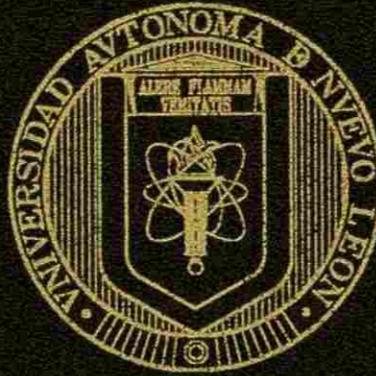


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



TESIS

INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LOS SISTEMAS DE FLUJO
DE LA PARTE NORTE DEL ALTIPLANO POTOSINO

ELABORADA POR
ANGÉLICA BUENO PEDROZA

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR
EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

BECARIO CONACYT NO. 169785
BECARIO SIHGO-PROYECTO 2002020604

ESTA TESIS FUE REALIZADA CON FONDOS DEL PROYECTO CONACYT-SIHGO
CONVENIO 2002020604

LINARES, N. L.

FEBRERO DE 2005

TM

Z5818

.E3

FCT

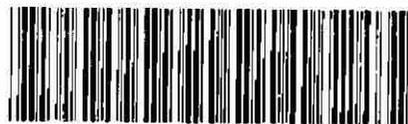
2005

.B8

MAESTRÍA

ANGÉLICA BUENO PEDROZA

2005



1020150567



UANL

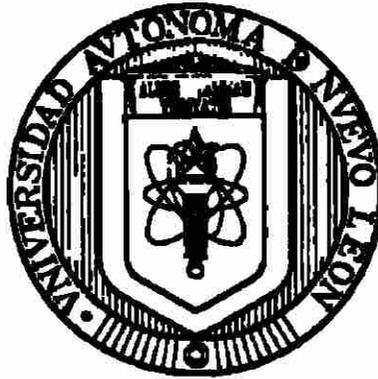
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



TESIS

**INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LOS SISTEMAS DE FLUJO
DE LA PARTE NORTE DEL ALTIPLANO POTOSINO**

ELABORADA POR

ANGÉLICA BUENO PEDROZA

**HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR
EL GRADO ACADÉMICO DE**

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

**BECARIO CONACYT NO. 169785
BECARIO SIHGO-PROYECTO 2002020604**

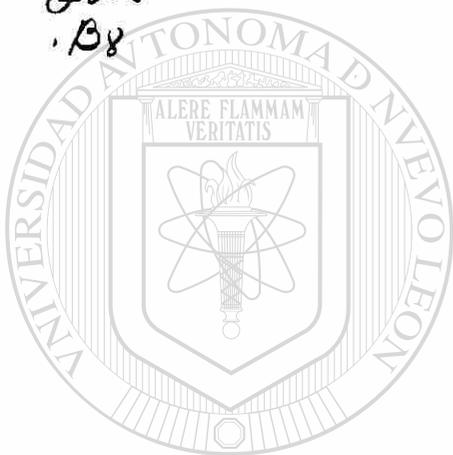
**ESTA TESIS FUE REALIZADA CON FONDOS DEL PROYECTO CONACYT-SIHGO
CONVENIO 2002020604**

LINARES, N. L.

FEBRERO DE 2005

988 864

TH
Z5818
.E3
FCT
2005
.B8



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 LEÓN, MÉXICO
TELS. (821) 21 420 30 y 21 420 20, FAX (821) 21 420 30



La Tesis

**INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LOS SISTEMAS DE
FLUJO DE LA PARTE NORTE DEL ALTIPLANO POTOSINO.**

Elaborada por

ANGÉLICA BUENO PEDROZA

Ha sido aceptada como requisito parcial para optar el grado académico de

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.

DIRECTOR DE TESIS

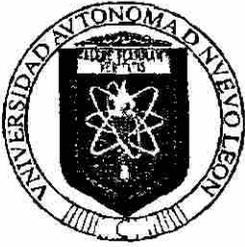
DR. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

ASESOR EXTERNO

M.C. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

LINARES, N.L.

NOVIEMBRE DE 2004



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) 21 420 30 y 21 420 20, FAX (821) 21 420 30



La Tesis

**INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LOS SISTEMAS DE
FLUJO DE LA PARTE NORTE DEL ALTIPLANO POTOSINO**

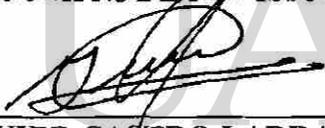
Elaborada por

ANGÉLICA BUENO PEDROZA

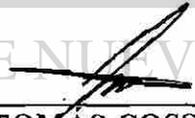
Ha sido aceptada como requisito parcial para optar el grado académico de

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

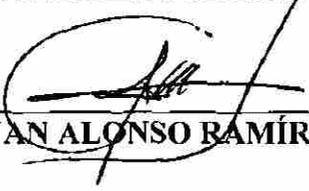
Vo. Bo.
COMITÉ DE REVISIÓN


DR. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA


DR. DIRK MASUCH OESTERREICH


M.C. TOMÁS COSSIO TORRES

Vo. Bo.
SUBDIRECTOR DE POSGRADO


DR. JUAN ALONSO RAMÍREZ FERNÁNDEZ

LINARES, N.L.

NOVIEMBRE DE 2004

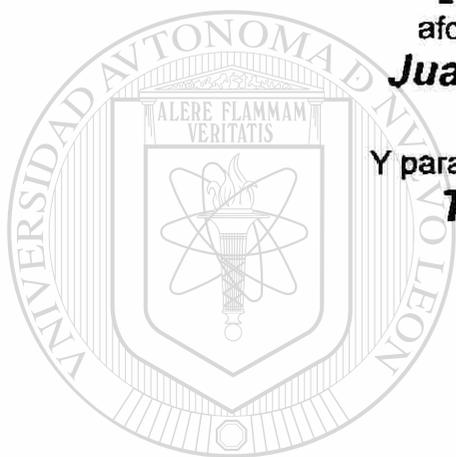
Dedicada a...

Los dos eventos más
afortunados de Mi Vida:

Juan Miguel e Isaac

Y para mis héroes por siempre

Tomás y Linda



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

También para

Emma
Bella
Carolina
Luis Gerardo

Jaime
Francisco Javier
Blanca

En agradecimiento por hacer de mi vida algo tan feliz y lleno de amor

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca-crédito otorgada para el desarrollo de mis estudios de Maestría.

A mis Directores de Tesis Dr. Javier Castro y M.C. Antonio Cardona., por su orientación y apoyo incondicional durante la realización de esta investigación. Tan buenos maestros como amigos.

Al Dr. Dirk Masuch por las revisiones realizadas a este trabajo y colaboración en el mismo así como por el material facilitado para su terminación y al M.C. Tomás Cossío Torres por sus revisiones y comentarios hacia este trabajo. Gracias a ambos también por su amistad.

Al Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández, Sub-Director de Posgrado, por su apoyo para ingresar a esta institución y la atención oportuna que tuvo durante la estancia en la misma.

Al Dr. Uwe Jenchen, por sus interesantes y dinámicas clases, por esa amistad brindada y las innumerables tazas de café que me ha regalado.

Al Dr. Francisco Medina y Dr. Héctor de León Gómez, por compartir sus conocimientos en clase.

A todo el personal que labora en la FCT por los servicios prestados.

A mis compañeros de la UASLP Arturo Pérez y Elías Nuñez por su ayuda y compañía en los recorridos de campo que resultaron en ocasiones verdaderamente riesgosos y brindarme su valiosa amistad durante mi estancia.

A Sandra y Gela del laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por sus atenciones y la realización de algunos de los análisis químicos de este trabajo

A la Comisión Estatal de Agua en Matehuala por su aportación material para este trabajo

Al Servicio de Agua Potable y Saneamiento de Matehuala por el material facilitado.

A la Señora Socorro Dueñas por su hospitalidad y atenciones.

A mis compañeros de Posgrado Juan Miguel Armas, Adalberto Treviño, José Juan Medina, Araceli Rivera, Natalia Amezcua, Elizama Requena, Liliana Lizárraga y Ernesto Nuñez.

Resumen

Se realizó la interpretación hidrogeoquímica del acuífero Cedral-Matehuala ubicado dentro del Altiplano en el estado de San Luis Potosí. La población de esta zona semi-árida del estado sustenta su consumo de agua casi en su totalidad en fuentes subterráneas; la ciudad de Matehuala es el núcleo de población más importante de la zona y es abastecida por medio de una batería de pozos ubicados a varias decenas de kilómetros hacia el noroeste, en las cercanías de la ciudad de Cedral. Se obtuvieron muestras de agua subterránea de diversos tipos de aprovechamientos durante dos campañas de muestreo. Un primer muestreo incluyó 62 muestras y se realizó en temporada de estiaje y un segundo muestreo (56 muestras) en la temporada de lluvias. Las determinaciones realizadas en laboratorio incluyeron aniones (SO_4 , Cl , NO_3 , PO_4 y F), cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}), elementos traza (Li , B , Mn , Fe , Cu , Zn , As , Se , Pb y U , p. ej.). La dirección general de flujo es norte sur y en algunas zonas llega a ser noroeste-sur sureste, localizándose la zona de recarga al norte y al oeste del área de estudio. Los resultados obtenidos muestran que existen tres zonas con características químicas diferentes. El área de los aprovechamientos situados en las cercanías de la Sierra de Catorce presenta el agua de mejor calidad dentro de la zona de estudio, con los contenidos más bajos registrados de STD, SO_4 y dureza aunque está tiene una distribución muy limitada correspondiente a los manantiales situados en la parte sureste de la Sierra de Catorce. Una zona con agua de calidad relativamente aceptable se localiza en la parte norte del área de estudio donde los valores de la mayoría de los parámetros más importantes se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma mexicana, sin embargo en una cantidad significativa de muestras se tienen valores de dureza y SO_4 por encima de la norma. Otra zona la constituye el área de la ciudad de Matehuala y sus cercanías con agua de mala calidad para el consumo humano, con valores de STD y SO_4 sumamente elevados y presencia de elementos traza (As principalmente) importante por su repercusión en la salud. Por medio de los índices de saturación de diversas especies minerales es posible identificar procesos de disolución mineral, sustitución y adsorción que producen cambios en la composición química del agua a lo largo de la línea de flujo. La presencia de elevadas concentraciones de arsénico en algunos de los aprovechamientos localizados en el margen N-NE de la ciudad de Matehuala, sugieren la presencia de fuentes contaminantes en esa región y evidencian una contaminación que está avanzando hacia el sur del área de estudio, en el sentido del sistema de flujo.

Lista de Figuras

Página

| | |
|--|----|
| Figura 1. Distribución de extracciones de agua subterránea en los diversos sectores. | 2 |
| Figura 2. Área de estudio. | 4 |
| Figura 3. Vías de comunicación. | 5 |
| Figura 4. Crecimiento de la población en el área de estudio. | 6 |
| Figura 5. Proyección de la población para el año 2020. | 6 |
| Figura 6. Precipitación media anual. | 8 |
| Figura 7. Temperatura media anual. | 8 |
| Figura 8. Fotografía de la vegetación en del área de estudio. | 10 |
| Figura 9. Provincias fisiográficas de México. | 11 |
| Figura 10. Regiones y cuencas hidrológicas. | 13 |
| Figura 11. Mapa hidrogeológico del área de estudio. | 26 |
| Figura 12 Presas de jales y canales de escurrimiento del distrito minero de villa de la paz. | 30 |
| Figura 13 Diagrama de estabilidad Eh pH de especiación de As disuelto. | 36 |
| Figura 14. Hoja de campo para censo de aprovechamientos | 51 |
| Figura 15. Arreglo de celda de aislamiento | 53 |
| Figura 16. Titulación por el método de Gran. | 56 |
| Figura 17. Gráfica de balances de electroneutralidad. | 61 |
| Figura 18. Mapa de localización de aprovechamientos muestreados. | 64 |
| Figura 19. Mapa de la distribución de la temperatura en los aprovechamientos muestreados. | 67 |
| Figura 20. Mapa de la distribución de la conductividad eléctrica en el área de estudio. | 69 |
| Figura 21. Mapa de la distribución de Sólidos Totales disueltos. | 70 |
| Figura 22. Mapa de la concentración de sulfato. | 72 |
| Figura 23. Mapa de la distribución de sulfato. | 73 |
| Figura 24. Mapa de distribución de cloruro. | 75 |

| | |
|---|-----|
| Figura 25. Mapa con la localización de puntos elevados de N-NO ₃ . | 77 |
| Figura 26. Mapa de la distribución de fluoruro. | 80 |
| Figura 27. Mapa con la distribución de la dureza | 82 |
| Figura 28. Diagrama de Piper. | 84 |
| Figura 29. Mapa con la distribución espacial de la clasificación de Stiff. | 86 |
| Figura 30. Mapa de los aprovechamientos con cantidades medidas de arsénico superior a la normas. | 92 |
| Figura 31. Gráfica de saturación de calcita | 95 |
| Figura 32. Gráfica de saturación de yeso. | 96 |
| Figura 33. Gráfica de saturación de siderita. | 96 |
| Figura 34. Gráfica de saturación de fluorita. | 97 |
| Figura 35. Gráfica de saturación de estroncianita. | 98 |
| Figura 36. Mapa de las profundidades al nivel estático. | 99 |
| Figura 37. Mapa de la distribución de la saturación de yeso. | 103 |
| Figura 38. Gráfica de la saturación de yeso en relación con la concentración de sulfato. | 105 |
| Figura 39. Gráfica de la concentración de calcio en relación con la concentración de sulfato. | 105 |
| <hr/> | |
| Figura 40. Gráfica de la concentración de magnesio con relación a la concentración de sulfato. | 105 |
| Figura 41. Relación de las concentraciones de cloruro y sodio. | 106 |
| Figura 42. Mapas de saturación de jarosita y yeso. | 110 |
| Figura 43. Gráfica de saturación de jarosita | 112 |
| Figura 44. Mapa de la distribución del arsénico en la zona sur. | 113 |
| Figura 45. Gráfica de saturación de la ferrihidrita. | 114 |
| Figura 46. Gráfica de saturación de goethita. | 114 |
| Figura 47. Modelo conceptual | 119 |

Lista de tablas.**Página**

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Balance de aguas subterráneas. | 3 |
| Tabla 2. Clasificación de aridez | 7 |
| Tabla 3. Problemas de suministro de agua a nivel mundial. | 40 |
| Tabla 4. Situación mundial de contaminación por arsénico. | 43 |
| Tabla 5. Trabajos previos. | 47 |
| Tabla 6. Especies preservadas, recipientes usados y conservadores utilizados. | 53 |
| Tabla 7. Elementos sensibles a los cambios redox. | 59 |
| Tabla 8. Parámetros físicos y químicos del primer muestreo. | 65 |
| Tabla 9. Parámetros físicos y químicos del segundo muestreo. | 66 |
| Tabla 10. Temperaturas más altas y bajas. | 68 |
| Tabla 11. Muestras con contenidos elevados de cloruro. | 74 |
| Tabla 12. Muestras con concentraciones elevadas de N-NO3. | 76 |
| Tabla 13. Muestras con contenidos de fluoruro mayores a la norma. | 79 |
| Tabla 14. Muestras con contenidos elevados de sodio. | 81 |
| Tabla 15. Grupos de agua. | 85 |
| Tabla 16. Química de los aprovechamientos de agua para uso doméstico. | 87 |
| Tabla 17. Muestras de agua con contenidos elevados de hierro utilizados con fines potables. | 89 |
| Tabla 18. Muestras que sobrepasan el límite establecido por la OMS para arsénico. | 90 |
| Tabla 19. Muestras que sobrepasan la NOM-127-SSA1-1994 para arsénico. | 90 |
| Tabla 20. Especies de arsénico dominantes. | 93 |

