos periodos de tiempo, es posible que procesos de dilución estén asociados a sus variaciones (Fig. 10a, b, c, d, e, f, g, h).

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.7 LITERATURA CITADA

- 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.
- Barret 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. World Health Organization Series*. Edited by Chorus I., Ringelband U., Schlog G. and Schmoll O. IWA Publishing, Germany. Pp. 179-185.
- Böhlke J.K. (2002): Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrogeology Journal*, no. 10, pp. 153-179.
- 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. y Llamas M.P. (1996): *Hidrología Subterránea*, Tomos I y II. 2ª ed., 2100 p. Barcelona.
- Davis S.N. y De Wiest R. (1971): *Hidrogeología*. Ed. Ariel, 563 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 pp.
- De León-Gómez y Medina-Barrera (2000): *Impacto ambiental del tiradero de basura de Linares/México, en las aguas subterráneas*. Actas del XI Congreso Latinoamericano de Geología y III Congreso Uruguayo de Geología, Edición Electrónica CD-Rom, Pág. 1-6 Uruguay.
- DeZuane J. (1997): *Handbook of Drinking Water Quality*. 2nd Ed. John Wiley & Sons, 575 p.
- Drescher H. (1995): *Geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Raum Linares, N.L., México*. Diplomarbeit, 117 p. Kiel/Alemania.
- 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.
- Langmuir D. (1997): *Aqueous environmental geochemistry*. Ed. Prentice Hall, 600 pp.
- Ling B. (2000): Health impairments arising from drinking water polluted with domestic sewage and excreta in China. *Water, sanitation and health. World Health Organization Series*. Edited by Chorus I., Ringelband U., Schlog G. and Schmoll O. IWA Publishing, Germany. Pp. 43-46.
- 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.

US EPA-2001: Guidelines for drinking water quality. US EPA

WHO-2000: Guidelines for drinking water quality. WHO, website

EEC-2000: Guidelines for drinking water quality. EEC 2000

Rodriguez de Barbarín C., Barbarín-Castillo J.M. (1993): Influencia de la geología regional, los ciclos estacionales y los asentamientos humanos en la caracterización de las aguas superficiales de la cuenca de Linares-Cerro Prieto, N.L., México. *Geofísica Internacional*, vol. 32, no. 2, pp. 221-235.

Russikoff L., Sherman Sh.J., Sherman A. (2001): *Conceptos básicos de química*. Editorial C.E.C.S.A., 520 pp.

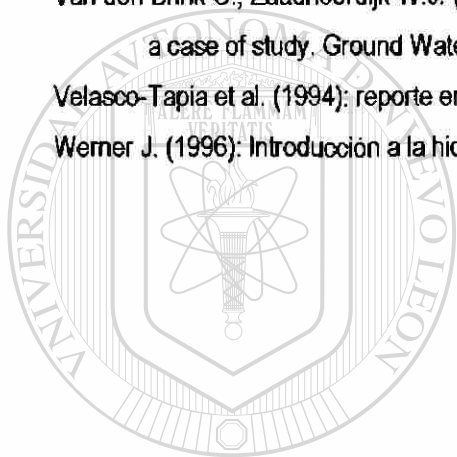
Snoeyink V.L., Jenkins D. (1990): *Química del agua*. Ed. LIMUSA, 508 pp.

Soliman M.M., LaMoreaux P.E., Memon B.A., et al. (1998): *Environmental Hydrogeology*. Ed. Lewis Publishers, 386 pp.

Van den Brink C., Zaadnoordijk W.J. (1995): Evaluation of ground water contamination from nonpoint sources: a case of study. *Ground Water*, vol. 33, no. 3, pp. 356-365.

Velasco-Tapia et al. (1994): reporte en preparación.

Werner J. (1996): *Introducción a la hidrogeología*. 1ª ed. 174 p. U.A.N.L./F.C.T.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 5 RELACIONES ENTRE GEOLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea ha ido adquiriendo mayor atención durante las últimas décadas como una fuente de abastecimiento a la población, debido a su relativamente baja susceptibilidad a la contaminación en comparación a las aguas superficiales.

Sin embargo, el crecimiento poblacional contribuye a la vulnerabilidad de su calidad, generando lixiviados provenientes de vertederos mal controlados, descargando aguas residuales de origen doméstico y municipal sobre cauces superficiales y al subsuelo, así como el resultado de actividades agrícolas y ganaderas. Estos factores contribuyen a la formación de sustancias contaminantes que afectan la calidad del agua de los acuíferos y reduce su valor de consumo. Pero además, la importancia del papel que desempeña el medio físico natural comprendido por el marco geológico, hidrogeológico así como la composición química del agua, pueden ser determinantes en el grado de protección o susceptibilidad que presenta el medio acuífero con respecto a la influencia de estos contaminantes en la calidad del agua subterránea.

ANÁLISIS PRELIMINAR Y DISCUSIÓN

En la zona de estudio las condiciones que presentan el medio geológico, hidrogeológico e hidrogeoquímico están muy ligadas entre sí, pudiendo mencionarse que en conjunto con la influencia antropogénica, pueden representar una seria amenaza a la calidad y disponibilidad del agua subterránea para el abastecimiento de agua potable a la población en el futuro.

El medio acuífero presente en la zona es comprendido por una transición entre un acuífero de fracturas y un acuífero de poros. La profundidad del nivel freático fluctúa en promedio entre los 15 y los 20 m. Aunque el macizo rocoso de la Formación Méndez es 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,

conociendo de antemano que existe una conexión hidráulica entre estos dos acuíferos (Masuch-Oesterreich et al., 1999).

El flujo del agua a través del medio poroso está controlado por el gradiente hidráulico. La composición de las zonas saturada y no saturada, conformadas por conglomerados semi-cementados 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 de suelo y selección de sitios para el confinamiento de residuos sólidos municipales.

La depositación sin control de los residuos sólidos generados por las actividades industrial, municipal y doméstica en el tiradero municipal durante los últimos 20 años, carecen del diseño adecuado con que debe contar todo relleno sanitario para evitar la infiltración de los lixiviados a través de las fracturas, producidos al entrar en contacto los residuos sólidos con las precipitaciones. Entre los contaminantes detectados que pueden afectar a la calidad del agua subterránea se encuentran los cloruros, coliformes totales y fecales, nitratos, bario y mercurio.

La falta de una red de drenaje eficiente que capte las descargas domésticas en la colonia La Petaca, da lugar a la presencia de fosas sépticas y letrinas, mismas que se distribuyen en casi la totalidad de esta zona. Debido a la alta permeabilidad del medio poroso, se facilita la infiltración de contaminantes tales como sólidos disueltos, totales y suspendidos, coliformes totales y fecales, cloruros, nitratos, fosfatos y sulfatos, 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 y zonas de cultivo distribuidas por el área.

Aunque es sabido 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. Es decir, que en base al monitoreo hidrogeológico e hidrogeoquímico realizados durante el año 2002, se pudo observar que los cambios en las concentraciones variaron respecto a los periodos de sequía y de precipitación. Las concentraciones fueron más altas durante los meses de menor precipitación (marzo-junio), mientras que en los meses de mayor precipitación (julio-agosto) estas disminuyeron.

CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA A LA CONTAMINACIÓN

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea es una idea basada 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 esta para atenuar el impacto de contaminantes, propiedades del suelo, el uso del agua, uso de suelo, la distancia del punto hacia las fuentes de contaminación, entre otros.

Estudios sobre la cantidad de contaminación y la vulnerabilidad que presenta el acuífero a la calidad del agua han sido realizados en lugares como México (González et al., 1997), Taiwán (Ting et al., 1998), Turquía (Akgün y Doyuran, 2000), Reino Unido (Chave, 2000), Argentina (Bocanegra et al., 2001) y Korea (Jeong, 2001).

En situaciones donde 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, sistemas de alerta y programas de mitigación. El objetivo principal de este trabajo de tesis consistió en determinar la influencia espacio/temporal que las fuentes de contaminación ejercen sobre la calidad del agua subterránea, con la finalidad de identificar si existe contaminación. Esto permite proponer sistemas de alerta basados principalmente en monitoreos periódicos que comprendan la observación y medición del nivel piezométrico así como de la calidad del agua subterránea durante largos periodos de tiempo.

Dentro de este capítulo se pretenden enmarcar las condiciones de vulnerabilidad que presenta 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 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.

6.1 METODOLOGÍA

La metodología propuesta consistió en clasificar la información recopilada durante la realización de este trabajo, agrupando los factores necesarios para evaluar la vulnerabilidad que presenta el medio acuífero a la afectación de la calidad en el agua subterránea, contenida en la tabla 12. Dicha información además considera: la profundidad del nivel freático, tipo de acuífero, el uso de suelo, el uso del agua, la cercanía de la fuente de contaminación al punto de medición, la dirección del flujo subterráneo, así como la presencia de contaminantes detectados durante el análisis de la calidad del agua.

Una vez agrupada 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 (Tabla 13). 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 44 puntos de muestreo multiplicando estos factores y la suma de los productos indica cuales son los puntos que presentan de mayor a menor vulnerabilidad. Además se realizó una revisión sobre métodos de análisis empleados para determinar áreas de vulnerabilidad, con la finalidad de obtener una comparación entre estos y definir por su eficacia y aproximación, cuales son los más indicados para aplicarse al presente estudio.