Lista de Abreviaturas

| | |
|--------|--|
| Alc | Alcalinidad |
| CFE | Comisión Federal de Electricidad |
| CMCM | Cuenca Mesozoica del Centro de México |
| CNA | Comisión Nacional del Agua |
| DALY | Dissability Adjusted Life Years |
| DESISA | Desarrollos y Sistemas Sociedad Anónima |
| ESD | Engineered Systems & Design |
| FAA | Flame Atomic Absortion |
| FCQ | Facultad de Ciencias Químicas |
| FIAAS | Flow Injection Atomic Absortion Spectrometer |
| Geomex | Geohidrológica Mexicana |
| Ha | Hectáreas |
| ICP-MS | Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry |
| IEPSA | Ingeniería de Evaluación y Prospección Sociedad Anónima |
| INEGI | Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática |
| max | Máxima |
| med | Media |
| meq | Miliequivalente |
| mg | Miligramo |
| mm | Milímetro |
| Mm | Millones de metros |
| msnm | Metros sobre el nivel del mar |
| N | Norte |
| ND | Nivel Dinámico |
| NE | Nivel Estático |
| ng | Nanogramos |
| NIST | National Institute for Standards and Technology |
| NL | Nuevo León |
| NRC | National Research Council |
| OMS | Organización Mundial de la Salud |
| Ppb | Partes por billón |
| Ppm | Partes por millón |
| PVSLP | Plataforma Valles-San Luis Potosí |
| S | Sur |
| SAPSAM | Servicios de Agua Potable y Saneamiento de Matehuala |
| SCT | Secretaría de Comunicaciones y Transportes |
| SEMIP | Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal |
| SLP | San Luis Potosí |
| SPP | Secretaría de Programación y Presupuesto |
| STD | Sólidos Totales Disueltos |
| T | Temperatura |
| UASLP | Universidad Autónoma de San Luis Potosí |
| UNEPU | United Nations Environment Program |
| V | Volumen |
| WHO | World Health Organization |

1. INTRODUCCION

En el estado de San Luis Potosí, como en algunos otros de la República Mexicana, existe cierta diversidad de ambientes climáticos y morfológicos, situación que divide a la entidad en zonas geográficas, que poseen características particulares desde el punto de vista hidrogeológico. En el caso particular del área Cedral – Matehuala ubicada en la porción norte del Altiplano Potosino, las características climáticas de la región limitan en forma importante la distribución de las fuentes de abastecimiento de agua, y en conjunto con sus rasgos geológicos, son los que determinan la disponibilidad y la calidad del agua y que sea apta para el fin a que se le destine. Este segundo punto es en la actualidad de gran importancia, ya que es determinante para adecuar el recurso hídrico al uso más apropiado y es factor de gran importancia que influye en su disponibilidad.

En los últimos años la demanda de agua (Figura 1) en el área Cedral – Matehuala y más particularmente en la ciudad de Matehuala, que es una de las ciudades más importantes del estado de San Luis Potosí, con una población cercana a los 80,000 habitantes, se ha incrementado por el desarrollo comercial y al aumento de la población de la ciudad particularmente en los últimos 20 años, aunado a esto se tiene la intención de que esta ciudad crezca industrialmente. Debido a la carencia de fuentes de agua superficiales perennes, esta demanda ha sido sustentada, hasta ahora, por medio de fuentes subterráneas, provenientes tanto de pozos localizados en el acuífero Cedral-Matehuala, (80% de la demanda) así como por el caudal de algunos manantiales, como lo es el manantial La Maroma localizado a 30 km en la estribación este de la Sierra de Catorce, al suroeste de la ciudad de Matehuala. Sin embargo, la calidad de estos manantiales no ha sido evaluada adecuadamente, por lo que no se tiene la seguridad de que se le está dando un uso acorde con sus características químicas.

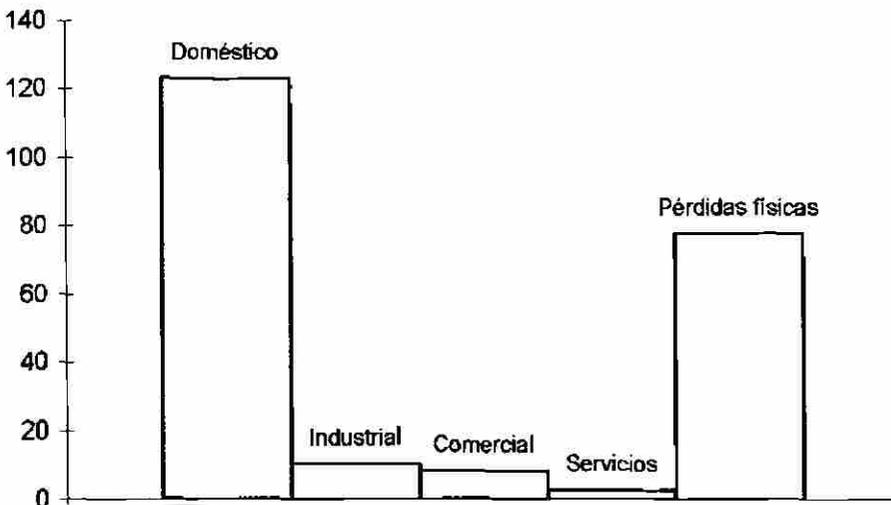


Figura 1. Distribución de las extracciones de agua subterránea entre los diversos sectores (extracción en litros por segundo, SAPSAM, 1999).

Estas fuentes de abastecimiento (pozos y manantiales), se ven sujetas a presiones producidas por la población, ya que solicitan un abasto creciente, además de un servicio eficiente por parte de los organismos operadores. Por otro lado, también el sector agrícola, el cual consume el 75% del agua extraída en la región, requiere de grandes volúmenes de agua, situación debida a prácticas agrícolas tradicionales, donde porcentajes aproximados del 60% del volumen de agua originalmente extraída son perdidos ya sea por procesos de evaporación o infiltración a través de los canales de riego, acequias, y en los mismos campos de cultivo (Rushton, 1997).

La región de Cedral–Matehuala tiene una importancia especial en el aspecto hidrogeológico, ya que dentro de las características climáticas del altiplano se tiene disponibilidad aceptable de agua subterránea. Desde el punto de vista de calidad, se han identificado zonas en los alrededores de Cedral que presentan condiciones adecuadas para uso potable o agrícola, lo que ha propiciado la competencia por el recurso entre estos usos, lo cual es una característica típica de regiones semiáridas por lo que es apremiante una planeación sustentable para cada sector.

Con este panorama, a través de los años se han identificado algunas repercusiones negativas para el acuífero, como es el incremento de las profundidades de los pozos de extracción, así como cambios en la calidad del agua que se obtiene de ellos debido a la intrusión de aguas de mala calidad principalmente en la parte sur del acuífero (alrededores de la ciudad de Matehuala).

Adicionalmente, estudios recientes de Razo-Soto (2002) mostraron que una zona del acuífero, principalmente en la zona noreste de la ciudad de Matehuala y algunos sitios cercanos a la misma se encuentran impactados por arsénico y metales pesados (Razo-Soto, 2002), hecho que parece está relacionado con las actividades mineras desarrolladas durante los últimos 200 años.

Considerando las condiciones hidrogeológicas establecidas administrativamente por la Comisión Nacional del Agua, y de acuerdo a la relación existente entre la recarga natural de agua subterránea y la extracción por bombeo, la zona de Cedral - Matehuala ha sido declarada administrativamente como sobreexplotada. (Tabla No.1)

Tabla 1. Balance de Aguas Subterráneas.

| Recarga | Extracción | Diferencia | Agrícola | Público | Doméstico | Industrial |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Mm ³ /año |
| 34.0 | 54.0 | -20.0 | 40.0 | 12.0 | 1.60 | 0.40 |

SAPSAM, 1999

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

2. ANTECEDENTES

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende el valle localizado entre la Sierras de Catorce y la Sierra Azul con un área aproximada de 1500 km² y en el cual se localizan las poblaciones de Matehuala, Cedral, La Paz y Vanegas, en el estado de San Luis Potosí (Figura 2) que son cabeceras municipales, además de pequeñas poblaciones esparcidas en toda la zona.

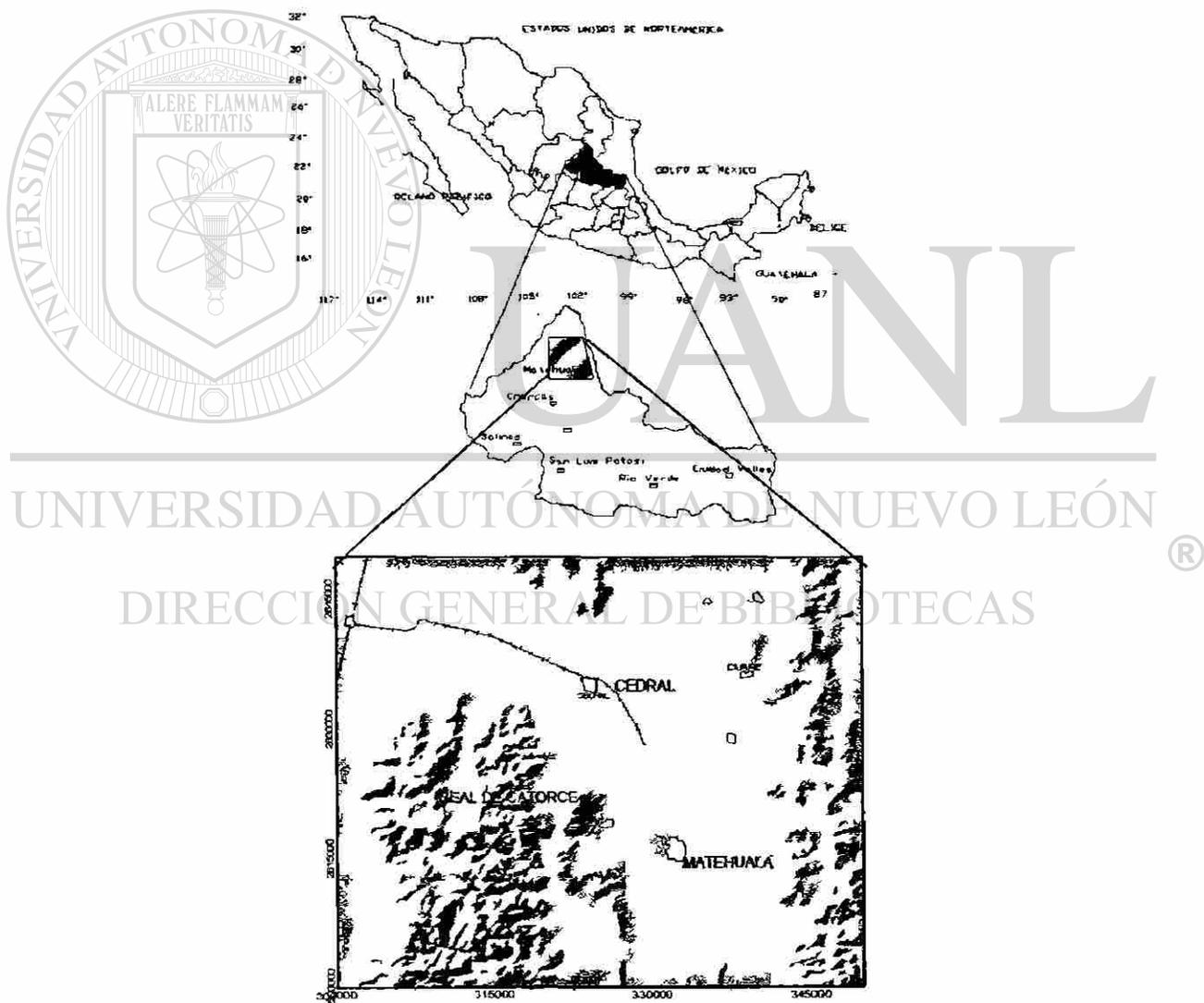


Figura 2. Área de estudio.

2.2. VÍAS DE COMUNICACIÓN

Las vías principales de comunicación son la carretera federal N° 57 México-Piedras Negras, tramos San Luis Potosí-Salttillo y dos estatales, una que comunica a la carretera Zacatecas-Salttillo en el entronque a San Tiburcio y la segunda que comunica a Dr. Arroyo, N. L. (Figura 3). Toda la zona posee varios caminos vecinales y brechas que conducen a las diferentes poblaciones. También se cuenta con la vía férrea México-Laredo, que cruza por el extremo occidental de la zona de estudio.

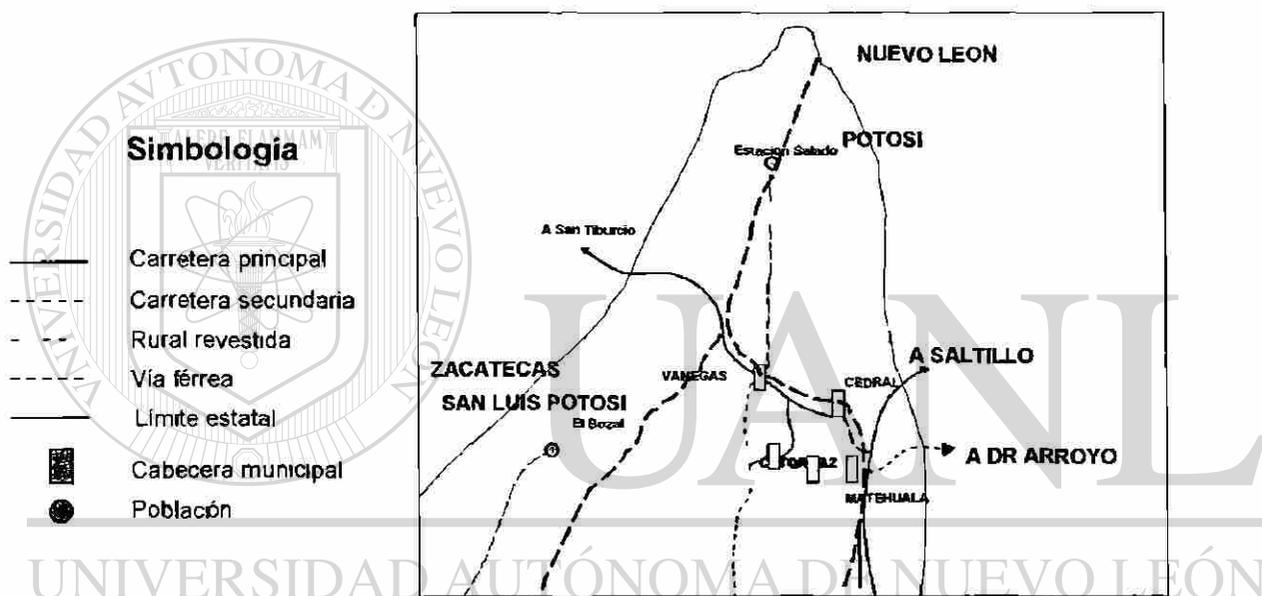


Figura 3. Principales vías de comunicación (SCT, 2003)

2.3. POBLACIÓN

En el crecimiento histórico de la población se observa una tasa máxima de crecimiento de 3.75 % durante los años 1970's; en el año de 1995 el organismo operador del agua (SAPSAM) hizo un cálculo por medio del número de tomas domiciliarias considerando una media de 4 habitantes por casa, que arrojó una población de 70,200 habitantes en la ciudad de Matehuala, así la tasa de crecimiento descendió hasta 2.7% y durante los 1990's se llegó a una tasa de 2.1% como se observa en la Figura 4 (SAPSAM, 1999).

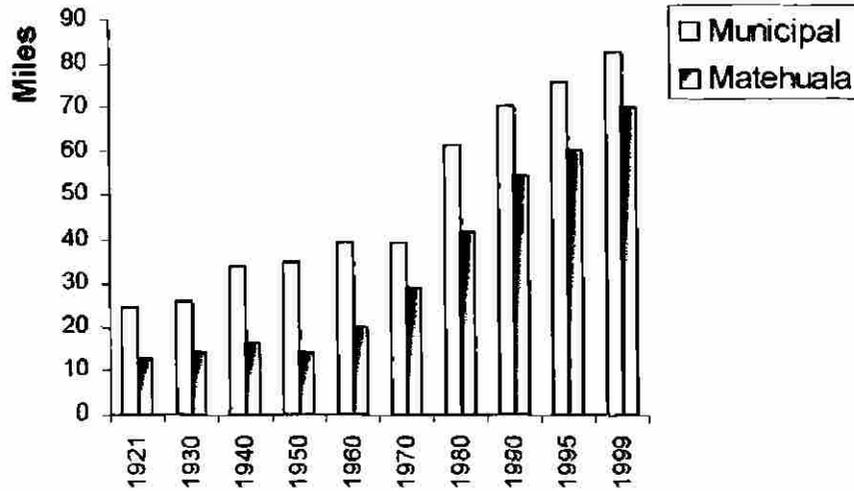


Figura 4. Crecimiento de la población en el municipio y ciudad de Matehuala (SAPSAM, 1999).

Por otra parte, se proyectó la población futura al año 2020 con base en el método geométrico, ajustándose el cálculo con la tendencia observada en las últimas décadas y a la población de 1995 a 1998 (Figura 5).

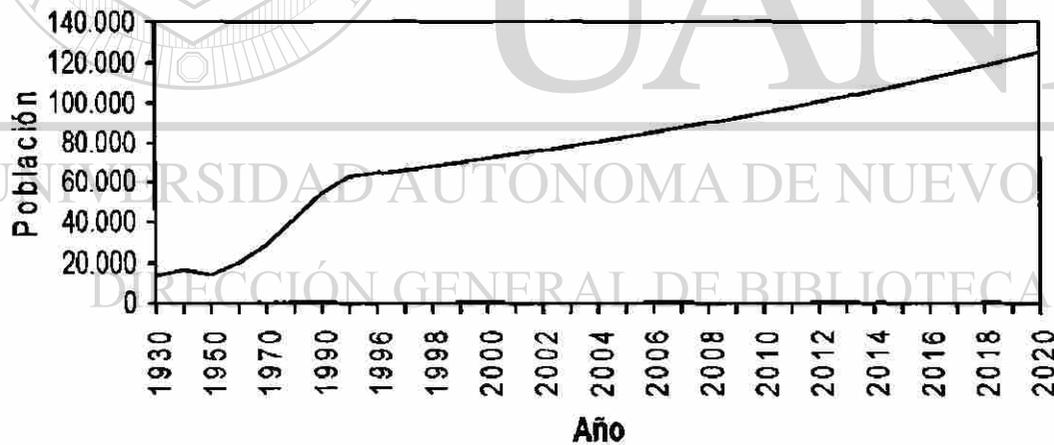


Figura 5. Proyección del crecimiento de la población de la ciudad de Matehuala para el 2020 (SAPSAM, 1999)

2.4. CLIMA

Esta zona de interés sobresale por ser la más árida del estado de San Luis Potosí. Debido a los altos índices de evaporación (1600 a 2300 mm/año) y las bajas precipitaciones (270 a 525 mm/año) el área de estudio está clasificada como

semiárida a árida. La UNEP (1999) divide tres categorías de aridez relacionadas con los índices de precipitación y evaporación potencial.

Tabla 2. Clasificación de aridez (UNEP, 1999).

| Clima | Índice EVP P* | Variabilidad de lluvia en % del promedio |
|------------|------------------|---|
| Hiperárido | <0.05 | 100 |
| Árido | 0.05-0.02 | 50-100 |
| Semiárido | 0.02-0.5 | 25-50 |

EVP P. Evaporación potencial (mm/año).

Como se describe en la clasificación de climas de Köppen (SPP, 1983, modificado por García, 1983), el área de estudio está dividida en las siguientes regiones climáticas

Tipo C. Clima húmedo templado con lluvias en verano.

C(W₀)(x'). Clima mesotermal con veranos secos (> 10 % de la precipitación anual durante el invierno). Se localiza en las partes más altas de la Sierra de Catorce (> 2 500 msnm).

Tipos BS1. Tipos climáticos semiáridos.

BS₁kw(x') clima semiárido con inviernos secos (> 10.2% de la precipitación anual durante el invierno). Se manifiesta en las partes más bajas de la Sierra de Catorce (2 000 a 2 500 msnm).

BS₀kw(x') clima árido con inviernos secos (>10.2% de la precipitación anual durante el invierno). Se encuentra en las márgenes de la Sierra de Catorce en un rango de 10 km (La Paz).

BS₀hx' clima árido con veranos calientes e inviernos fríos (>18% de la precipitación anual durante el invierno). Se encuentra en la parte NW del área de estudio (Vanegas).

BS₀kx' clima árido con veranos calientes (>18% de la precipitación anual durante el invierno). Se localizan en Cedral-Pocitos al NE del área de estudio.

En general la época de lluvias es de mayo a octubre; la temporada más seca y templada con el menor índice de precipitación es durante los meses de noviembre a abril. Las temperaturas mínimas se registran durante el mes de enero y las máximas en junio

Se encuentran registros de precipitación (Figura 6) y temperaturas (Figura 7) de 4 estaciones meteorológicas situadas dentro del área de estudio para los años de 1990 a 2001.

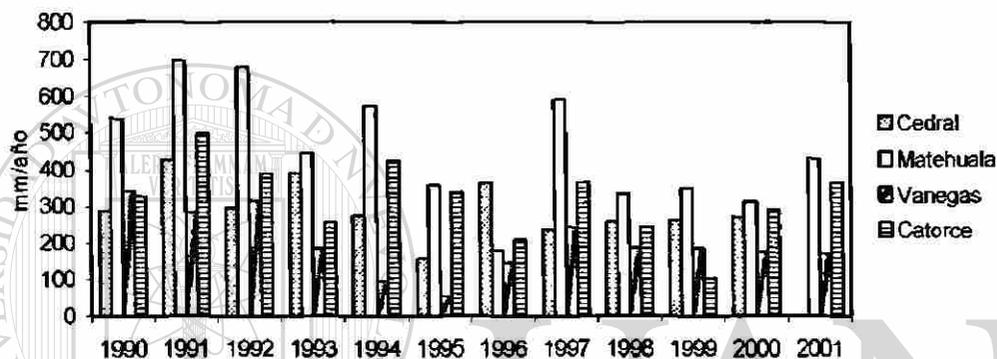


Figura 6. Precipitación media anual para las estaciones climatológicas de Vanegas, Cedral, Matehuala, y Maroma-Catorce de 1990 a 2001 (CNA).

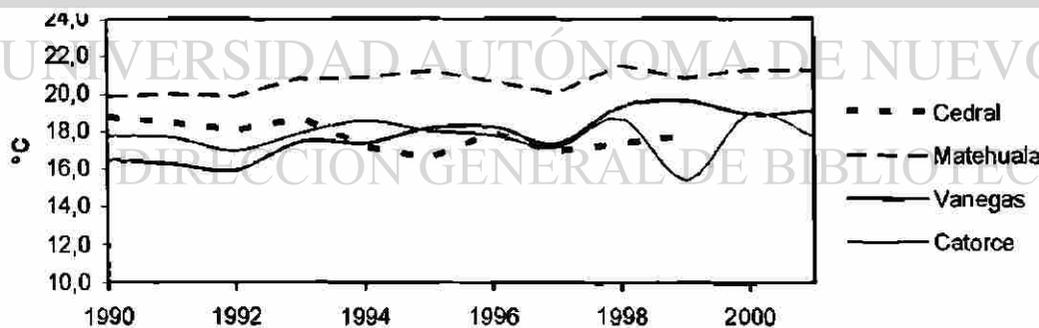


Figura 7. Temperatura media anual en grados centígrados registradas en las estaciones climatológicas de Vanegas, Cedral, Matehuala y Maroma-Catorce de 1990 a 2001 (CNA).

2.5. FLORA Y FAUNA

La vegetación que se manifiesta en el área de estudio (Figura 8) es descrita de acuerdo a los tipos de vegetación predominantes, que están determinados por las

diferentes altitudes, clima, substrato geológico y suelo (Rzedowski, 1955). Los tipos son los siguientes:

Encinar Arbustivo. Este tipo de vegetación es característica de un clima semiárido, requiere de temperaturas relativamente bajas, se desarrolla en altitudes superiores a los 1500 m. en suelos someros y bien drenados, más o menos arcillosos y con un pH cercano a la neutralidad en calizas. En este tipo de vegetación predomina el género *Quercus*, la mayoría de las veces abundan muy diversos arbustos perennifolios de hoja dura. Se puede localizar en las laderas de la Sierra de Catorce.

Zacatal. Se desarrolla sobre suelos inmaduros, poco profundos. Las características edafológicas pueden variar mucho. En este tipo de vegetación se aprecia a gran escala la intervención del hombre, ya que puede haber aumento o disminución de especies vegetales, dependiendo del uso adecuado o inadecuado de los pastos. Especies como *Acacia tortuosa*, *Quercus microphylla* y *Yuca filifera*, pueden encontrarse (partes bajas de la Sierra de Catorce, La Paz).

Matorral Desértico Rosetófilo. Este tipo de vegetación debe su nombre a especies arbustivas a sub-arbustivas de hojas alargadas y estrechas, agrupadas a manera de rosetas, se les puede encontrar en lugares de poca inclinación siempre que el suelo contenga abundante grava con fragmentos de roca caliza (Cedral, Vanegas y Matehuala). Las especies más comunes son: Lechuguilla (*Agave lechuguilla*), Sotol, Palma Samandoca (*Yuca camerosana*), Candelilla (*Eupharbia antisiphilitica*) y Palma China (*Yucca filifera*) ocotillo, mezquite y variedades diversas de cactáceas (Rzedowski, 1955)

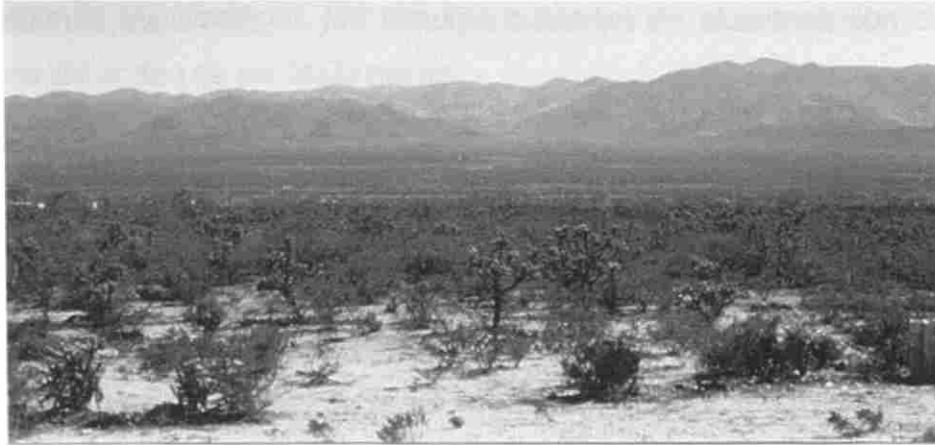


Figura 8. Paisaje típico de la región que muestra las variedades de plantas existentes, como fondo la Sierra Azul.

La fauna presente en la región en pequeñas cantidades son: coyote, zorrillo y codorniz común; se pueden encontrar en poblaciones a las siguientes: liebre, conejo, paloma alas blancas, pájaro azul, cuervo, huilota, tordo, águila, gavilán, coralillo y víbora de cascabel. (Gómez-Anguiano, 2001)

2.6. FISIOGRAFÍA

El área de estudio pertenece en su totalidad a la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental (Figura 5), la cual es un conjunto de sierras menores de estratos plegados, constituidos por rocas sedimentarias marinas del Jurásico Superior y Cretácico, en general calizas, areniscas y lutitas. El plegamiento se manifiesta por una topografía de fuertes ondulaciones alargadas y paralelas. Debido a estos pliegues, se han conformado una serie de sinclinales y anticlinales, con fracturamiento principalmente en sus ejes estructurales, siendo susceptibles a la erosión. También existen, en menor grado, rocas ígneas intrusivas y volcánicas relacionadas a la formación de yacimientos metálicos que se explotan en la región.

En un mayor detalle se puede establecer que la zona pertenece a la Subprovincia Fisiográfica Sierras y Llanuras Occidentales, que se caracteriza por constituir sierras de rocas calizas con orientación preferencial norte-sur y unidas entre sí por elevaciones topográficas menores. En consecuencia, estas sierras conforman una

red con algunas separaciones por llanuras cubiertas de aluviones con elevaciones topográficas del orden de los 2000 msnm.

La Sierra de Catorce, en cuya región oriental está ubicada la ciudad de Matehuala, define el límite occidental de la Subprovincia y es la estructura de mayor importancia y magnitud. No se encuentra ligada con las otras sierras cercanas; la cumbre con mayor elevación es la del Cerro Grande que está a 3180 msnm. El Cerro de Picacho Alto, que pertenece a la Sierra Azul, al oriente del área de estudio tiene una altitud mayor a los 2330 msnm. Todas estas sierras son escarpadas y alargadas.



Figura 9. Fisiográficas de México (tomado de INEGI, 2004).

2.7. GEOMORFOLOGÍA

En la zona de estudio se observa que existen sierras bajas alargadas, con orientación preferencial norte-sur, como evidencia de las diversas estructuras de sinclinales y anticlinales generadas durante los plegamientos de las rocas

sedimentarias mesozoicas. Aunque no existe una red hidrográfica bien definida, la región se caracteriza por presentar una severa etapa de erosión que elimina importantes espesores de rocas sedimentarias de las zonas elevadas. Excepto la Sierra de Catorce, que es alta y abrupta, la mayor parte de las restantes sierras se caracterizan por ser redondeadas. Por otra parte, las llanuras conforman cuencas endorreicas rodeadas de diferentes abanicos aluviales que tienden a unirse formando laderas de pendiente suave.