Entre los métodos más comunes, Gogu y Dassargues (2000) mencionan el sistema de clasificación GOD (Foster, 1987), 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). 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 aplicar el método GOD, debido a la cantidad de información disponible para su desarrollo (Fig. 13). Posteriormente, esta información es condensada y representada en un mapa de vulnerabilidad, en el cual se muestran las características del sistema del agua subterránea y la ubicación y naturaleza de las fuentes potenciales de contaminación (Anexo 10).

Clave	Nivel Freático (m)	Acuífero	Uso del suelo	Uso del agua
P-1	16.58	Grietas	Granjas porcícolas y pastizales	Cons. humano y animales
P-4	22.43	Grietas	Pastizal	Sin uso
P-5	19.29	Grietas	Pastizal	Sin uso
P-6	11.64	Grietas	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico, animales y riego
P-7	15.52	Grietas	Pastizal	Cons. humano, animales y riego
P-7.1	22.13	Grietas	Pastizal	Cons. humano, animales y riego
P-8	21.69	Grietas	Campos deportivos	Sin usar
P-9	15.4	Grietas	Pastizal y forrajes	Sin usar
P-10	20.82	Grietas	Pastizal	Riego y animales
P-11	11.05	Poros	Agaves, ganado	Cons. humano y animales
P-12	10.57	Poros	Zona urbana	Agua potable
P-14	16.46	Grietas	Pastizal	Cons. humano, animales y riego
P-15	10.47	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano y doméstico
P-16	13.3	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico y riego
P-17	14.46	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico y riego
P-18	14.37	Poros	Particular	Sin uso
P-19	6.87	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico y riego
P-21	13.37	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Sin uso
P-22	13.07	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano y doméstico
P-23	14.18	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Uso doméstico y riego
P-24	13.66	Poros	Cítricos	Riego
P-25	11.88	Poros	Pastizal	Riego
P-26	11.22	Poros	Fosas sépticas/letrinas	Consumo humano
P-27	12.9	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico y riego
P-28	13.4	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico y riego
P-29	13.68	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico y riego
P-31	5.75	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico y riego
P-32	14.14	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Uso doméstico y riego
P-33	8.19	Poros	Zona urbana	Agua potable
P-36	13.85	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico, animales y riego
P-37	12.25	Poros	Particular, fosa séptica/letrina	Uso doméstico y riego
P-38	14.37	Poros	Particular	Sin uso
P-39	11.33	Poros	Pastizal	Sin uso
P-40	18	Grietas	Campos deportivos	Agua potable
P-41	31.5	Grietas	Particular, fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico, animales y riego
P-43	40.07	Grietas	Pastizal	Sin uso
P-44	33.3	Grietas	Pastizal	Sin uso
P-45	16.42	Poros	Pastizal	Riego
P-46	13.78	Poros	Cítricos. Fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico, animales y riego
P-47	18.68	Grietas	Cítricos. Fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico, animales y riego
P-48	11.79	Poros	Cítricos. Fosa séptica/letrina	Cons. humano, doméstico, animales y riego
Ba-1	20.88	Grietas	Industria	Sin uso
Ba-2	22.9	Grietas	Industria	Sin uso
Ba-3	17.17	Grietas	Industria	Sin uso

Tabla 12 Datos recopilados a lo largo del periodo de monitoreo, aplicados para la evaluación de la vulnerabilidad en el área

				Suma de Variables	propuesta	Grado de vulnerabilidad	empleada	simbología				
A	B	C	D	E								
Profundidad del agua (m)	Medio acuífero	Uso del agua	Uso del suelo	Índice de Clasificación Propuesta								
0 - 5 = 9	Poros = 2	Agua potable = 6	Fuente = 6	12 -	Muy baja	I						
6 - 10 = 8		Cons. Humano = 5	Río / urbano = 5									
11 - 15 = 7		Uso Doméstico = 4	Cítricos = 4	10 - 11	Baja	II						
16 - 20 = 6			Cultivos = 3									
21 - 25 = 5	Grietas = 1	Animales = 3	Recreativo / pastizales = 2	8 - 9	Media	III						
26 - 30 = 4		Riego = 2	Matorral = 1	6 - 7	Alta	IV						
31 - 35 = 3			Sin uso = 1				Aguas arriba de fuentes = -1	4 - 5	Muy alta	V		
36 - 40 = 2												
41 - 45 = 1												

Tabla 13 Parámetros de clasificación del método propuesto, empleados en base a las características del área de estudio

6.2 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD EN EL ÁREA

Empleando la información contenida en las tablas 12 y 13 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 no 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.

En el caso de este análisis se combinan los dos conceptos, ya que el medio geológico e hidrogeológico favorecen la afectación de la calidad en el agua subterránea. Como se ha determinado en el capítulo 4, existen contaminantes provenientes de actividades urbanas (sólidos totales, disueltos y suspendidos, coniformes totales y fecales, nitratos, sulfatos, fosfatos, cloruros,

mercurio y bario), pero algunos parecen provenir también del medio físico natural (nitratos, cloruros, sólidos totales, disueltos y suspendidos).

En base a la ubicación de las principales fuentes de contaminación como son el tiradero municipal, granjas porcícolas, fosas sépticas y letrinas en la colonia La Petaca, el vertido de aguas municipales y domésticas sobre el cauce del río Pablillo 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 del 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.

Conforme 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 13). 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 representartas 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

B = Medio acuífero

C = Uso del agua

D = Uso del suelo

E = Índice de clasificación

Se realiza una revisión de literatura sobre métodos de aplicación para el análisis de vulnerabilidad del agua subterránea, de los cuales únicamente es posible aplicar al 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 propuesto por Foster en 1987 (menc. en Gogu y Dassargès, 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 contaminantes hacia el acuífero.

Los valores de clasificación se indican en carta de vulnerabilidad (Anexo 10) y los parámetros que este método considera para el análisis son los siguientes:

G = Medio acuífero

O = Litología de capas superiores

D = Profundidad del agua subterránea en condiciones confinadas o no confinadas

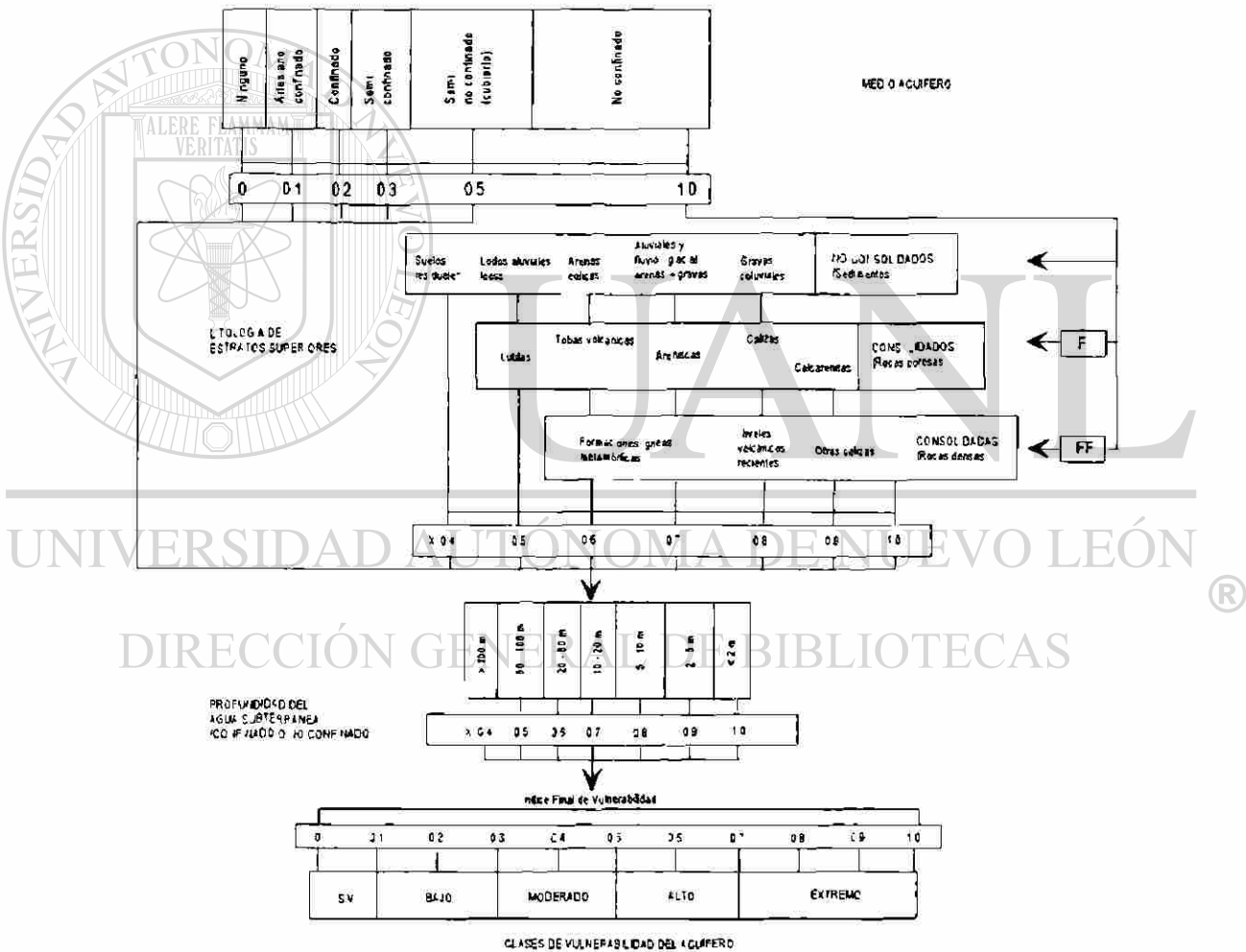


Fig. 13 Sistema empírico GOD, por medio del cual se realiza el análisis de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación (traducción de Foster, 1987)

Los resultados obtenidos al igual que en el método de análisis anterior, se indican en tabla 14:

Clave	Método propuesto					Método GOD				
	A	B	C	D	E	G	O	D	GOD	
P-1	16.58	1	5	6	8.3	III	.3	.5	.7	L
P-4	22.43	1	1	2	7.6	IV	.3	.5	.6	L
P-5	19.29	1	1	-1	6.1	IV	.3	.5	.7	L
P-6	11.64	1	5	6	6.8	IV	.3	.5	.7	L
P-7	15.52	1	5	2	7.1	IV	.3	.5	.7	L
P-7.1	22.13	1	5	2	9.0	III	.3	.5	.6	L
P-8	21.69	1	1	2	7.4	IV	.3	.5	.6	L
P-9	15.4	1	1	2	5.5	V	.3	.5	.7	L
P-10	20.82	1	3	2	7.9	IV	.3	.5	.6	L
P-11	11.05	2	5	6	6.7	IV	1	.7	.7	H
P-12	10.57	2	6	5	6.7	IV	1	.7	.7	H
P-14	16.46	1	5	2	7.4	IV	.3	.5	.7	L
P-15	10.47	2	5	6	6.5	IV	1	.7	.7	H
P-16	13.3	2	5	6	7.4	IV	1	.7	.7	H
P-17	14.46	2	5	6	7.7	IV	1	.7	.7	H
P-18	14.37	2	1	5	5.9	V	1	.7	.7	H
P-19	6.87	2	5	5	5.3	V	1	.7	.8	H
P-21	13.37	2	1	5	5.6	V	1	.7	.7	H
P-22	13.07	2	5	5	7.1	IV	1	.7	.7	H
P-23	14.18	2	4	5	7.0	IV	1	.7	.7	H
P-24	13.66	2	2	4	5.9	V	1	.7	.7	H
P-25	11.88	2	2	2	4.9	V	1	.7	.7	H
P-26	11.22	2	5	5	6.6	IV	1	.7	.7	H
P-27	12.9	2	5	5	7.1	IV	1	.7	.7	H
P-28	13.4	2	5	5	7.2	IV	1	.7	.7	H
P-29	13.68	2	5	5	7.3	IV	1	.7	.7	H
P-31	5.75	2	5	5	4.9	V	1	.7	.8	H
P-32	14.14	2	4	5	7.0	IV	1	.7	.7	H
P-33	8.19	2	6	5	6.0	IV	1	.7	.8	H
P-36	13.85	2	5	5	7.3	IV	1	.7	.7	H
P-37	12.25	2	4	5	6.4	IV	1	.7	.7	H
P-38	14.37	2	1	5	5.9	V	1	.7	.7	H
P-39	11.33	2	1	2	4.4	V	1	.7	.7	H
P-40	18	2	6	2	8.4	III	1	.7	.7	H
P-41	31.5	1	5	-1	11.3	II	.3	.5	.6	L
P-43	40.07	1	1	-1	12.3	I	.3	.5	.6	L
P-44	33.3	1	2	-1	10.7	II	.3	.5	.6	L
P-45	16.42	2	5	2	7.5	IV	1	.7	.7	H
P-46	13.78	2	5	4	7.1	IV	1	.7	.7	H
P-47	18.68	1	5	4	8.5	III	.3	.5	.7	L
P-48	11.79	2	1	4	4.9	V	1	.7	.7	H
Ba-1	20.88	1	1	6	7.9	IV	3	.5	.6	L
Ba-2	22.9	1	1	6	8.6	III	.3	.5	.6	L
Ba-3	17.17	1	1	6	6.8	IV	.3	.5	.7	L

6.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El resultado de las evaluaciones realizadas muestra cierto grado de relación entre ambos métodos. Puede observarse en la carta de vulnerabilidad (Anexo 10) que el área de estudio es subdividida en distintas categorías. Las discrepancias encontradas en los dos métodos se deben al 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 presenta una alta vulnerabilidad respecto al medio físico natural y una vulnerabilidad muy alta a alta en 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 al 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 distintos grados de vulnerabilidad, de acuerdo a la distancia de los pozos a las principales fuentes de contaminación, a la profundidad del nivel freático y al uso de suelo.

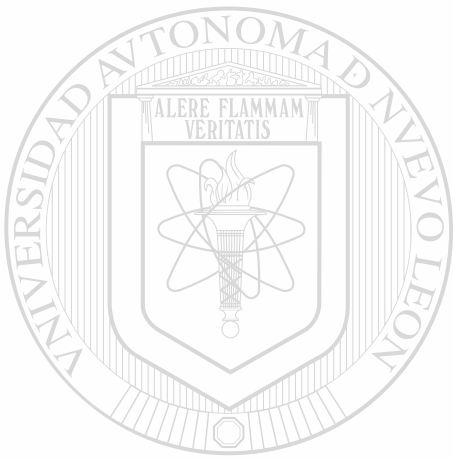
El método propuesto para este estudio clasifica el área de la siguiente forma: se consideran como zonas de muy alta vulnerabilidad a los pozos ubicados sobre el cauce del río Pablillo, cuyo espesor de la zona no saturada no excede los 6 m (P-31), sobre la colonia La Petaca (P-18, P-19, P-21, P-24, P-25, P-38, P-39 y P-48) y sobre el acuífero de grietas (P-9). El resto de la superficie que comprende al acuífero de poros –colonia La Petaca– se clasifica como altamente vulnerable (P-11, P-12, P-15, P-16, P-17, P-22, P-23, P-27, P-28, P-29, P-32, P-33, P-36, P-37, P-45 y P-46) y parte del acuífero de grietas (Ba-1, Ba-3, P-4, P-5, P-6, P-7, P-8, P-10 y P-14). Esta alta vulnerabilidad se debe principalmente a la presencia de fuentes de contaminación directamente en el sitio o muy cercanas. Como vulnerabilidad media se identificaron pozos cercanos al tiradero municipal (P-1, P-7.1, P-40, P-47 y Ba-2). Zonas de baja y muy baja vulnerabilidad se identifican en la parte Sur del área (P-41, P-43 y P-44), en los pozos localizados sobre el lomerío El Tepeyac-San Paulo, en donde la profundidad del nivel freático alcanza casi los 40 m.

En conclusión, la ubicación de los puntos, la profundidad del nivel freático, el tipo de uso de suelo, la distancia de los puntos a las fuentes de contaminación y el tipo de acuífero, son factores muy importantes a tomar en cuenta en el presente análisis. Sin embargo, debe aclararse que este estudio solamente realiza un análisis preliminar de la vulnerabilidad del agua subterránea en la zona. Una mayor confiabilidad en este tipo de estudios requiere una base de datos más extensa, que comprenda monitoreos hidrogeológicos y de calidad del agua durante largos periodos de tiempo (de ser posible durante varios 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, velocidades de infiltración a través de la zona no saturada, su capacidad de atenuar la concentración de contaminantes, entre otros. Con la ayuda de esta información la predicción de zonas de vulnerabilidad puede obtenerse con una mayor precisión, conociendo de antemano las áreas en que existe la presencia de contaminantes.

6.4 LITERATURA CITADA

- Akgün H., Doyuran V. (2000): Environmental geological investigations at the Van open dump site, southeastern Turkey. *Environmental Geology*, vol. 39, no. 6, pp. 660-666.
- Bocanegra E., Massone H., Martínez D., Civit E., Farenga M. (2001): Groundwater contamination: risk management and assessment for landfills in Mar del Plata, Argentina. *Environmental Geology* vol. 40, no. 6, pp. 732-741.
- 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, 440 p.
- 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 Valley, Sonora, Mexico. *Geofísica Internacional*, vol. 36, no. 1, pp. 49-54.
- 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.
- 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* vol. 35, no. 6, pp. 20-36.

Vrba J., Zaporozec A. (1994): Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, volume 16. International Association of Hydrogeologists, 131 pp.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Al final de cada capítulo se realizaron conclusiones preliminares conforme al tema tratado, por lo tanto, en este solo se abordarán las más importantes de manera puntual, enfazándolas con las recomendaciones sugeridas de acuerdo a los resultados obtenidos.

Las condiciones del medio (clima, suelo, geología, hidrogeología, química del agua) presentan una amplia relación con las presiones que ejercen las actividades antropogénicas sobre la calidad del agua subterránea. Los cambios del diseño de uso de suelo, los cuales vienen asociados al crecimiento de la población, contribuyen a la alteración y disponibilidad de los recursos hidráulicos.