2.8. HIDROGRAFÍA

Esta región presenta escasas corrientes que se forman en la temporada de lluvias (la mayor parte de ellas dentro de los meses de mayo a octubre) y su curso es de muy corta longitud, ya que comúnmente desaparecen en las llanuras debido a procesos de evaporación y/o infiltraciones. Este drenaje pertenece a las cuencas interiores de la Región Hidrológica No. 37 El Salado, que abarca la parte centro y norte del estado de San Luis Potosí, es decir, la altiplanicie septentrional del país, a la altura del Trópico de Cáncer. Específicamente, la zona de interés está emplazada en la cuenca hidrográfica No. 37-B_{RH} Matehuala de 7284 km² de extensión. La subcuenca Cedral-Matehuala ocupa 3,765 km² del total (Figura 10).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Los escurrimientos que se presentan en esta cuenca provienen de las sierras de Catorce y San Bartolo. De las pocas corrientes con alguna denominación, se tienen el Arroyo La Maroma, el Arroyo El Astillero y el Arroyo de Las Pilas. Dentro de esta misma cuenca se localizan las subcuencas Matehuala (37-BA), Huertecillas (37-BB) y Catorce (37-BC). (INEGI, 2003).

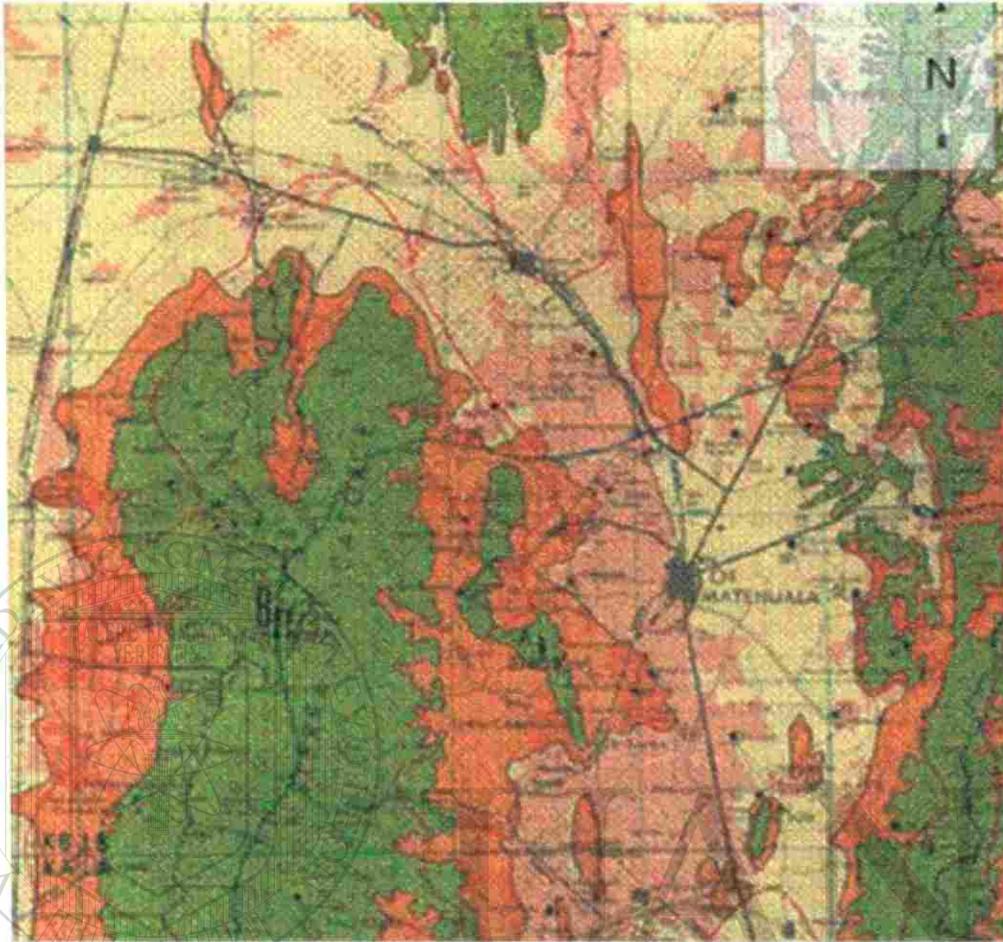


Figura 10. Detalle del Mapa Hidrológico de el área de estudio (SPP, 1984a)

Con esto se establece que la zona de recarga se encuentra en la parte oeste y norte del área de estudio es decir, en la Sierra de Catorce y Cedral-Vanegas respectivamente, mientras que la zona de descarga la constituye la parte de sur del área de estudio.

2.9. GEOLOGÍA

2.9.1 Geología Regional

Una gran porción tanto de la Mesa Central como de la Sierra Madre Oriental muestra espesores mayores a los 2000 m en rocas sedimentarias mesozoicas (Moran Zenteno, 1994). Aunque han sido encontrados xenolitos del Proterozoico en las rocas volcánicas de la Mesa Central, no se tiene conocimiento de afloramientos pre-mesozoicos. Solo en la Sierra Madre Oriental se pueden observar algunos afloramientos como lo son el Gneiss Novillo de edad Precámbrica, localizado en el anticlinorio Huizachal-Peregrina y el Esquisto Granjeno de edad Paleozoica (Gursky, 1996 en Hoppe, 2002).

La apertura del Golfo de México en la parte este, originó grandes transgresiones que formaron parte de dos estructuras tipo cuenca: La Cuenca Mesozoica del centro de México (CMCM) en el oeste y el Golfo de México en el este. Ambas cuencas son divididas por calizas de plataforma, desarrollando la Plataforma Valles –San Luis Potosí (PVSLP). En este ambiente de aguas someras sedimentos evaporíticos como la Formación Minas Viejas fueron depositados, mientras que las calizas de la Formación Zuloaga fueron formadas en la Cuenca Mesozoica del Centro de México (López-Doncel, 2003).

La sedimentación de carbonatos continúa con la “Formación Tamaulipas” en el Cretácico Inferior. En términos de transgresión de la PVSLP, se forman reefs marginales (Formación El Abra) en el Albiano con estratos de yeso en las partes centrales y la Formación Cuesta del Cura se deposita en la CMCM durante el Albiano-Cenomaniano.

El Cretácico Medio está caracterizado por un ascenso en el nivel del mar, causando un hundimiento en todas las estructuras up-lift hasta el final del Aptiano. Dentro del Albiano se desarrollaron las máximas profundidades en los márgenes de las plataformas donde fueron depositadas las formaciones Cuesta del Cura y Tamabra

(calizas y brechas) en los puntos más profundos dentro de las cuencas (López-Doncel, 2003).

Más tarde, durante el Cretácico Superior, el aporte de terrígenos y sedimentos siliciclásticos hacia la CMCM se incrementó grandemente (Formación Indidura), que fue ocasionado por un nuevo arco volcánico formado en el este. Hacia el final del Santoniano, aquellos abanicos siliciclásticos (Formación Cárdenas) llenaron la CMCM (Höppe, 2002).

Al final del Maastrichtiano y el Paleoceno, el comienzo de la Orogenia Laramide dio fin a la sedimentación marina en toda la región de la PVSLP y la CMCM (López-Doncel, 2003); debido a esto y al levantamiento de la Sierra de Catorce, en el Terciario Inferior el transporte de los productos de erosión se incrementó en las cuencas adyacentes; durante el Eoceno, se alcanza el pico de la orogenia y son depositadas facies continentales de molasa representados por la Formación Ahuichila (Gómez-Anguiano, 2001).

Durante el Cenozoico se registra escaso volcanismo, pero existen algunas lavas riolíticas en la parte sur y oeste de la Mesa Central, como son vulcanitas, que forman afloramientos de tobas de hasta 1000 m de espesor (Labarthe-Hernández et al., 1992).

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En las inmediaciones de la zona de estudio se detecta la presencia de diversas unidades geológicas, con origen y naturaleza variadas que incluyen rocas sedimentarias marinas y continentales así como rocas ígneas y metamórficas de contacto.

Las rocas sedimentarias constituyen las unidades geológicas de mayor distribución tanto en la superficie como en el subsuelo. Las de origen marino afloran ampliamente en las elevaciones que se presentan en los flancos oriental y occidental de la zona de estudio, dispuestas en estructuras plegadas de orientación preferencial N-S,

conformando las mayores elevaciones topográficas. Los materiales sedimentarios de origen continental se presentan, preferentemente, en las zonas topográficas de menor elevación, distribuyéndose en las zonas de pie de monte de los cerros y en la planicie central Huizache-Matehuala-Cedral.

En lo que se refiere a las rocas ígneas intrusivas, existen al menos dos afloramientos importantes en las inmediaciones de la demarcación estudiada. Uno de ellos se presenta en los alrededores del poblado de la Paz y el otro en Real de Catorce, poblaciones cuyos yacimientos minerales están íntimamente ligados con estas rocas intrusivas. Las rocas ígneas extrusivas comprenden pequeños derrames de basaltos que tienen una extensión muy limitada, presentándose en la zona de Cedral-Vanegas.

2.9.2 Litología

A continuación se presenta una descripción de las diferentes formaciones estratigráficas que afloran en el área.

2.9.2.1 Unidades mesozoicas

Formación Zacatecas. Triásico Superior (Cárnico)

La Formación Zacatecas se describe como una secuencia de lutitas, areniscas, conglomerado y grawaca de origen siliciclástico altamente deformados y presentando foliación.

Existen algunos afloramientos en la Sierra de Catorce (Ojo de Agua y Cañón de Los Catorce), además de Zacatecas (arroyo La Pimienta), Charcas, y Peñón Blanco San Luis Potosí (Padilla, 1993, citado en Gómez-Anguiano, 2001).

Formación Nazas. Triásico Superior-Jurásico Inferior

La formación Nazas consiste de dos facies: una facie sedimentaria continental con depósitos de lechos rojos y la facie continental volcano-sedimentaria, esto fue

originado por los procesos de rifting ocurridos durante extensión de la parte oeste de la Pangea durante el Triásico Superior, lo que produjo formación de estructuras tipo Horst y Graben en la parte nor-noreste de México (López- Doncel, 2000).

En la Sierra de Catorce la Formación Nazas constituye diques intrusivos de rumbo norte-sur (Ojo de Agua) y rocas volcánicas alteradas tales como basaltos, diques andesíticos, incluyendo rocas piroclásticas y areniscas (Hoppe, 2002; y Gómez-Anguiano, 2001).

Formación Zuloaga. Jurásico Superior (Oxfordiano)

Originalmente fue descrita por Burckhardt (1906, 1921), quien estudió en las cercanías de Mazapil y la Sierra de San Simón, Zacatecas una secuencia de calizas, equivalentes a la actual Formación Zuloaga, dándole el nombre de "Caliza de Nerineas". Imlay (1938) la describió en la Sierra de Parras, de la siguiente manera: "La Caliza Zuloaga es el equivalente extralitoral de la Formación La Gloria, de la que se distingue principalmente por la carencia de arenisca y lutita. Su base está expuesta cerca de Melchor Ocampo, Zacatecas, pero 65 km al sureste, en las montañas al este de La Ventura, sobreyace a capas rojas. La localidad tipo es designada como la Sierra de Sombrerillo al sur de la Sierra de Parras y Jimulco, consta generalmente de capas gruesas de hasta 3.50 m de espesor, el color dominante es gris oscuro a gris claro y contiene nódulos de pedernal"

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Esta unidad fue redefinida por Humphrey (1949) como una secuencia calcárea que en su base presenta elevado contenido arcilloso. La parte media se presenta como una alternancia de estratos de margas y calizas de 20 a 60 cm de espesor, un contenido alto de fósiles y con nódulos de hierro eventuales. La parte superior de la secuencia se considera a partir de donde empieza el predominio de las calizas y el espesor de las capas aumenta de 0.60 a 1.20 m y hasta 2 m; luego continúan horizontes de lutita y caliza arcillosa, además de caliza de estratificación media con nódulos de pedernal negro.

En el área de estudio aflora amplia y preferentemente en la porción central de la Sierra de Catorce. Está constituida por una secuencia calcárea, consistente en su base de calizas cizalladas de estratificación delgada. En la parte superior de la formación la secuencia está representada por calizas de color gris claro a gris oscuro en fractura fresca que intemperiza en tonos de amarillento y rojizo, con textura de grano fino en capas de 0.3 a 0.4 m de espesor con abundantes estilolitas paralelas a la estratificación, así como nódulos y lentes de pedernal negro y horizontes fosilíferos arcillosos. Aflora en espesores de hasta 300 metros.

Formación La Caja Jurásico Superior (Kimeridgiano-Titoniano)

Fue descrita originalmente por Imlay (1938) como:

“La Formación La Caja es el equivalente extralitoral de la Formación La Casita, aunque sus capas superiores pueden ser algo más jóvenes. Su contacto está agudamente discordante de las calizas gruesas de la subyacente de la Formación Zuloaga y de la sobreyacente Formación Taraises. La localidad tipo es designada como la Vereda del Quemado, en la Sierra de La Caja al norte de Mazapil, Zacatecas, donde está constituida por una secuencia de 83 m de caliza limolítica de color ocre y blanquecino, bandas de pedernal, limonitas calcáreas, limonitas calcáreas con pedernal, calizas arcillosas fosfatadas, pedernal calcáreo fosfatado, caliza gris rojiza y limonitas calcáreas con concreciones fosilíferas.

En la zona de estudio esta unidad tiene una distribución asociada con la Formación Zuloaga, aunque con un espesor y ubicación más restringida. Consiste de limolitas, limolitas con pedernal y calizas negras recristalizadas con gran cantidad de fósiles (pelecípodos principalmente) (Geomex, 1979). Una característica sobresaliente hacia la base de la unidad, es la presencia de un horizonte de pedernal color gris rojizo de 2 a 3 m de espesor (IEPSA, 1981). En la porción superior está constituida por limolitas y limolitas con pedernal, con concreciones de caliza oscura y material fosfórico. Su espesor total varía de 30 a 40 m.

Formaciones Cupido, Tamaulipas Inferior y Superior Cretácico Inferior (Hauteriviano Superior-Aptiano Inferior)

Existen varias formaciones geológicas que fueron descritas en los estudios consultados que corresponden a este periodo geológico. No es el objetivo de este trabajo definir específicamente a que facies corresponden, por lo que se describirán en forma conjunta. Entre las unidades geológicas cuya edad corresponde al Cretácico Inferior se mencionan las formaciones Cupido y Tamaulipas Inferior y Superior.

La Formación Tamaulipas Inferior fue originalmente llamada Caliza Tamaulipas por Stephenson (1921) (citado en Muir, 1936) quien incluyó a las calizas de cuenca del Albiano-Cenomaniano que están ampliamente distribuidas en la Sierra de Tamaulipas. Posteriormente Belt (1925) (citado en Muir, 1936) propone el nombre de Caliza Tamaulipas para una secuencia calcárea, cuyo desarrollo típico se presenta en la Sierra de Tamaulipas y en la Sierra Madre Oriental. Después de eso, Muir (1936) redefinió esta unidad diciendo que todas las rocas que infrayacen a la Formación Agua Nueva, incluyendo la Formación Cuesta del Cura en la Sierra de Tamaulipas, quedarían incluidas en la Caliza Tamaulipas, designando el Cañón de La Borrega en la Sierra de Tamaulipas como localidad tipo.