La ausencia de un sistema de drenaje eficiente trae como consecuencia la intensa actividad de descargas de aguas domésticas en las fosas sépticas y letrinas dispersas a lo largo de la colonia La Petaca. La falta de un diseño adecuado previo a la ubicación y operación del tiradero municipal, un diseño posterior consistente en cubiertas impermeables que aislen los residuos del contacto con las precipitaciones, y la falta de control en la selección de los residuos sólidos que ahí se depositaron a lo largo de los últimos veinte años, comprenden una de las mayores fuentes potenciales de contaminación al acuífero. Las actividades agrícolas, la aceleración de la salinidad mediante la aplicación de láminas de riego, así como las actividades de animales, también son fuentes que contribuyen a acelerar la alteración en la calidad del agua.

Mediante la evaluación de la calidad del agua subterránea en puntos de muestreo seleccionados, se observó que existen contaminantes que contribuyen a la afectación de la calidad del agua extraída. Observaciones espacio/temporales en el comportamiento químico del agua, indicaron a su vez la interrelación entre las actividades antropogénicas y las precipitaciones sobre los aumentos y descensos en la concentración de elementos. Por otro lado, la evaluación de la vulnerabilidad que presenta el agua subterránea, indica que su calidad se ve mayormente afectada en áreas donde las acciones urbanas mantienen mayor actividad, siendo las fosas sépticas y letrinas en la colonia La Petaca, el tiradero municipal, las granjas porcícolas así como áreas agrícolas, las principales fuentes de contaminación presentes en la zona 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 representa una amenaza hacia la calidad 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 población (educación y cultura ambiental) originan la escasa atención prestada a esta problemática, la cual es un 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 habiéndose 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 necesaria para el análisis completo de la situación actual que presenta el agua subterránea. Además, este tipo de análisis requerirá de una actualización periódica, pues las actividades humanas, el diseño de uso de suelo y el grado de explotación del acuífero varían con el tiempo.

Las medidas de control y remediación que se proponen son las siguientes:

- Establecer redes de monitoreo hidrogeológico y de calidad del agua, que cubran una mayor superficie y menor espaciamiento entre puntos de monitoreo, manteniendo una vigilancia mensual durante largos periodos de tiempo (caso recomendable durante varios años). Se recomienda mantener un registro de las variaciones del nivel freático (al menos mensualmente), así como la observación de las precipitaciones ocurridas durante el periodo de monitoreo.
- Realizar pruebas de bombeo en lugares estratégicamente distribuidos, que proporcionen información sobre el comportamiento hidrodinámico del acuífero, lo que permitirá una mejor comprensión de la reacción del medio acuífero a influencias naturales y de origen antropogénico (velocidades de transporte de partículas, conductividad hidráulica, transmisividad).
- Analizar la composición de los lixiviados generados en el antiguo tiradero municipal, lo que permitirá identificar si existen otros elementos en concentraciones cercanas o que sobrepasen los LMP de calidad del agua (superficial y subterránea) y que representen un peligro a su alteración.
- Concientizar a la población para detener la depositación de residuos sólidos sin control que aún se mantiene en el tiradero municipal, actualmente ya clausurado.

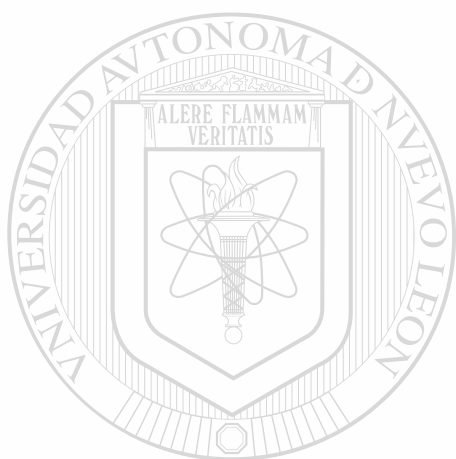
- Diseñar y construir sistemas de geomembranas en el tiradero municipal, que cumplan la función de aislar e impedir que el contacto de las precipitaciones con los residuos sólidos, generen los lixiviados que se infiltran hacia el agua subterránea. Además, pueden instalarse sistemas colectores que controlen la emisión de gases producidos por la combustión de materia orgánica y/o la reubicación de los residuos sólidos en el relleno sanitario de Linares, que actualmente se encuentra en función.
- Se propone la remediación del sitio en donde se localiza el tiradero municipal. Una vez que los residuos sólidos han sido aislados, el lugar puede ser cubierto con material impermeable muy bien compactado y sobre este reforestar la zona. La rehabilitación de este sitio se complementa al brindarle una barrera al suelo contra la erosión.
- Es recomendable además, que las fosas sépticas y letrinas distribuidas en la colonia La Petaca, sean sustituidas por sistemas de drenaje eficientes, que disminuyan las infiltraciones hacia el acuífero.
- Cubrir y sellar los pozos, papalotes y norias que estén sin explotar, ya que estos pueden representar un medio viable para la entrada de contaminantes.
- 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.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LITERATURA CITADA

La lista con la literatura citada en el presente trabajo de investigación ha sido incluida al final del capítulo correspondiente.

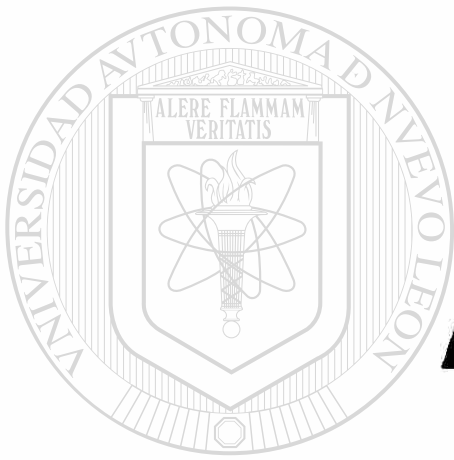


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



ANEXOS

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

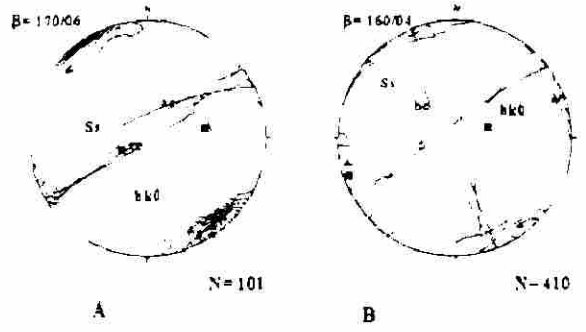
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

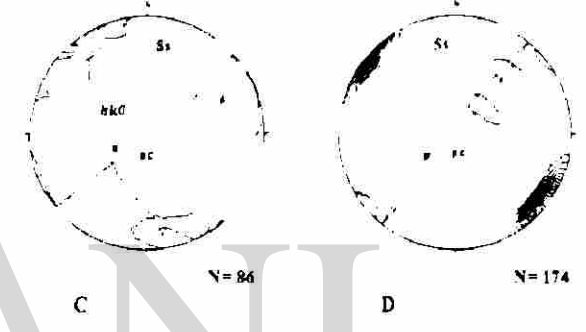
EL ÁREA DEL TIRADERO MUNICIPAL Y LA PETACA, LINARES, N.L., MÉXICO



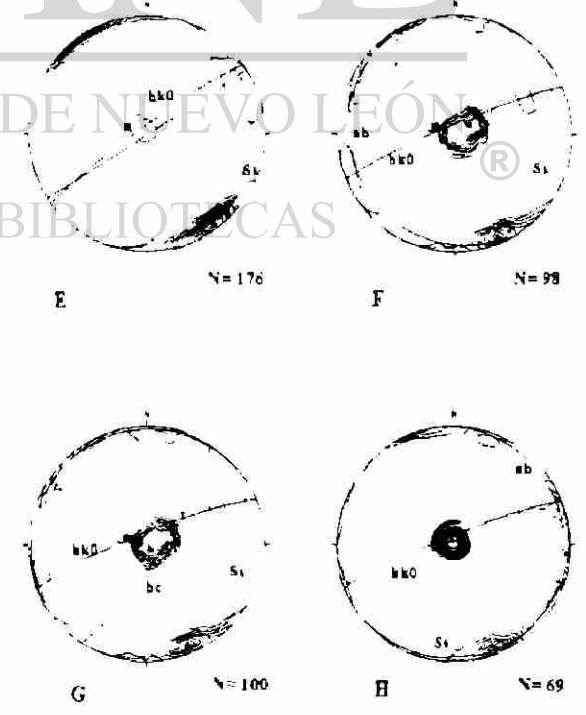
LA TORTUGA



EL CERRITO



EL TEPEYAC - SAN PAULO

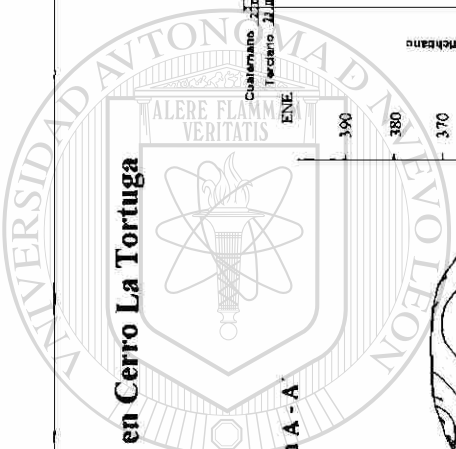


DATOS ESTRUCTURALES

TOPOGRAFÍA SEGÚN HOJA LINARES G14C58 (NEG. 1998)

Generación
 Trazado Superficial
 Mensuración
 Cálculo Superficial
 TIRAD...
 LILA...