Esta formación está constituida principalmente por calizas de color gris claro a gris oscuro con nódulos de pedernal que se presentan en color gris claro a blanquecino. Finalmente Muir dividió también a la Caliza Tamaulipas en Formación Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior separadas por un horizonte al que denominó como Horizonte Otates, el cual fue posteriormente ascendido al rango de formación (Humphrey y Diaz, 1956) adquiriendo el nombre de Formación Otates del Aptiano. Bacon (1978) cartografió en la Sierra de Catorce una sola unidad equivalente a las formaciones Taraises, Tamaulipas Inferior, La Peña u Otates y Tamaulipas Superior denominándolas Formación Tamaulipas no diferenciada. Ross (1979) estudió la Formación Tamaulipas en el noreste de México, usando el nombre de Formación Tamaulipas para designar a las secuencias de calizas que se encuentran entre la

Formación Taraises abajo y Cuesta del Cura arriba, dividiéndola en tres unidades. La unidad 1 y la base de la unidad 2 corresponden a la Formación Tamaulipas Inferior (nombrada en otros trabajos como Formación Cupido).

Los afloramientos descritos como Formación Cupido se presentan en la Sierra de Catorce, en las inmediaciones del poblado La Maroma, región donde se presenta un importante manantial que abastece a diversos poblados de la región. Consiste de una caliza color gris en fractura fresca que intemperiza en gris claro, dispuesta en estratos gruesos y medianos de 0.5 a 6 metros de espesor, con nódulos de pedernal café amarillento, concreciones de piritita oxidada y estilolitas. En forma aislada se detectan horizontes delgados de margas y lutitas.

En contraste, la Formación Tamaulipas Inferior y Superior, que afloran en el flanco oriental de la Sierra de Catorce, presentan características litológicas diferentes, ya que la primera consiste de caliza microcristalina con capas de espesor 0.3 a 0.5 metros, nódulos de pedernal negro y líneas estilolíticas; la segunda hacia la base está conformada por calizas arcillosas de textura sacaroides, horizontes de arcilla bituminosa, mientras que la porción superior incluye caliza clástica y calcarenitas de color café y gris oscuro en capas de 0.25 metros de espesor.

Formación El Doctor. Cretácico Superior

Las rocas de esta Formación se presentan extensamente en la región oriental de la zona de estudio, constituyendo la denominada Sierra El Azul y en algunos lomeríos dispersos en la planicie. Se han identificado rocas correlacionables con diversas facies como San Joaquín, Cerro Ladrón, Socavón y La Negra. En general, esta Formación consiste de calizas de color gris claro que intemperizan en gris oscuro, con textura microcristalina a criptocristalina, dispuesta en bancos de espesor que va de 1 a 5 metros con nódulos de marcasita oxidada, escasos nódulos de pedernal negro y líneas estilolíticas paralelas y perpendiculares a la estratificación. (Gómez – Anguiano, 2001)

Formación Cuesta del Cura. Cretácico Superior.(Albiano Superior- Cenomaniano Inferior).

Descrita originalmente por Imlay (1936) como “La Caliza Cuesta del Cura incluye calizas compactas en capas delgadas y bandas de pedernal negro que constituyen las capas más altas que forman las montañas de la Sierra de Parras y yacen estratigráficamente entre las calizas arrecifales de la Formación Aurora (abajo) y calizas arcillosas en capas delgadas y lutitas de la Formación Indidura (arriba). La sección tipo está aproximadamente a 6.4 km al oeste de Parras, Coahuila. El espesor de esta formación es de aproximadamente de 64 m.”

Aflora ampliamente en ambos flancos de la Sierra de Catorce, y en las elevaciones que se encuentran al norte de la población de Cedral, donde consiste de una caliza compacta, de color gris crema y gris pardo que intemperiza en tonalidades violeta y gris claro, dispuesta en capas delgadas y medias, con horizontes de limolitas rojizas y bandas y nódulos de pedernal negro. Una característica que la distingue es que las capas se presentan en pliegues ondulantes y/o tipo chevrón.

Formación Agua Nueva. Cretácico Superior

Los afloramientos de esta unidad geológica se distribuyen en forma importante en la zona oriental de la Sierra de Catorce, al sudoeste de la ciudad de Matehuala. También se presenta al norte de la misma población en la región comprendida entre la carretera federal No. 57 y la que se dirige a la población de Cedral, y al oriente en la Sierra El Azul. Consiste de calizas color gris a gris oscuro, en ocasiones carbonosas que intemperiza en gris claro, amarillo pálido y tonalidades violáceas, textura microcristalina en capas delgadas 0.1 a 0.4 m de espesor que presentan intercalaciones de lutitas carbonosas.

Formación San Felipe. Cretácico Superior

La distribución espacial de esta unidad no es muy notable, ya que únicamente aflora en restringidas porciones del flanco oriental de la Sierra de Catorce, al norte de Cedral y en la Sierra El Azul en las inmediaciones de la carretera federal No. 57.

Consiste de calizas compactas de color gris a gris oscuro que intemperiza en gris claro, dispuestas en capas delgadas intercaladas con bancos arcillosos de color verdoso a crema, intercalaciones de bentonita color rojizo y capas de pedernal.

Formación Méndez. Cretácico Superior

Esta unidad se presenta superficialmente en los lomeríos que se ubican al norte de la ciudad de Matehuala y en la porción norte de las elevaciones que constituyen el Cerro del Fraile, al oriente de la Paz. Abarca una serie de lutitas y margas de color gris que intemperizan en tonalidades de color crema a amarillento, que se presentan en láminas fisiles intercaladas con calizas de color gris y textura criptocristalina (Gómez-Anguiano, 2001).

2.9.2.2. Unidades cenozoicas

Rocas Intrusivas (Terciario)

En diversas partes de la zona (Cerro del Fraile y la Sierra de Catorce) existen porciones de cuerpos ígneos intrusivos; estos consisten en rocas de composición félsica a intermedia que afectan a diversas formaciones de rocas sedimentarias, además de que tienen estrecha relación con los yacimientos metálicos que se explotan en la zona (Gómez- Anguiano, 2001).

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Dentro de la Sierra El Fraile, los sedimentos mesozoicos son fracturados por el emplazamiento de un plutón granodiorítico de edad Mioceno que se supone es el origen de la mineralización en el distrito minero de Santa María de la Paz.

Rocas Ígneas Extrusivas (Terciario)

Existen algunos afloramientos de derrames basálticos en la región noreste y noroeste de los taludes de la Sierra de Catorce que se les relacionada con el fallamiento normal en el Neogeno y el Pleistoceno (Barboza Gudino, 1993).

Pequeños afloramientos de rocas extrusivas del Terciario de composición máfica se presentan en las inmediaciones de Vanegas y al noroeste de Estación San Isidro. La roca consiste de un basalto de color oscuro, con estructura vesicular y en ocasiones amigdaloidal con fenocristales de labradorita, hornblenda y augita.

Materiales Sedimentarios Continentales (Terciario y Cuaternario)

Con base en la información geológica disponible, es difícil diferenciar en forma definitiva la edad de los materiales geológicos semiconsolidados y sin consolidar producto de la erosión de las rocas más antiguas. Por ejemplo, adyacente a las principales elevaciones que se registran dentro de la zona de estudio, se encuentran una serie de conglomerados que constituyen abanicos aluviales y/o zonas de pie de monte. Estos conglomerados están constituidos por material clástico con tamaño que oscila entre cantos rodados, gravas y arenas empacados en una matriz arenarcillosa parcial o totalmente cementados por calcita. En otras regiones, estos conglomerados han sido definidos como del Terciario, por lo que probablemente algunos de los que se detectan en la zona de estudio (parte norte y oriente de la Sierra de Catorce) presenten esta edad; sin embargo, la información disponible no permite asegurarlo definitivamente.

Materiales sedimentarios de origen continental del Cuaternario se identifican en forma amplia en las planicies que conforman una buena porción de la zona analizada. Algunos de ellos han sido definidos formalmente; por ejemplo, la Formación Jabonero, que aflora en la región noroeste, específicamente en la porción norte y poniente de la Sierra de Catorce. Este material consiste de gravas mal clasificadas, con clastos subredondeados a angulosos, ocasionalmente cementados por carbonatos (caliche). Otros materiales similares que se presentan a todo lo largo de las partes topográficas más bajas, consisten de arcillas, limos, arenas y gravas, intercalados y mezclados entre sí, con la importante característica de que presentan abundante material cementante que incluye yeso y/o carbonatos.

2.9.3 Geología Estructural

La Sierra de Catorce presenta una estructura de levantamiento “uplift”, de edad Terciario Inferior, de orientación general norte- sur, delimitado por fallas normales de la misma orientación, notables principalmente en el lado oriental y fallas este-oeste, que ocurren principalmente en el extremo norte de la sierra. Internamente se reconoce una estructura plegada con varias estructuras mayores y numerosos plegamientos menores por lo que es aplicable el término anticlinorio. Los pliegues muestran ejes orientados de manera general norte-sur y nor-noroeste en muchos de los casos con vergencia hacia el este.

A lo largo de todo el frente occidental de la Sierra de Catorce ocurren una serie de fallas normales con dirección norte-sur y otras con dirección este-oeste originadas como producto de la extensión regional del Terciario Inferior y el levantamiento de la Sierra de Catorce con magnitudes del orden de unos cuantos metros hasta varios kilómetros (Barboza-Gudino, 1993).

Barboza- Gudino (1993) interpreta el sistema de fallas este-oeste posterior al sistema norte-sur, por haberse observado que estas son cortadas por las fallas este-oeste.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

2.10. MARCO HIDROGEOLÓGICO DE REFERENCIA

2.10.3. Unidades Hidroestratigráficas

Existe un mapa hidrogeológico del área (Figura 11) publicado por la Secretaría de Programación y Presupuesto que data del año de 1984. Por otro lado se ha hecho una clasificación de las unidades que afloran en el área de estudio agrupándose en unidades de acuerdo a su permeabilidad. Las trece unidades se clasifican en 4 unidades permeables y en 9 unidades de escasa permeabilidad (Informe referente al Proyecto).

Unidades permeables: Formación Cupido, Formación El Doctor, Rocas Ígneas Extrusivas y Materiales Sedimentarios Continentales.

La Formación Cupido que se localiza en los flancos de la Sierra El Catorce es donde se localiza el manantial La Maroma, el cual abastece a poblados de la región. La formación El Doctor tiene una alta permeabilidad debida a la disolución de las calizas formándose conductos por los que el agua subterránea puede moverse.

Las rocas ígneas extrusivas se caracterizan por presentar baja permeabilidad dada por las diaclasas de enfriamiento, aunque su extensión es muy limitada y están sepultadas por material sedimentario; este último (material sedimentario continental) controla el comportamiento espacial de la permeabilidad de todas estas unidades debido a su gran heterogeneidad granulométrica.

Los abanicos aluviales que se interdigital en toda la llanura aluvial explica la gran heterogeneidad y anisotropía del medio.

Unidades de baja permeabilidad: Formaciones Zuloaga, La Caja, Tamaulipas Superior, Tamaulipas Inferior, Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe, Méndez y Rocas Ígneas Intrusivas (DESISA, 1999).

2.10.2. Medios Hidrogeológicos

Se identifican dos medios físicos a través de los cuales circula el agua subterránea con base en la información bibliográfica de la geología del subsuelo (medio granular y medio fracturado), también se infiere el basamento hidrogeológico que delimita la profundidad del sistema. Con base en este análisis se define el tipo de acuífero.

El medio granular (Material Sedimentario Continental) es la unidad litológica donde se emplazan la mayor parte de los aprovechamientos de agua subterránea, su comportamiento tiene importantes variaciones debido a la gran heterogeneidad y anisotropía.

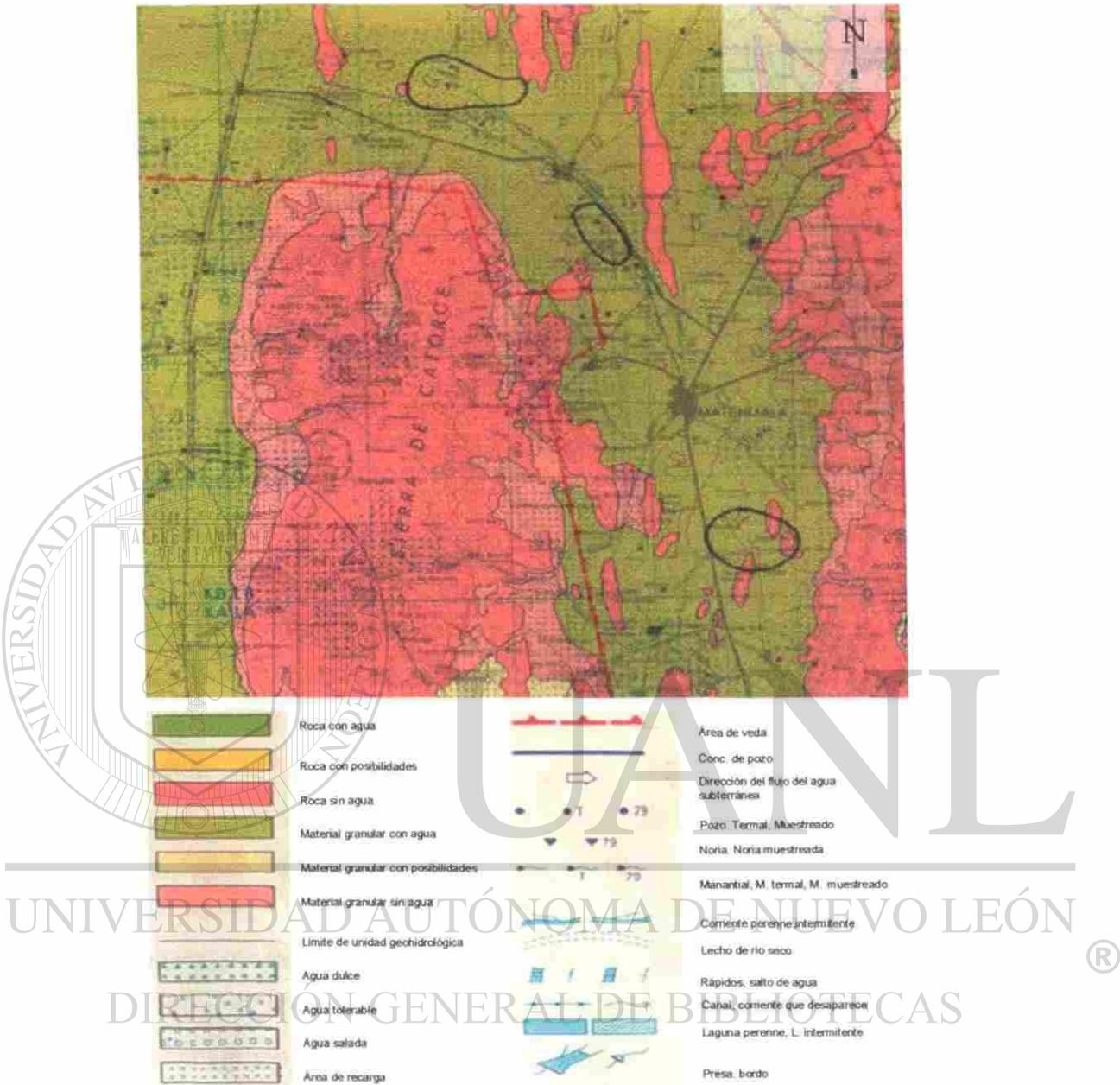


Figura 11. Mapa hidrogeológico del área de estudio (modificado de SPP, 1984b)

El medio fracturado es de gran importancia debido a: *i)* son rocas que en superficie son fuentes potenciales de infiltración del agua meteórica que puede llegar a la zona de saturación y *ii)* porque en el subsuelo son una componente fundamental del movimiento del agua subterránea donde son rebasados los materiales sedimentarios continentales. A este medio pertenece la Formación Cupido, la Formación El Doctor y las Rocas Ígneas Extrusivas.

2.10.4. Basamento Hidrogeológico

El basamento hidrogeológico está limitado por las rocas más antiguas hasta ahora identificadas en la región (Formación Zuloaga y Formación La Caja), de muy baja permeabilidad y que en posición estratigráficamente normal son las más profundas sustentando al sistema de aguas subterráneas.

La disposición espacial de los medios granulares y fracturados en los que se agruparon las unidades litológicas integran el sistema que controla la ocurrencia del agua subterránea. Conociendo las propiedades que caracterizan a esos medios, es posible afirmar que los procesos de las aguas subterráneas se desarrollan en un sistema acuífero de tipo libre heterogéneo anisótropo a escala regional, donde existen grandes diferencias en la conductividad hidráulica de las unidades hidroestratigráficas ya definidas. Las unidades de escasa permeabilidad son de gran importancia en la dinámica del agua subterránea, sobre todo en el tiempo de residencia de los diferentes sistemas de flujo (local, intermedio y regional).

Se han establecido en algunos trabajos que los materiales geológicos continentales conforman un acuífero libre heterogéneo anisótropo, con espesor medio de 100 a 200 metros, llegándose a presentar espesores mayores (DESISA, 1999).

Los valores de transmisividad se encuentran entre $8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ para la zona de Cedral (IEPSA, 1981), se presentan valores menores en los flancos de las sierras que limitan la zona. Los caudales específicos para la misma región oscilan entre los 10 y 0.5 lps/m de abatimiento, siguiendo la misma distribución de las transmisividades. En la zona de Matehuala se presentan caudales específicos de 1 lps/m de abatimiento.

2.10.5. Piezometría

La información piezométrica más antigua para la zona Cedral-Matehuala que se tiene disponible es del año 1977, donde la distribución de la elevación del nivel estático en

el plano horizontal identifica la existencia de una zona de recarga con una divisoria de aguas subterráneas localizada entre las poblaciones de Cedral y Vanegas con elevación de 1715 msnm. Esta divisoria señala la divergencia de dos flujos subterráneos, el primero con dirección noroeste hacia el Valle El Salado y el segundo en sentido opuesto, hacia la zona de Cedral – Matehuala. En la zona de Cedral se identifica un cono de abatimiento con elevación de 1685 msnm; hacia el sureste las elevaciones del nivel estático disminuyen drásticamente hacia la zona de Matehuala. Esta tendencia marca una fuerte diferencia en los gradientes hidráulicos donde su magnitud es menor hacia el noroeste de Cedral y mayor hacia el sureste

Para años posteriores (1981 y 1998) se identifica una disminución en la elevación del nivel estático; sin embargo la distribución general del flujo subterráneo se mantiene sin cambios significativos, para 1998 la zona de parteaguas subterráneo presenta valores del orden de 1700 msnm, el cono de abatimiento detectado en 1977 delimitado por la curva 1685 msnm se extiende hacia la zona de Vanegas, la elevación mínima para ese mismo año es de 1650 msnm. En la zona de Matehuala la disminución de la elevación del nivel del agua en los pozos ha sido mínima, sin presentarse un cono de abatimiento.

Por medio de la información piezométrica disponible es posible observar que para el área de Cedral se tiene abatimientos promedio de 2 metros por año para la zona central del cono de abatimiento, disminuyendo a valores medios de 0.5 metros según se aleja del centro del cono. Para la zona de Matehuala los se presentan regiones con nulos abatimientos, solo en ciertas regiones al sw de la ciudad se reportan descensos en el nivel estático de los 0.5 m.

2.10.6. Calidad del Agua Subterránea

De acuerdo a los estudios más recientes efectuados en el área y desde el contexto de los sistemas de flujo de agua subterránea se puede definir que la zona de recarga que se localiza en las cercanías de Vanegas es la que presenta el agua de mejor calidad, acercándose el flujo subterráneo a la zona de descarga natural en las

cercanías de Matehuala la calidad del agua disminuye, observándose concentración de sales en el medio geológico.

La distribución de la salinidad en el agua subterránea para 1981 es la siguiente: i) la menor concentración de 700 mg/l se presenta al noroeste de Cedral, con un incremento paulatino en la dirección de flujo hacia la ciudad de Matehuala donde se tienen valores máximos del orden de 2000 mg/l.

2.10.7. Usos de Aguas Subterráneas

Datos del censo de 1991 indican que en la zona Cedral–Matehuala existen aproximadamente 230 aprovechamientos que extraen cantidades del orden de $54 \times 10^6 \text{ m}^3$ por año, siendo el más importante el uso agrícola con una extracción de aproximadamente $40 \times 10^6 \text{ m}^3$ por año, mientras que el uso público-urbano es de $12 \times 10^6 \text{ m}^3$ por año y el doméstico e industrial no es mayor de $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ por año.

2.11. ACTIVIDAD MINERA Y SU EFECTO EN EL AMBIENTE

En el margen E de la Sierra de Catorce, existe una sierra menor denominada Sierra del Fraile, en esta se presenta un yacimiento mineral de tipo skarn con dos tipos de mineralizaciones: i) vetas de Pb-Zn-Ag y ii) un skarn típico de Cu-Au (Zn); las mineralizaciones se encuentran separadas por la Falla de Dolores, que ha producido un desplazamiento vertical de 600 m situando a la mena de Pb-Zn-Ag al este de la misma falla en el poblado de Villa de la Paz y a la mena de Cu-Au (Zn) al este de la falla en la Sierra del Fraile (SEMIP, 1992).

La mineralización de Pb-Zn-Ag está formada por un conjunto de vetas de origen hidrotermal, con orientación general oeste-este. Las leyes promedios de esta mena son 7% Pb, 5% Zn y 145 mg/Kg Ag, con una mineralogía de mena constituida por galena (PbS), esfalerita (ZnS), arsenopirita (FeAsS), pirita (FeS₂) y sulfosales de Cu-Sb (SEMIP, 1992; Megaw, 1999). La mineralización de Cu-Au (Zn) se localiza en el skarn, de donde se extraen minerales con leyes promedio son 0.5 mg/kg Au y 0.2-

1.4% Cu, constituyéndose por calcopirita (FeCuS_2), bornita (Cu_5FeS_4), esfalerita (ZnS) y piritita (FeS_2) como mineralogía principal (Megaw, 1999).

La planta de beneficio de la mina está situada al este del poblado de Villa de La Paz, donde el mineral se beneficia por medio del sistema de flotación. También estuvo en funciones una planta de fundición hasta el año de 1965 en el área norte de Matehuala (Manz y Castro, 1997).

Dentro del poblado de Villa de La Paz y en los alrededores del mismo se han construido cinco presas de jales (Figura 12) y en el 2002 se comenzó la construcción de otra presa. Se desconoce el volumen total de residuos confinados en las cinco presas de jales, aunque se ha reportado que una de las presas contiene aproximadamente 8 millones de toneladas de jales con una concentración promedio de 4000 mg /kg de As en la fracción $< 63 \mu\text{m}$ (Castro, 1995).

Ha sido demostrado que existe dispersión fluvial y eólica de partículas de las presas de jales hacia el este, afectando con arsénico y metales pesados la parte norte de la ciudad de Matehuala (Castro, 1997, Razo et. al, 2004), mostrando contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos hasta el poblado de Cerrito Blanco, 4 km. a este de Matehuala.

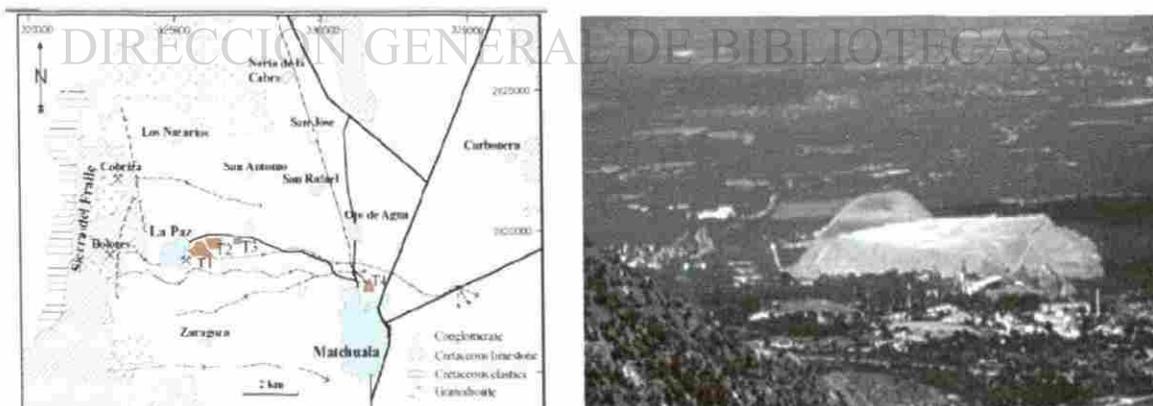


Figura 12. Presas de jales y canales de escurrimiento en el distrito minero de La Paz (Razo, 2004).

2.12. CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO

No obstante que el arsénico ha sido conocido desde varios siglos atrás como un agente tóxico, no ha sido hasta los últimos años que se le ha dado una especial importancia desde que se han publicado diversos trabajos que han mostrando las repercusiones negativas en la salud aún en cantidades muy pequeñas.

Es ahora sabido que el arsénico es el contaminante natural más conocido del agua subterránea, como lo demuestra un buen número de trabajos de diferentes lugares del mundo donde se presenta esta problemática (Argentina, Australia, Bangladesh, Chile, China, Hungría, India, México, Perú, Tailandia, Taiwán, y los Estados Unidos de América), (Smedley y Kinniburgh, 2002). Esto ha hecho ver a la comunidad científica que los casos de contaminación del agua subterránea debida al arsénico son mucho más comunes de lo que se creía anteriormente y que cada uno de estos casos no representa una situación aislada y que por lo tanto, a su recurrencia corresponde hacer igual número de consideraciones para identificar las causas o mecanismos de movilización y aplicar medidas de mitigación.

Esta crisis del arsénico como ha sido llamada implica a todos los países, aunque quizás el reto principal lo constituyen los países más pobres, debido a que no hay disposición de la tecnología y alternativas adecuadas para enfrenarlo.

Los trabajos que se han hecho referentes a la contaminación de aguas subterráneas por arsénico en diversas partes del mundo dejan clara la necesidad de señalar cuatro áreas claves: i) cambio en condiciones, necesidades, expectativas, ii) complejidad: en el sentido de la determinación de la relación causa-efecto; iii): incertidumbre, ya que se actúa basándose en informaciones incompletas, y iv) conflicto: en importancia y perspectivas, para asignación y uso de recursos (Alaerts y Khouri, 2004). Esta complejidad envuelve dimensiones científicas, culturales, sociales y económicas, donde solo es posible formular estrategias fuertes y dar soluciones aplicables a través de una política que integre las diversas disciplinas.

2.12.1. Arsénico en suelo

El arsénico es móvil dentro del medio ambiente y puede circular muchas veces en varias formas a través de la atmósfera, el agua, el suelo antes de entrar finalmente al sedimento. (Fishbein, 1984, en Merian, 1991).

El nivel promedio de arsénico en el suelo es de 7 mg/kg, aunque se han encontrado concentraciones de hasta 3000 mg/kg, siendo los sitios con altos contenidos suelos vecinos de fundidoras de metales, plantas de procesamiento de minerales y suelos agrícolas donde existe un uso excesivo de pesticidas y herbicidas (Merian., 1991). También altas concentraciones de arsénico en suelos pueden estar asociadas con el substrato geológico subyacente, tales como sitios donde ocurren mineralizaciones sulfurosas (WHO, 2001).

Los compuestos de arsénico tienden a formar complejos insolubles con los sedimentos. Los aniones complejos AsO_2^- , AsO_4^{3-} , HAsO_4^{2-} y H_2AsO_3^- son las formas de arsénico móvil más comunes (Kabata – Pendias y Pendias, 2001). Aunque algunos minerales y compuestos de arsénico son fácilmente solubles, la migración de los aniones complejos de arsénico en suelos y sedimento es limitada debido a su capacidad de adsorción en arcillas, hidróxidos y materia orgánica, siendo adsorbidos en un rango de pH de 7 a 9. Se ha demostrado que la movilidad de As en suelos es proporcional a la concentración de As incorporado e inversamente proporcional al tiempo y al contenido de óxidos de hierro y aluminio (Kabata – Pendias y Pendias, 2001).

La comunidad europea recomienda valores máximos de arsénico en suelos no mayores de 20 mg/kg de suelo.

Alaerts y Kohuri (2004) menciona que la liberación potencial del arsénico parece estar relacionada con tres tipos de suelos y situaciones hidrogeológicas principalmente, aunque no necesariamente esto significa que estos tres suelos contengan cantidades elevadas de arsénico en todos los casos. Los tipos de suelos

observados como potenciales en la liberación de arsénico por diversos mecanismos son:

1) Suelos pantanosos o pantanosos-arcillosos con altos contenidos de material húmico y con un elevado nivel estático, el cual contenga cristales de arsenopirita, cuando estos suelos son drenados para hacerlos productivos como suelos agrícolas, el oxígeno penetra oxidando la arsenopirita, liberando así un ácido rico en sulfato y arsénico disuelto dentro de agua subterránea y el agua drenada. Las concentraciones de arsénico fluctúan debajo de los 100 $\mu\text{g/l}$, encontrándose por ejemplo en Inglaterra, Alemania, Holanda.

2) Depósitos volcánicos recientes o fuentes de aguas termales, conteniendo comúnmente concentraciones elevadas de arsénico que pueden exceder 1 mg/l. Algunos ejemplos los constituyen Argentina, Bolivia, Chile, Grecia y Taiwán.

3) Depósitos arcillosos (especialmente en áreas deltaicas) que pueden contener arsénico en estado disuelto y/o adsorbido en las partículas de arcilla. La liberación de arsénico se cree que está primariamente gobernada por las circunstancias fisicoquímicas que controlan el equilibrio de los minerales (Anawar et al., 2003). Estos tipos de suelos se encuentran en Bangladesh y China (Mongolia y Jinjiang).