Perfiles Geológicos en Cerro La Tortuga

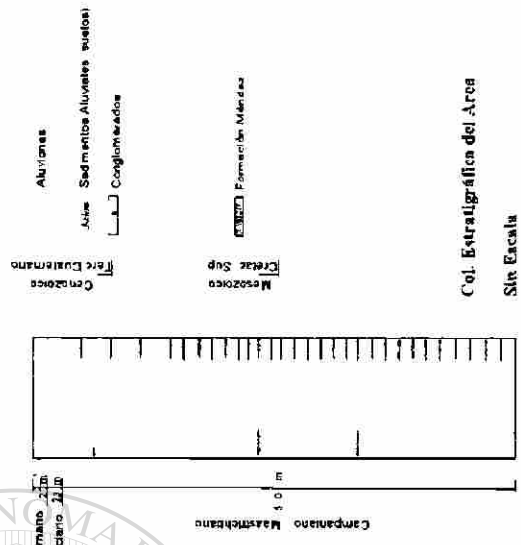


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



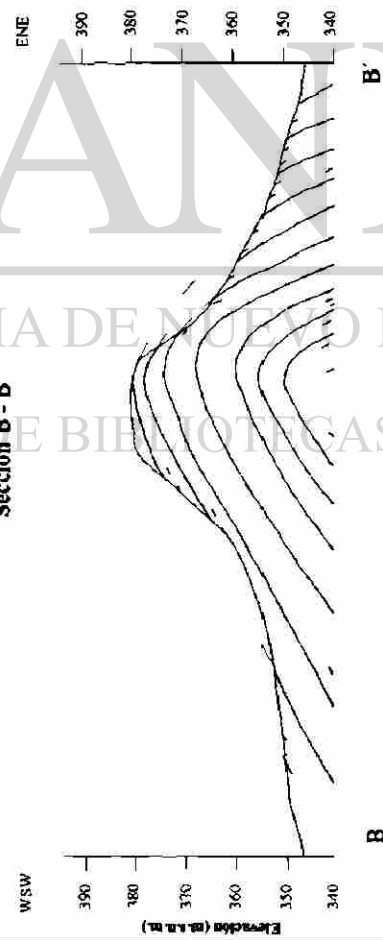
W SW
Elevación (m.s.n.m.)
390
380
370
360
350

Sección A - A'



Col. Estratigráfica del Área
Sin Escala

Sección B - B'



W SW
Elevación (m.s.n.m.)
390
380
370
360
350
340



Escala Horizontal 1: 5000

Escala Vertical 1: 1600

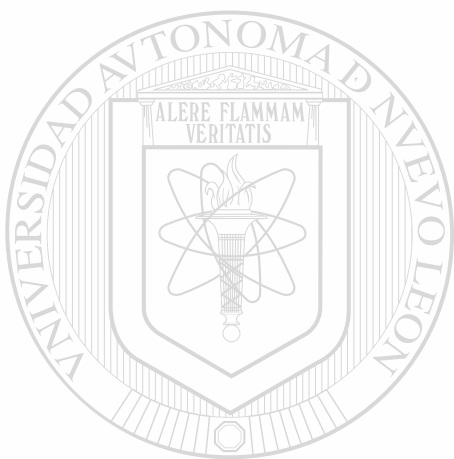
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN	
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA	
PERFILES GEOLÓGICOS EN CERRO LA TORTUGA	2003
LILIANA GPE. LIZARRAGA MENDIOLA	ANEJO 1

Anexo 3 Localización de los aprovechamientos hidráulicos monitoreados y las características litológicas de los acuíferos explotados

Clave	Tipo de aprovechamiento	Localización (coord. UTM)		Elevación del terreno (m.s.n.m.)	Nivel Freático (m)	Nivel Estático (m.s.n.m.)	Litología
P-1	Papalote equipado	14445472E	2748010N	344.75	16.58	328.17	Grietas
P-4	Pozo c/ademe	14446269E	2747149N	352.29	22.43	329.86	Grietas
P-5	Noria s/equipar	14445999E	2747022N	361.26	19.29	341.97	Grietas
P-6	Pozo c/bomba sumerg.	14445673E	2748287N	339.85	11.64	328.21	Grietas
P-7	Pozo c/bomba sumerg.	14445788E	2748147N	345.25	15.52	329.73	Grietas
P-7.1	Pozo c/bomba sumerg.	14446018E	2748121N	343.40	22.13	321.27	Grietas
P-8	Papalote equipado	14446526E	2747695N	344.28	21.69	322.59	Grietas
P-9	Pozo c/ademe	14447134E	2747371N	336.67	15.4	321.27	Grietas
P-10	Papalote equipado	14447468E	2747436N	334.50	20.82	313.68	Grietas
P-11	Noria sin equipar	14445599E	2748540N	338.00	11.05	326.95	Poros
P-12	Pozo c/bomba sumerg.	14444442E	2748767N	343.00	10.57	332.43	Poros
P-14	Noria c/motor	14445138E	2747792N	349.95	16.46	333.49	Grietas
P-15	Noria equipada	14445373E	2748571N	338.84	10.47	328.37	Poros
P-16	Noria equipada	14445612E	2748755N	337.56	13.3	324.26	Poros
P-17	Noria c/bomba	14445879E	2749062N	336.00	14.46	321.54	Poros
P-18	Noria s/equipar	14445536E	2749068N	338.73	14.37	324.36	Poros
P-19	Noria s/equipar	14444745E	2748930N	339.13	6.87	332.26	Poros
P-21	Noria s/equipar	14446273E	2749284N	333.23	13.37	319.86	Poros
P-22	Noria s/equipar	14446346E	2749469N	332.69	13.07	319.62	Poros
P-23	Noria equipada	14446683E	2749217N	330.57	14.18	316.39	Poros
P-24	Noria equipada	14446381E	2749021N	332.95	13.66	319.29	Poros
P-25	Noria equipada	14447053E	2748960N	326.00	11.88	314.12	Poros
P-26	Pozo agua potable	14445182E	2749007N	340.48	11.22	329.26	Poros
P-27	Noria s/equipar	14446455E	2749959N	329.69	12.9	316.79	Poros
P-28	Noria s/equipar	14446689E	2749751N	330.30	13.4	316.90	Poros
P-29	Noria c/bomba	14446997E	2750147N	327.57	13.68	313.89	Poros
P-31	Noria equipada	14445368E	2749624N	335.52	5.75	329.77	Poros
P-32	Noria equipada	14446638E	2750100N	330.27	14.14	316.13	Poros
P-33	Pozo agua potable	14445059E	2749273N	339.69	8.19	331.50	Poros
P-36	Noria equipada	14446110E	2749628N	332.91	13.85	319.06	Poros
P-37	Noria equipada	14445760E	2749497N	332.74	12.25	320.49	Poros
P-38	Noria s/equipar	14445764E	2749118N	337.14	14.37	322.77	Poros
P-39	Noria s/equipar	14444784E	2748487N	346.25	11.33	334.92	Poros
P-40	Pozo agua potable	14444136E	2748329N	356.20	18	338.20	Grietas
P-41	Pozo c/ademe	14444770E	2747346N	367.05	31.5	335.55	Grietas
P-43	Pozo c/ademe	14444353E	2747432N	385.45	40.07	345.38	Grietas
P-44	Pozo c/ademe	14445278E	2747041N	367.40	33.3	334.10	Grietas
P-45	Pozo c/bomba sumerg.	14447177E	2748076N	332.81	16.42	316.39	Poros
P-46	Pozo c/ademe	14446240E	2748507N	334.14	13.78	320.36	Poros
P-47	Pozo c/bomba sumerg.	14445985E	2748288N	338.48	18.68	319.80	Grietas

Continuación Anexo 3

P-48	Pozo c/bomba sumerg.	14446076E	2748676N	333.40	11.79	321.61	Poros
Ba-1	Pozo c/ademe	14445765E	2747459N	356.35	20.88	335.47	Grietas
Ba-2	Pozo c/ademe	14445739E	2747557N	357.61	22.9	334.71	Grietas
Ba-3	Papalote equipado	14445600E	2747642N	353.50	17.17	336.33	Grietas