Además de los anteriores, las fuentes antrópicas de arsénico como presas de jales y suelos situados debajo de fábricas que procesan pesticidas a base de arsénico o bajo campos de cultivo en los cuales se aplican pesticidas con las mismas características pueden constituir fuentes importantes de arsénico

2.12.2. Arsénico en aire

En el aire el arsénico está presente principalmente en forma de partículas como trióxido de arsénico, con niveles de 0.02 a 4 ng/m^3 en áreas rurales y 3 a 200 ng/m^3 en áreas urbanas. En las cercanías con fundidoras de metales o plantas de energía que usan carbón los niveles pueden elevarse a los 1000 ng/m^3 e incluso más

(Fowler; 1977; Savory y Wills, 1984; WHO, 2001). En agua de lluvia, se han reportado concentraciones de arsénico de 0.03 $\mu\text{g/l}$ para áreas rurales, mientras que en áreas afectadas por operaciones de fundición se han reportado concentraciones de hasta 16 $\mu\text{g/l}$ (Smedley y Kinniburgh, 2002).

2.12.3. Arsénico en agua.

El agua normalmente contiene de 0.15- 0.45 $\mu\text{g/l}$ de arsénico, principalmente en forma inorgánica, pero algunas aguas en Canadá, Arizona, Argentina, Chile, Bosnia, Nueva Zelanda y Taiwán contienen más de 1000 $\mu\text{g/l}$ (Levander, 1977; Savory y Wills, 1984). Las aguas provenientes de fuentes minerales pueden contener más de 50 veces el valor normal, los manantiales termales pueden contener más de 300 veces los niveles normales de arsénico (Savory y Wills, 1984). En el océano, el arsénico se encuentra en concentraciones de 0.09- 24 $\mu\text{g/l}$ (Ishinishi et al., 1986; Marijanovic et al., 1983). La concentración de arsénico en ríos y lagos generalmente es menor de 10 $\mu\text{g/l}$ aunque se han reportado valores hasta de 5 mg/l cerca de fuentes antropogénicas (WHO, 2001). Se han reportado concentraciones de hasta 1100 $\mu\text{g/l}$ en ríos contaminados por descargas industriales, mientras que en aguas superficiales localizadas en las cercanías de residuos mineros se han reportado concentraciones mayores de 500 $\mu\text{g/l}$ (Smedley y Kinniburgh, 2002).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Bajo condiciones naturales, el rango más amplio y las concentraciones más elevadas de arsénico se encuentran en aguas subterráneas, esto como resultado de la interacción agua-roca que forma la matriz del acuífero. ®

El promedio de arsénico en aguas subterráneas fluctúa de 1 a 2 $\mu\text{g/l}$, excepto en presencia de rocas volcánicas o depósitos minerales sulfurados donde el arsénico puede alcanzar concentraciones por encima de los 3 mg/l (WHO, 2001). Los valores reportados en la literatura muestran un amplio rango que va desde <0.5 hasta 5000 $\mu\text{g/l}$ (Smedley y Kinniburgh, 2002).

2.12.4. Otras fuentes de arsénico

Los niveles naturales de arsénico en las plantas, en raras ocasiones exceden 1 mg/kg, pero el contenido en las hojas puede ser más grande si se han usado pesticidas con arsénico.

La mayoría de los alimentos contienen pequeñas cantidades de arsénico (0.25 mg/kg) y el consumo de alimento de origen marino representa la principal fuente de ingestión diaria de arsénico. En el pez marino, las concentraciones de arsénico pueden fluctuar de 1 a 10 mg/kg con valores de más de 100 mg/kg en ciertos peces y crustáceos de áreas más profundas (Fowler et al., 1979), aunque este arsénico es encontrado en sus formas estables y no tóxicas. (Burow y Stoepler, 1987).

2.12.5. Especiación.

El comportamiento químico de cualquier elemento en el medio ambiente depende de la naturaleza de sus componentes. Se sabe en la actualidad que el hecho que un elemento sea tóxico o esencial y la acción fisicoquímica o bioquímica de un metal depende de su forma química (compuesto y/o valencia) (Bernhard et. al., 1986).

Con el fin de entender el proceso de especiación en ambientes acuosos, si el origen es biológico o geoquímico, y las concentraciones de un elemento en una forma particular y sus formas disueltas tales como especies inorgánicas u organometálicas, complejos con compuestos orgánicos y adsorbidos sobre varios tipos de partículas coloidales han sido considerados (Chau, 1986 a, b; Andreae, 1986a; Duinker, 1986; Craigh, 1986).

De la misma manera que en suelos y sedimentos, el potencial redox y el pH son los factores más importantes que controlan la especiación de arsénico en agua. Bajo condiciones reductoras y a pH cercanos y menores de 9.2, la especie neutra de arsénico H_3AsO_3^0 es dominante.

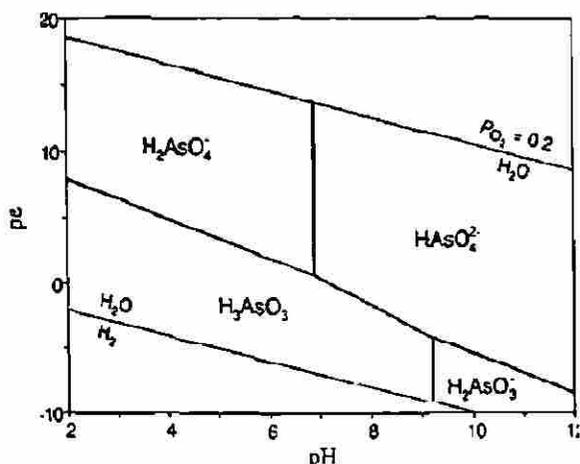


Figura 13. Diagrama de estabilidad Eh-pH, mostrando la especiación del arsénico disuelto. Los límites indican igual actividad de las diferentes especies de arsénico Appelo y Postma, 1996

En condiciones oxidantes, el oxianión $H_2AsO_4^{2-}$ es la especie dominante a pH menores de 6.9, mientras que a pH mayores, $HAsO_4^0$ y AsO_4^{3-} pueden estar presentes solo en condiciones de extrema acidez y alcalinidad, respectivamente (Figura 13) (Williams, 2001; Smedley y Kinniburgh, 2002).

La especiación del arsénico disuelto es importante para determinar la extensión de la reacción con la fase sólida y por lo tanto, la movilidad del arsénico dentro del agua subterránea. Aunque como ya se mencionó el As (III) es más tóxico que el As (V), recientes estudios han mostrado que la mayoría del As(V) ingerido es transformado a As (III), por lo tanto la ingestión de ambas especies puede repercutir en resultados toxicológicos similares (National Research Council, 1999)

2.12.5.1. Transformaciones Redox

Los procesos geoquímicos y biológicos naturales juegan un importante papel para el control de la transformación de arsénico en el subsuelo. La arsenita es termodinámicamente inestable en ambientes aeróbicos y podría oxidarse a As (V); aunque estudios han mostrado esta reacción procede lentamente cuando el oxígeno es único oxidante. Cherry et al. (1979) midió un lento rango de oxidación de As (III) en agua saturada con solo oxígeno aun pH 7. Después de 6 meses cerca del 25%

del as (III) ha sido oxidado comparado con la no oxidación en agua desoxigenada. Stollenwerk, (1996), Manning y Goldberg, (1997) reportaron un significativo incremento en el rango de oxidación de As (III) a As (V) en soluciones alcalinas (pH>9) bajo condiciones atmosféricas.

La presencia de otras especies sensibles incrementa el rango de oxidación de As (III). la adición de hierro férrico [Fe(III)] en agua oxigenada incrementa la cantidad de As(III) oxidado a un pH 7 (Cherry, et al., 1979) de acuerdo con las predicciones termodinámicas (Scott y Morgan, 1995)

2.12.5.2. Disolución.

Varios estudios previos han sugerido que la disolución de los sulfuros que contienen arsénico o los óxidos de Fe pueden ser la fuente primaria de arsénico en el agua subterránea. Por ejemplo, los sulfuros han sido propuestos como la fuente más usual de arsénico en el noreste de Estados Unidos (Welch et al., 2000). La oxidación de pinta que contiene arsénico como resultado del aumento de las condiciones oxidantes a través del tiempo ha sido propuesta como una fuente de arsénico en el agua subterránea en Wisconsin (Burkel y Stoll, 1999). Igualmente la disolución reductiva de óxidos de Fe ha sido señalada como una fuente de arsénico en el agua de Bengal oeste (Chowdhury et al., 1999., Nikson et al., 2000), y ha sido demostrada la liberación de arsénico proveniente de suelos contaminados por metales (Masscheleyn et al., 1991).

2.12.5.3. Adsorción-desorción.

Las concentraciones de arsénico observadas en la mayoría de las aguas subterráneas son en orden de magnitud menores que las solubilidades de la mayoría de de los minerales de arsénico. Las predicciones termodinámicas muestran que algunos minerales de arsénico podrían potencialmente controlar las concentraciones del mismo en el agua subterránea bajo condiciones geoquímicas comunes; aunque estos minerales están raramente documentados fuera de las zonas mineralizadas (Foster, 1999). Por lo tanto las reacciones de adsorción entre el arsénico y la

superficie de los minerales es el control más importante sobre las concentraciones de arsénico disuelto en el agua subterránea. La adsorción del arsénico es una función compleja de la interrelación entre las propiedades de la superficie sólida, pH, la concentración de arsénico y los iones competitivos y la especiación (Stollenwerk, 1996).

Los óxidos de hierro, aluminio y manganeso son potencialmente la fuente más importante que para la adsorción del arsénico debido a su extendida ocurrencia, y la tendencia a cubrir otras partículas. Estando expuestos a el agua, los iones metálicos de la superficie de los óxidos se complementan con grupos OH (Hingston et al., 1972) dependiendo del pH, estos grupos OH pueden liberar o tomar H^+ , resultando en el desarrollo de una superficie con carga. Las propiedades de adsorción de los óxidos son debidas a la presencia de estos grupos funcionales OH_2^+ , OH y O^- (Sposito, 1984).

2.12.6. Efectos en la salud

Los efectos en la salud producidos por la ingestión de agua con cantidades de arsénico mayores a los límites establecidos abarcan una serie de sintomatología que no es fácilmente identificable, sobre todo cuando se trata de intoxicación en cantidades pequeñas y dosis repetitivas.

El envenenamiento crónico por arsénico, tal como ocurre después de largas exposiciones a través de la ingestión de agua produce diferentes tipos de carcinomas, aunque la sintomatología es muy diferente, no presentándose síntomas inmediatos, pudiendo desarrollarse estos padecimientos hasta en un lapso de 10 años. Los síntomas inmediatos en una intoxicación aguda incluyen vómito, dolor abdominal y diarrea hemorrágica.

Los síntomas y signos que causa el arsénico, parecen diferir entre individuos, grupos de población y áreas geográficas, así, no hay una definición universal de los padecimientos causados por el arsénico. Similarmente no existe un método para

identificar aquellos casos de cáncer causados por arsénico de los producidos por otros factores (Smith, et. al., 2000).

La exposición a largo plazo al arsénico vía agua potable en concentraciones de 0.05 mg/l e incluso menores, causa cáncer de piel, de pulmón, vejiga, y riñón, y otras alteraciones en la piel como cambios de pigmentación y adelgazamiento de la misma (WHO, 2003).

De acuerdo a algunas estimaciones, la presencia de arsénico en agua potable causará de 200 000 a 270 000 muertes por cáncer solamente en Bangladesh (NRC, 1998; Smith, et al., 2000).

El consumo humano diario fluctúa entre 0.01 y 0.3 mg de As dependiendo de la dieta. Las concentraciones normales en los órganos humanos y fluidos corporales se encuentra entre 0.02 y 0.06 ppm. Los niveles más altos se encuentran en la piel, los dientes, las uñas y el pelo (Ishinishi et al., 1986). El contenido normal en la sangre es de 0.002 mg /l y de 0.01 mg/l en orina en mexicanos no expuestos y en mexicanos considerados en riesgo los niveles son : 0.008 mg /l en sangre y 0.3 mg/l en orina.(Fishbein, 1984).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

La contaminación debida al arsénico se puede incluir en una lista de situaciones [®] problemáticas presentes en lo relativo al suministro de agua potable a nivel mundial (Tabla 3), donde millones de personas son afectadas por diversos factores que influyen en un adecuado abastecimiento desde un enfoque de salud pública principalmente.

Tabla 3. Problemas enfrentados por algunas deficiencias en el suministro de agua a nivel mundial (modificado de Alaert y Khouri, 2004)

| Problema enfrentado | Población afectada | Efectos en la salud | Remedios disponibles | |
|--|--|--|---|---------------------|
| | | | Tipo | Complejidad técnica |
| Acceso limitado a agua potable | Solo países en desarrollo: 2500 millones ^a | Varios | Incremento en la cobertura duplicando programas de suministros | Moderada |
| Enfermedades gastrointestinales debido a patógenos producidos por el agua (relacionados al agua superficial) | Solamente países en desarrollo: 1500 millones de casos/año; 3 mill. Muertes/año (carga: 120 mill. DALY/año) ^c | Diarrea, cólera, infecciones estomacales, comúnmente fatales | Mejorar la higiene, mejorar sanidad, aplicando desinfectantes de agua | Baja |
| Plomo en suministro de agua | 1 millón | Desorden neuronal y cerebral | Reemplazar la tubería de plomo y accesorios | Baja |
| Flúor en suministro de agua (agua subterránea) | La mayoría en países en desarrollo | Decaimiento de dentadura, deformación de huesos | Remoción de flúor, o proveer agua de fuentes alternas | Moderada |
| Arsénico en el suministro de agua | La mayoría de países en desarrollo: 50 millones | Enfermedades de la piel, cáncer intestinal; comúnmente fatal | Remoción de arsénico, o proveer agua de fuentes alternas | Moderada a alta |

^aPersonas que sufren enfermedades. El número de personas en riesgo es moderada (flúor) a sustancialmente (enfermedades gastrointestinales, plomo y arsénico) alta

^b WHO (1996)

^cDALY, Disability-adjusted life years (WHO, 1995; Murray y López 1996; Van der Hoek et al. 1999)

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

2.12.7. Usos y productos de deshecho.

El arsénico está ampliamente distribuido en la corteza terrestre y es introducido al agua por medio de la disolución de los minerales y la concentración elevada en agua subterránea en algunas zonas específicas está íntimamente ligada con la erosión de las rocas locales.

La aplicación más frecuente de las sales de arsénico se usan en la preparación de insecticidas, herbicidas, desecantes para facilitar la cosecha mecánica del algodón, fungicidas, rodenticidas, algicidas, baños para ovejas, preservativos de madera

aunque por causa de los riesgos medioambientales y de seguridad laboral estos usos han ido en decremento.

Otros usos del arsénico incluyen la industria del vidrio, aplicaciones en electrónica colores para relojes digitales, en la industria textil y en la industria del curtido de pieles, manufactura de pigmentos y pinturas anticorrosivas, en cosmética como agente depilatorio y en la industria cerámica.

Algunos de los compuestos de arsénico han encontrado aplicación en medicina veterinaria

2.12.8. Casos de contaminación por arsénico en el mundo.

Los principales sitios donde se han identificado y documentado ampliamente problemas de contaminación por arsénico por diversos investigadores se localizan en la tabla 4; en todos estos casos ha sido bien identificado el arsénico como el agente causante de los efectos negativos en la salud de la población de estas localidades, afectando a un gran número de los habitantes de aquellos países.