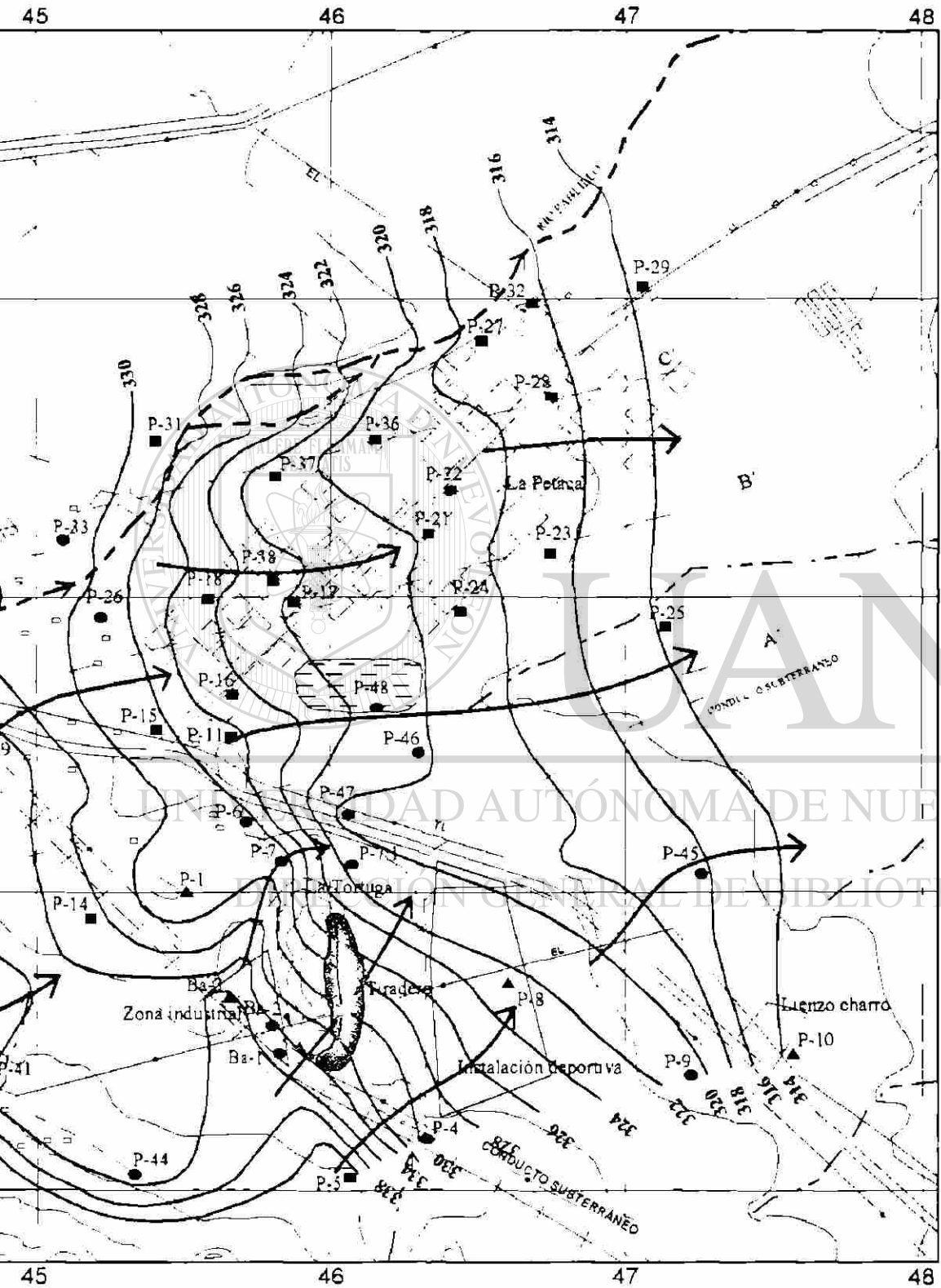
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

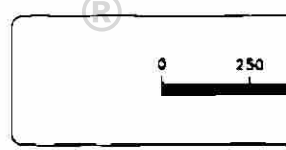


ÁREA DEL TIRADERO MUNICIPAL Y LA PETACA, LINARES, N.L., MÉXICO



- Sim**
- Dirección del flujo subterráneo
 - Curva piezométrica @ 316
 - Aprovechamientos hidráulicos**
 - P-1 ▲ Papalote
 - P-5 ■ Noria
 - P-4 ● Pozo
 - 350 Curva de nivel @ 10 m
 - Corriente intermitente
 - Corriente perenne
 - Terreno sujeto a inundación
 - Represa
 - Tiradero

PIEZOMETRÍA RE



UNIVERSIDAD
FACULTAD
GARTA HIDROGEOLÓGICA
Y LA PETACA
TESIS DE MAESTRÍA
LILIANA GPE. LIZARRA

TOPOGRAFÍA SEGUN HOJA LINARES 6 MCSM (IN EG 1900)

Perfiles Hidrogeológicos



Simbología

Nivel Piezométrico (real, zafado)

Cauce del río Pabellón

Punto de muestreo

Terraza No. 1 (1 m. Horizontes de gravas rellenado con cascadas por arenas y materiales finos sin cohesión)

Terraza No. 2 (2.23 m. Materiales poco consolidados, gravas arena limo y arcillas)

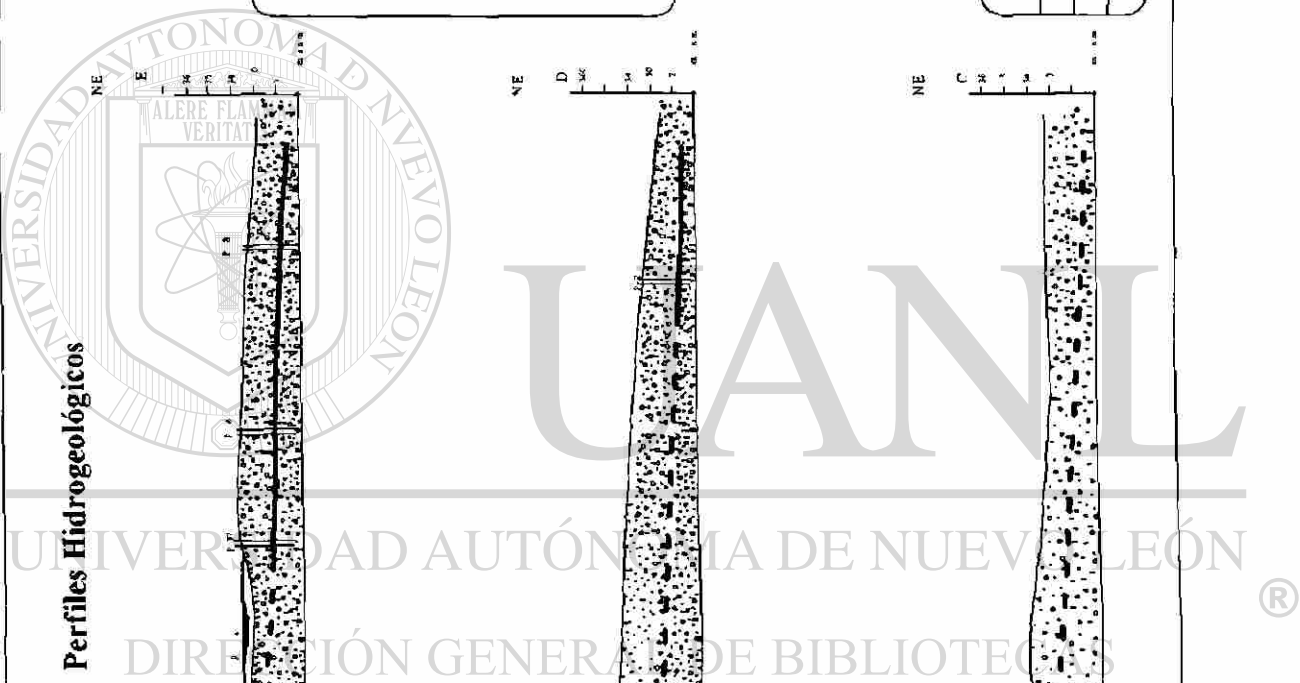
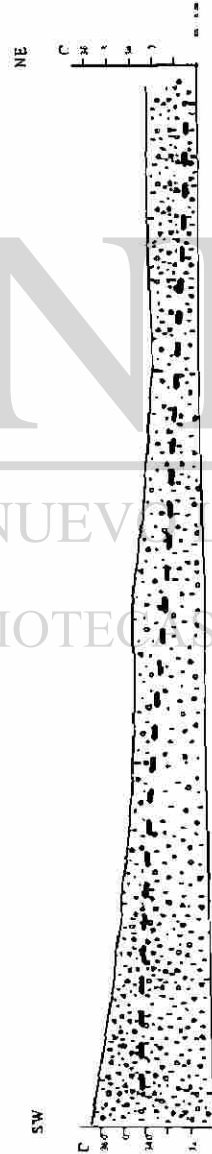
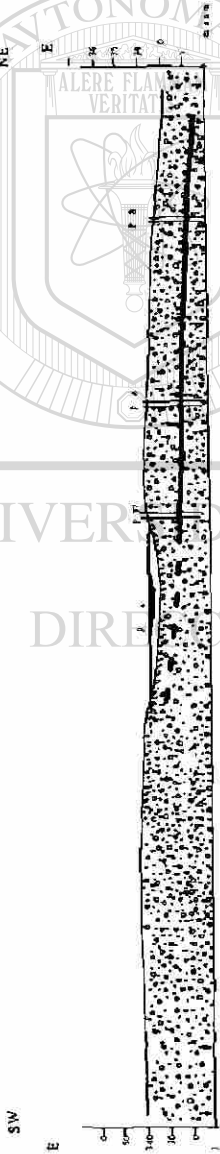
Terraza No. 3 (2.5 m. Gravas redondeadas intercaladas con arenas y limos cementados en bloques)



Escala Horizontal 1:24,850

Escala Vertical 1:3,600

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN	
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA	
PERFIL DE HIDROGEOLOGOS DE LA BEZA	
FINADERO MUNICIPAL LA PLAZA JINARRÉ, N.L., MÉXICO	
ANEXO 6	2003
LILIANA GPE IZARRAGA MENDIOLA	



Punto muestreado	P - 1	P - 4	P - 8	P - 11	P - 14	P - 15	P - 16	P - 17	RP - 1	RP - 2	Ba-2	Ba-3
Fuente	Papalote	Pozo	Papalote	Noria	Noria	Noria	Noria	Noria	Rio	Rio	Pozo	Pozo
Temperatura (°C)	21.6	19	19.4	22	21.8	22.8	23	23.2	17.8	16	--	--
Conductividad a 25°C (μ mhos/cm)	1035	1003	1024	1219	1010	1093	1031	800	756	765	--	--
Potencial de Hidrógeno (pH)	6.94	7.12	6.94	7.04	7.16	7.2	7.03	7.12	8.01	7.89	--	--
Sólidos totales (mg/L)	778	695	843	898	691	742	906	701	629	673	--	--
Sólidos disueltos (mg/L)	636	586	678	756	573	742	701	564	538	528	--	--
Sólidos suspendidos (mg/L)	142	109	165	140	118	0	205	137	91	145	--	--
Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /L)	390.7	443.8	466.3	363.5	381.4	302.2	253.9	187.6	170.8	171.3	--	--
Dureza total (mgCaCO ₃ /L)	411.4	311.4	302.1	426.3	344.7	478.1	448.5	366.9	344.7	348.4	--	--
Dureza parcial (mgCaCO ₃ /L)	264.8	197.3	201.4	308.1	231.6	380.6	360.4	336.3	302	314.1	--	--
Calcio (mgCa ²⁺ /L)	106	79	80.6	123.4	92.7	152.4	144.3	134.7	120.9	125.8	--	--
Magnesio (mgMg ²⁺ /L)	35.6	27.7	24.5	28.7	27.5	23.7	21.4	7.4	10.4	8.3	--	--
Sodio + Potasio (mgNa ⁺ + K ⁺ /L)	66.9	126.9	155.2	114.5	99.7	66.4	54	44.1	60.1	47	--	--
Bicarbonatos (mgHCO ₃ ⁻ /L)	476.6	541.3	568.4	443.3	465.3	368.7	309.7	228.9	208.3	209	--	--
Cloruros (mgCl/L)	67.9	48.2	102.4	114.9	77.4	99.9	79.4	36.7	49.9	32	--	--
Sulfatos (mgSO ₄ ²⁻ /L)	67.1	72.4	27.6	143.6	67.9	172	191.8	214.4	224.7	224.7	--	--
Nitratos (mgNO ₃ ⁻ /L)	50	11.6	2.7	44	30.6	28.5	46.9	11.5	5.5	5.5	--	--
Coliformes totales (NMP/100 ml)	258	210	156	88	130	110	96	86	116	95	--	--
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	30	12	15	10	8	10	12	10	15	12	--	--
Bario (mgBa ²⁺ /L)	--	--	8.7	--	--	--	--	--	--	--	8.7	2.7
Arsenico (mgAs ³⁺ /L)	0.0013	--	0.0031	--	--	--	--	--	--	--	--	0.0013
Mercurio (mgHg ²⁺ /L)	0.0013	0.04	0.0012	--	0.0021	--	--	--	--	--	--	--
Selenio (mgSe ⁴⁺ /L)	--	0.0012	--	--	0.0011	--	--	--	--	--	--	--

Anexo 7 Resultados obtenidos durante los análisis químicos realizados en laboratorio el 5 de marzo del 2002

Fecha del monitoreo: 5 de marzo del 2002

Clave	Turbidez	Materia orgánica	Color	Conductividad a 25°C μ mhos/cm	pH	CO ₂ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L
P-1	Media	Muy poca	Amarillo pálido	1035	7.3	4	92.07
P-4	Muy poca	Muy poca	Incoloro	1003	7.5	5	117.1
P-8	Mucha	Mucha	Café	1024	7.75	20	282.3
P-11	N.D.	N.D.	Incoloro	1219	7.2	10	127.2
P-15	N.D.	N.D.	Incoloro	1093	7	3	101.3
P-16	N.D.	N.D.	Incoloro	1031	7	3	115.5
P-17	N.D.	N.D.	Incoloro	800	7	3	204.5
RP-1	N.D.	N.D.	Incoloro	756	8	2	191
RP-2	N.D.	N.D.	Incoloro	765	8	2	187.5

Clave	Dureza total mg/L	DBO mg/L	NH ₃ ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Ca ⁺² mg/L	Mg ⁺² mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ⁻³ mg/L
P-1	365.3	4	1	63.99	99.41	38.04	19.33	< 0.2
P-4	389.9	5	1	47.67	110.5	28.55	24.87	< 0.2
P-8	287.9	20	2	100.7	125.8	18.49	1.06	0.2
P-11	393.5	10	1	117	1138	25.2	24.6	0.2
P-15	442.7	3	1	96.63	119.8	25.75	60.63	< 0.2
P-16	453.3	3	1	84.39	126.3	19.61	63.42	0.3
P-17	379.4	3	1	47.67	130	9.002	11.58	0.2
RP-1	354.7	2	1	39.51	119.8	11.79	8.186	<< 0.2
RP-2	365.3	2	1	35.43	121.6	11.24	10.16	< 0.2

Anexo 8 Resultados de análisis químicos realizados durante el monitoreo hidrogeológico

Fecha del monitoreo: 27 de abril del 2002

Clave	Turbidez	Materia orgánica	Color	Conductividad a 25°C μ mhos/cm	pH	CO ₂ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L
P-1	Mucha	Mucha	Café	1035	7.2	17	102.3
P-4	Escasa	Escasa	Incoloro	1003	7	8	172.4
P-11	N.D.	Escasa	Incoloro	1219	7.2	38	N.D.
P-15	N.D.	N.D.	Incoloro	1093	7.5	31	131.8
P-16	Escasa	N.D.	Amarillo	1031	7.4	34	137
P-17	N.D.	N.D.	Incoloro	800	7.4	20	169.3

Clave	Dureza total mg/L	DBO mg/L	NH ₃ ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L
P-1	400.5	30	6	68.07	109.6	31.34	32.53	<0.2
P-4	333.6	20	4	51.75	110.1	20.17	6.158	<0.2
P-11	426.4	20	5	104.8	N.D.	N.D.	N.D.	<0.2
P-15	432.2	24.1	1	92.55	124.9	17.94	42.69	<0.2
P-16	432.2	22.4	8	88.47	126.3	14.87	41.21	<0.2
P-17	400.5	20.8	2	43.59	126.3	11.24	20.71	0.2

Continuación Anexo 8

Fecha del monitoreo: 23 de mayo del 2002

Clave	Turbidez	Materia orgánica	Color	Conductividad a 25°C μ mhos/cm	pH	CO ₂ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L
P-1	N.D.	Escasa	Amarillo	989	7.1	9	104.4
P-4	Escasa	Escasa	Incoloro	1036	7.3	13	163.3
P-11	N.D.	N.D.	Incoloro	1197	7.2	5	139.1
P-14	N.D.	Escasa	Incoloro	1086	7.3	20	165.9
P-15	N.D.	N.D.	Incoloro	1077	8	4	106.8
P-16	N.D.	N.D.	Incoloro	1069	7	13	143.9
P-17	N.D.	N.D.	Incoloro	848	7.5	7	169.5

Clave	Dureza total mg/L	DBO mg/L	NH ₃ ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L
P-1	425.1	25.8	1	63.99	116.1	27.43	46.45	<0.2
P-4	361.8	21.6	<1	59.91	114.7	19.05	11.23	<0.2
P-11	414.6	16.4	<1	108.9	122.1	18.49	31.5	<0.2
P-14	379.4	17	1	88.47	119.8	15.7	15.02	<0.2
P-15	442.7	21.2	0	100.7	121.2	10.12	58.44	<0.2
P-16	432.2	19.8	0	88.47	128.1	14.03	39.34	<0.2
P-17	382.9	26.2	0	51.75	121.6	14.03	15.55	<0.2

Continuación Anexo 8

Fecha del monitoreo: 22 de junio del 2002

Clave	Turbidez	Materia orgánica	Color	Conductividad a 25°C μ mhos/cm	pH	CO ₂ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L
P-1	N.D.	Escasa	Amarillo	989	7.5	10	154.2
P-4	Escasa	Escasa	Incoloro	1036	7.2	14	165.5
P-11	N.D.	N.D.	Incoloro	1197	7	9	128.3
P-14	N.D.	Escasa	Incoloro	1086	7.5	24	140.8
P-15	N.D.	N.D.	Incoloro	1077	7	5	135.3
P-16	N.D.	N.D.	Incoloro	1069	7	9	149
P-17	N.D.	N.D.	Incoloro	848	7.5	7	169.5

Clave	Dureza total mg/L	DBO mg/L	NH ₃ ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L
P-1	368.8	7.8	1.5	76.23	114.2	20.73	13.54	<0.2
P-4	368.8	18.8	1.5	59.91	117	17.38	12.54	<0.2
P-11	432.2	14	<1	129.3	124	19.05	43.71	<0.2
P-14	407.5	25.8	1.5	104.8	120.7	19.05	27.98	<0.2
P-15	432.2	17.2	<1	108.9	125.8	16.82	41.69	<0.2
P-16	432.2	12.5	<1	108.9	129.5	12.35	38.01	<0.2
P-17	382.9	26.2	0	51.75	121.6	14.03	15.55	<0.2

Continuación Anexo 8

Fecha del monitoreo: 18 de julio del 2002

Clave	Turbidez	Materia orgánica	Color	Conductividad a 25°C μ mhos/cm	pH	CO ₂ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L
P-1	N.D.	Escasa	Amarillo	1011	7.3	4	135.4
P-4	Escasa	Escasa	Incoloro	1003	7	26	151
P-11	N.D.	N.D.	Incoloro	N.D.	7	9	128.3
P-14	N.D.	Escasa	Incoloro	1195	7.5	24	140.8
P-15	N.D.	N.D.	Incoloro	N.D.	7.2	4	128.3
P-16	N.D.	N.D.	Incoloro	1104	7	3	155.7
P-17	N.D.	N.D.	Incoloro	880	7.5	3	160.4
RP-1	Mucha	Mucha	Café	716	7.2	5	163.7
RP-2	Mucha	Mucha	Café	821	7.8	3	181.6

Clave	Dureza total mg/L	DBO mg/L	NH ₃ ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ²⁻ mg/L
P-1	375.9	20	1	72.15	111.5	25.2	17.37	<0.2
P-4	379.4	21.6	1	51.75	116.1	20.17	16.6	<0.2
P-11	432.2	14	<1	129.3	124	19.05	43.71	<0.2
P-14	407.5	25.8	1.5	104.8	120.7	19.05	27.98	<0.2
P-15	432.2	16.2	1	96.63	124	19.05	43.71	<0.2
P-16	432.2	17.5	1	113	131.4	10.12	36.33	<0.2
P-17	407.5	19.1	1	56.85	125.8	12.91	24.53	<0.2
RP-1	344.2	18.8	1	43.59	110.5	21.29	8.052	<0.2
RP-2	351.2	26.6	1	39.51	116.5	15.14	8.165	<0.2

Continuación Anexo 8

Fecha del monitoreo: 26 de Agosto del 2002

Clave	Turbidez	Materia orgánica	Color	Conductividad a 25°C μ mhos/cm	pH	CO ₂ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L
P-1	N.D.	Escasa	Amarillo	1011	7	14	182.1
P-4	Escasa	Escasa	Incoloro	1003	7.2	13	199.1
P-11	N.D.	N.D.	Incoloro	N.D.	7	9	128.3
P-14	N.D.	Escasa	Incoloro	1195	7.3	12	205.4
P-15	N.D.	N.D.	Incoloro	N.D.	7.2	4	128.3
P-16	N.D.	N.D.	Incoloro	1104	6.9	8	148
P-17	N.D.	N.D.	Incoloro	880	7.5	6	189.2
RP-1	Mucha	Mucha	Café	716	8.1	3	N.D.
RP-2	Mucha	Mucha	Café	821	8	6	N.D.

Clave	Dureza total mg/L	DBO mg/L	NH ₃ ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L
P-1	344.2	20.3	<1	72.15	114.9	15.98	7.11	<0.2
P-4	326.6	13	1	51.75	114.7	13.47	4.453	<0.2
P-11	432.2	14	<1	129.3	124	19.05	43.71	<0.2
P-14	344.2	25.2	1	133.4	120.7	9.002	6.079	<0.2
P-15	432.2	16.2	1	96.63	124	19.05	43.71	<0.2
P-16	404	18.6	<1	96.63	121.6	17.38	25.25	<0.2
P-17	368.8	22.4	1	47.67	123	10.12	10.69	<0.2
RP-1	N.D.	24.8	<1	47.67	N.D.	N.D.	N.D.	<0.2
RP-2	N.D.	22.6	<1	55.83	N.D.	N.D.	N.D.	<0.2

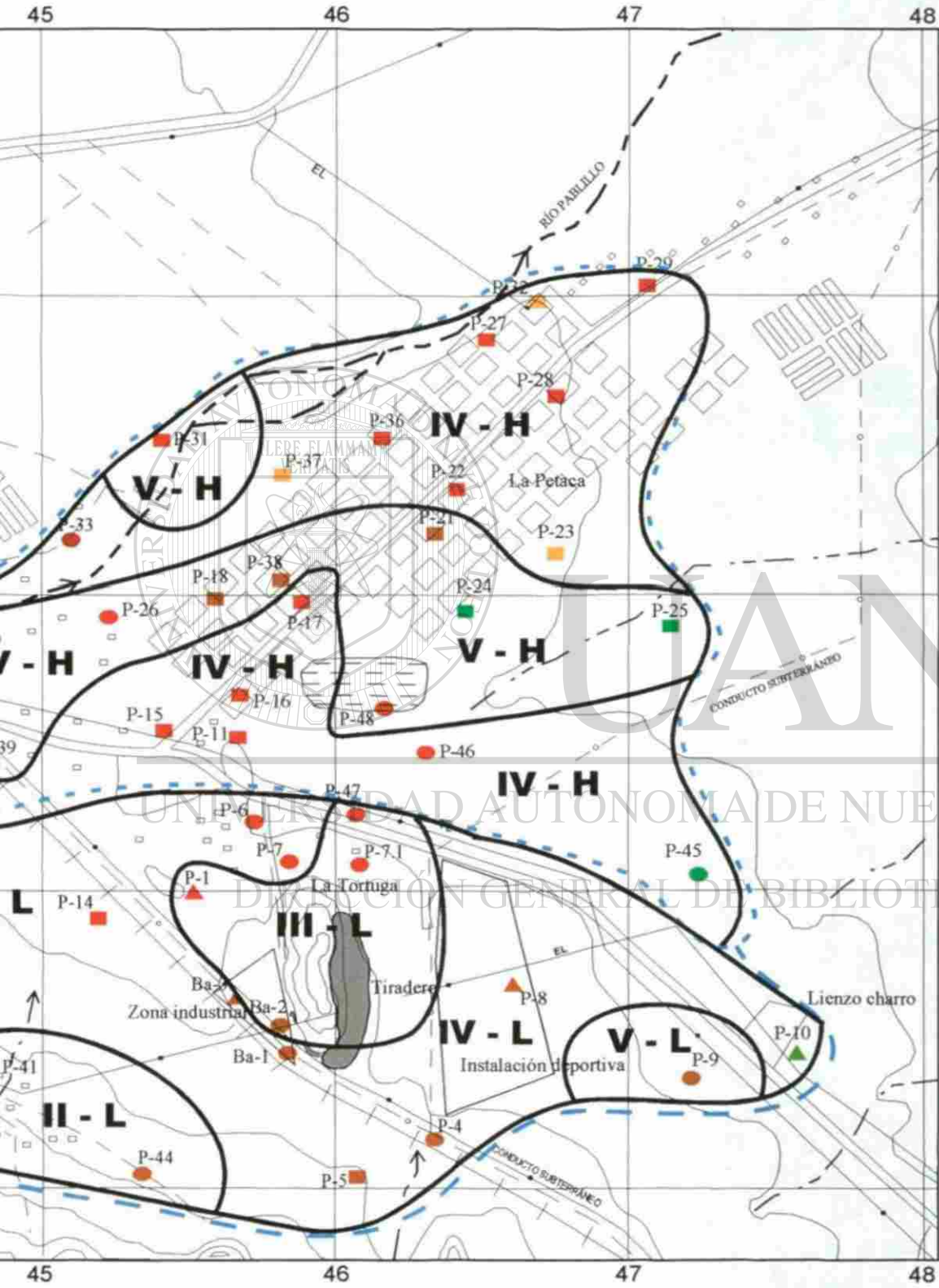
Continuación Anexo 8

Clave	Tipo de aprovechamiento	Uso del agua	Uso del suelo	Tipo de acuífero	Profundidad Nivel Freatico (m)
P-1	Papalote equipado	Cons. humano y animales	Granjas porcícolas y pastizales	Grietas	16.58
P-4	Pozo cládeme	Sin uso	Pastizal	Grietas	22.43
P-8	Papalote equipado	Sin usar	Campos deportivos	Grietas	21.69
P-11	Noria sin equipar	Cons. humano y animales	Agaves, ganado	Conglomerados	11.05
P-14	Noria c/motor	Cons. humano, animales y riego	Pastizal	Grietas	16.46
P-15	Noria equipada	Cons. humano y doméstico	Particular, fosa séptica/letrina	Conglomerados	10.47
P-16	Noria equipada	Cons. humano, doméstico y riego	Particular, fosa séptica/letrina	Conglomerados	13.3
P-17	Noria c/bomba	Cons. humano, doméstico y riego	Particular, fosa séptica/letrina	Conglomerados	14.46
RP-1	Río Pabillo	Cauce natural	--	Conglomerados	--
RP-2	Río Pabillo	Cauce natural	--	Conglomerados	--
Ba-2	Pozo cládeme	Sin uso	Industria	Grietas	22.9
Ba-3	Papalote equipado	Sin uso	Industria	Grietas	17.17

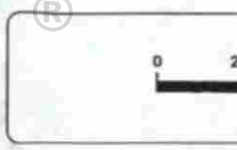
Anexo 9 Características físicas de los puntos de muestreo

CARTA DE VULNERABILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA URBANA MUNICIPAL - LA PETACA, LINARES, N.L., MÉXICO

Sim



- ■ ▲ Pozo, noria, papalote
- Red de agua potable
- Consumo humano
- Uso doméstico
- Animales
- Riego
- Sin explotar
- Tiradero
- Corriente intermitente
- Corriente perenne
- ▨ Terreno sujeto a inundación
- Represa



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
 CARTA DE VULNERABILIDAD DEL TIRADERO MUNICIPAL DE LA PETACA
 TESIS DE MAESTRÍA
 LILIANA GPE. LIZARRAGA

TOPOGRAFÍA SEGÚN HOJA LINARES G14C58 (INEGI, 1999)