El primer de estos casos registrados ocurrió en 1968 en Taiwán. En México las autoridades locales detectaron problemas de arsenicosis en los años 60's, aunque fue hasta varios años después que se reconoció que esto estaba relacionado con contaminación del agua. El área principalmente afectada en México es la llamada Región Lagunera, que es una gran cuenca cerrada, situada entre los estados de Durango y Coahuila con fuerte producción agrícola (Rosas et al., 1999). Otro de los casos conocidos en México es el registrado en Zimapán, donde se han medido concentraciones hasta de 1.097 mg/l en pozos profundos. Aquí se han identificado tres fuentes de contaminación, dos de origen antrópico y una de origen natural (Armienta y col., 1997).

La contaminación en el caso de Chile fue reconocida en la década de los 70's. En los 1980's el problema en Bengal oeste, India así como en Ghana además de otros

países fue documentada. Pero sin duda el caso de contaminación más grande conocido hasta la fecha lo constituye Bangladesh, donde comenzaron las investigaciones oficiales en 1995. Después en 1997 el número de estudios e iniciativas aumentó rápidamente, llegando al descubrimiento que la mayor parte del país debería ser considerada en serio riesgo (Alaerts y Khouri, 2004).

La fuente del arsénico en la mayoría de estas localidades es de origen natural, derivada de la interacción entre el agua subterránea y los sedimentos del acuífero (Azcue y Nriagu, 1994, Cebrian et al., 1994; Chen et al., 1994; Nickson et al., 2000; Welch et al., 1988; Welch et al., 2000). En Tailandia por ejemplo, se ha considerado como la fuente de contaminación, a la oxidación de la arsenopirita en una área impactada por operaciones mineras (Smedley en Welch, 2003) al igual que Bangladesh, donde varios trabajos (Mandal et al., 2002) señalan la oxidación de pirita o arsenopirita como la responsable de los altos niveles de arsénico por medio de la sobreexplotación del agua subterránea en los distritos afectados. Aunque se tiene una opinión diferente por parte de Bhattacharya (1997) quien propone como mecanismo dominante de la liberación de arsénico la disolución de óxidos de hierro bajo condiciones fuertemente reductoras. Esta segunda hipótesis es más plausible como mecanismo dominante aunque el mecanismo preciso para la movilización del arsénico en un medio reductor no es del todo claro aún (Smedley y Kinniburgh, 2002).

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 4. Situación mundial de contaminación por arsénico

| País o región | Número de personas en riesgo ^a | Distribución espacial y naturaleza de la contaminación ^b |
|---|---|---|
| Taiwán Zonas costeras nororientales y sudorientales | 200 000 | Pequeños poblados rurales, dependiendo del nivel de contaminación en los pozos (medio a alto), poco más de 1,8 mg/l |
| China Mongolia interior, - Shaanxi, Xinjiang | 1 700 000 | Incidencia dispersa a bajos, medios y ocasionalmente altas concentraciones en los pozos. |
| USA >0.05 mg/l (en la parte oeste) >0.025 mg/l | 200,000 (>0.05 mg/l) 2 500,000 (>0.025 mg/l) | El origen es variado; ocurre primariamente en algunos ríos de California. Debido a fuentes geotérmicas. En las planicies oeste y este, bajas concentraciones. Cuencas cerradas con formaciones calcáreas: el As fue encontrado primero en la esquina este del acuífero, dispersándose a otros lugares. Bajos a medios concentraciones en un gran número de pozos |
| México Región Lagunera: Torreón, Matamoros, Viesca, Edo. L. Madero, Gómez Palacio, etc.(estados de Durango y Coahuila) | 400 000 | Asociado con volcanismo cuaternario en Cordillera Andina Central. Algunos ríos y lagos contaminados por manantiales termales; algunas cuencas cerradas con lagos evaporados. En regiones pozos someros contaminados algunas veces más de 1 mg/l en ríos. En las planicies argentina del noroeste, también en suelos sedimentarios |
| Chile Regiones Loa y Salado: ciudades de Antofagasta, Colama, Chuquibambilla, Salar de Atacama; Provincia de Arica | 400, 000 | En particular acuíferos .Origen hidrotermal. Altas a bajas concentraciones |
| Argentina Provincia de Salta: regiones de Puan y Chaco Salteño | 200,000 | La mayoría en suelos sedimentarios. Medias a altas concentraciones |
| Bolivia Altiplano sureste | 50,000 | La mayoría de los pozos artesanos en suelos sedimentarios. Medias a bajas concentraciones. Posiblemente minado de oro y oxidación de arsenopita. |
| Grecia Thessaloniki | 150,000 | En 8 de los 17 distritos 50% de los pozos afectados. Media a baja concentración. Origen incierto. |
| India Estado de Bengal oeste | 40 000,000 | Bajas a altas concentraciones, en algunas áreas 80-100% de los pozos están contaminados. El acuífero parece ser un ambiente reductor a alcalino. |
| Bangladesh | 80 a 90 millones | |

^aEn la mayoría de los distritos

^bPersonas viviendo cerca y/o consumiendo agua con >0.05 mg As/l

Concentraciones bajas/medias/altas: en orden de magnitud de 0.01-0.05/0.05-0.25/por encima de 0.25 mg/l(Mandal y Suzuki 2002). Modificado de Alaert y Knouri.(2004)

2.13. TRABAJOS PREVIOS

El número de estudios técnicos disponibles relacionados con los recursos hídricos de la región de Matehuala y zonas aledañas es muy reducido, sobretodo en lo que atañe al estudio de las aguas subterráneas. Esta deficiencia es aún más importante cuando se considera el aspecto de calidad del recurso hídrico subterráneo, ya que desde hace aproximadamente 20 años que no se realiza una actualización integral que establezca la distribución de los elementos mayores, menores y traza en el agua subterránea del área de interés. Solamente existen algunos estudios muy específicos, que fueron realizados en porciones muy reducidas del acuífero con el objetivo de identificar zonas impactadas en las que se modificó la calidad de este.

Únicamente se localizaron cinco estudios importantes realizados para la evaluación de los recursos hídricos dentro del área de estudio, realizados cuatro de estos entre los años de 1972 y 1981, así como el más reciente (2002) enfocado a la zona oriente del área de estudio. Además existen algunos otros estudios que presentan información de la zona o datos generales. A continuación se señalan algunos aspectos relevantes establecidos en los estudios que cubren la zona de interés.

El estudio más antiguo del que se tiene conocimiento para esta zona es *“Informe del estudio geohidrológico preliminar en la zona de Cedral-Vanegas, S.L.P.”* elaborado por Hidrotec, S.A. para la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (1972). Este trabajo está compuesto por tres tomos de los cuales solo se encuentra disponible el segundo, que presenta esencialmente: 20 pruebas de bombeo y planos geológicos y de localización de perforaciones, exploraciones propuestas, pozos con muestras de agua y curvas de igual resistividad del agua. Debido a que no se logró conseguir el estudio completo, tampoco fue posible definir el objetivo y los resultados de tal investigación.

En caso similar se encuentra el estudio de 1975 elaborado por la empresa Geohidrológica Mexicana, S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos, denominado *“Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos, en*

el Estado de San Luis Potosí, zona El Salado, zona Cedral-Matehuala, zona Vanegas-Estación Berrendo”, el cual consta de dos tomos y sólo se tuvo acceso al segundo, que consiste de una serie de planos. Por tanto, también se desconoce cuales fueron los objetivos y resultados obtenidos; sin embargo, al igual que en el caso anterior los planos identificados se utilizaron para tener una idea general de las diversas condiciones hidrogeológicas (direcciones de flujo, propiedades hidráulicas, calidad del agua).

El tercer estudio con que se cuenta es el llamado *“Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de Charco Blanco-Matehuala, San Luis Potosí”* elaborado por Geohidrológica Mexicana, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1979). El objetivo de esta investigación consistió en determinar con precisión la localización de conductos cársticos en las formaciones calcáreas aflorantes, las cuales deben estar relacionadas con las zonas de mayor permeabilidad, como se tiene comprobado en las calizas arrecifales del área de Monterrey, N.L. y proponer sitios para pozos exploratorios. Otro objetivo consistió en realizar un censo de aprovechamientos de aguas subterráneas y determinar su calidad.

En 1981 la empresa IEPSA, Ingeniería de Evaluación y Prospección, S.A. elaboró el *“Estudio geohidrológico con fines de abastecimiento a la ciudad de Matehuala, S.L.P.”*, para la entonces Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas y tuvo como objetivos principales: determinar las condiciones de explotación del acuífero de la zona *“Matehuala-Cedral-Vanegas”*, S.L.P.; cuantificar la recarga para establecer la factibilidad de extraer volúmenes adicionales de agua subterránea, sin inducir efectos perjudiciales; definir a nivel anteproyecto las características constructivas y de operación de las captaciones subterráneas con fines de abastecer a la ciudad de Matehuala; y, analizar mediante un modelo simplificado, la posible repuesta piezométrica del acuífero ante varias políticas de extracción.

Por último Razo Soto (2002) en su tesis de maestría demostró una elevada contaminación por arsénico en el área de descarga del acuífero localizada al oriente de la ciudad de Matehuala. Esta agua es captada en un sistema de canales subterráneos y es conducida por gravedad hasta salir a superficie cerca de la comunidad de Cerrito Blanco en el centro del valle. Este estudio registra elevados valores de arsénico en algunas muestras de agua superficial y subterránea, además de muestras de suelos, pero no demuestra su proveniencia ni su comportamiento en las zonas próximas al área de ese estudio.

En el tercer trabajo aludido (Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de Charco Blanco-Matehuala, San Luis Potosí), se tomaron 54 muestras de agua subterránea de pozos y manantiales para analizarse en laboratorio los siguientes parámetros: STD, sulfatos, cloruros, carbonatos, bicarbonatos, flúor, sodio, calcio, magnesio y pH. Los resultados arrojaron en primer lugar que el contenido máximo de STD en toda la zona era de 2000 mg/l, encontrándose en las cercanías de Matehuala; en la ciudad de Cedral no se reportaron valores mayores a 1700 mg/l STD y la menor salinidad se localizó en las cercanías a Estación San Isidro. Por otra parte, los valores de sulfatos fluctuaron entre los 300 mg/l y los 1000 mg/l, siendo los valores más elevados las muestras correspondientes a las inmediaciones de Cedral, los contenidos más bajos se registraron entre Estación San Isidro y Cedral con valores entre los 170 y 200 mg/l. La concentración de cloruro variaba entre 20 mg/l y 250 Mg/l, encontrándose las mayores concentraciones en pozos situados en la ciudad de Matehuala. Por su parte el ion fluoruro presentaba valores del orden de 0.6 mg/l a 2.0 mg/l y su distribución espacial era muy similar a la seguida por el cloruro. En el caso de los cationes, se tenía en general valores bajos; los valores de calcio se situaban entre las 100 mg/l y los 500 mg/l, encontrándose los valores mayores en la parte noroeste de Matehuala. Los contenidos de sodio fluctuaban entre los 90 mg/l y los 400 mg/l.

A partir de los resultados de laboratorio del estudio de 1981, se realizó una clasificación del agua subterránea por medio de diagrama de Piper dando como

resultado los siguientes tipos predominantes: i) familia sulfatada-cálcica-sódica, ii) la familia sulfatada-bicarbonatada cálcica-sódica y iii) la familia sulfatada cálcica-sódica-magnésica (IEPSA, 1981).

En general los resultados de la interpretación hidrogeoquímica reportados por IEPSA (1981), indican que el aumento de la salinidad del agua subterránea es a partir de donde se localizan los pozos utilizados para el suministro de agua potable en Estación San Isidro siguiendo en dirección sureste hacia la ciudad de Matehuala, la cual es congruente con la dirección de flujo subterráneo. Establecen que las concentraciones de sulfato y calcio encontradas en el área de estudio, indican que el agua subterránea proviene de la infiltración del agua de lluvia en formaciones calcáreas con contenidos altos de yeso, y en terrenos formados en ambientes áridos. La tabla 5 muestra de manera simplificada lo anteriormente descrito.

Tabla 5. Trabajos previos realizados en el área de estudio-

| ESTUDIO | AÑO | AREA DE ESTUDIO | OBJETIVO GENERAL | RESULTADOS |
|---|------|---|---|--|
| Informe del estudio geohidrológico preliminar en la zona Cedral-Vanegas, SLP | 1972 | Cedral-Vanegas | Desconocido | Localización de perforaciones. Propuestas de exploración. |
| Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en el estado de SLP | 1975 | Cedral-Matehuala. Vanegas-Estación Berrendo | Desconocido | Desconocidos |
| Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona Charco-Blanco-Matehuala, SLP | 1979 | Matehuala y Charco Blanco | Localización de conductos cársticos. Censo de aprovechamientos y determinación de la calidad del agua subterránea | Desconocidos |
| Estudio geohidrológico con fines de abastecimiento a la ciudad de matehuala, SLP | 1981 | Matehuala | Determinar condiciones de la explotación. Cuantificar la recarga. Establecer políticas de extracción | Definición de las características constructivas y de operación de las captaciones subterráneas |
| Contaminación en suelo por metales en un área minera | 2002 | Matehuala-La Paz | Determinar la contaminación por metales pesados en un sitio minero | Muestra la contaminación por arsénico en suelo y agua en Matehuala y Villa de la Paz |

2.14. OBJETIVO GENERAL

Identificar la distribución de las características químicas del agua subterránea en la porción semiárida de la región norte del altiplano potosino, específicamente en el área que ocupan los poblados de Cedral, Matehuala y sus cercanías estableciendo las limitantes que presenta en relación con el uso al que se le destina y las modificaciones geoquímicas que se han producido debido al manejo al que hasta ahora ha estado sujeto.

2.15. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la composición química (inorgánica, elementos mayores, nutrientes y traza) del agua subterránea para determinar si es apta para los usos (potable y agrícola) a los que se le destina.
 - Implementar un sistema de información geográfica con la información geoquímica generada y los datos históricos existentes.
 - Definir reacciones químicas entre el agua subterránea y los minerales que conforman el medio geológico por donde se desplaza, para establecer un modelo geoquímico conceptual acorde a los diversos sistemas de flujo subterráneo existentes.
-
- Determinar la evolución química del agua, elementos mayores como Ca, Na, K, Mg, Si, F, Cl, NO₃, SO₄, PO₄, y elementos traza (Pb, Ba, As, Sr, Fe, Cr, Mn, Al, Co, La, Zn, Sb, Bi, Li) a lo largo de la dirección de flujo subterráneo.
 - Identificar regiones afectadas por procesos de contaminación de origen antropogénico y/o degradación natural.
 - Analizar cuantitativamente el modelo conceptual propuesto mediante modelación hidrogeoquímica inversa utilizando una aproximación del balance de masa.
 - Determinar la extensión de la contaminación por arsénico en las zonas afectadas.

2.16. JUSTIFICACIÓN

La escasa información hidrogeológica existente del área Cedral-Matehuala y la importancia que tiene el sitio desde el punto de vista de abastecimiento de recursos hídricos para toda la porción norte del altiplano y las implicaciones económicas y sociales en el caso particular de la ciudad de Matehuala, hacen necesaria una evaluación integral de las características de la misma. Adicionalmente, es importante aportar información actualizada de las características geoquímicas del agua subterránea, para dar un uso adecuado al recurso hídrico.

En los últimos estudios del área, los cuales han sido elaborados principalmente con fines de abastecimiento, es claramente visible un deterioro de la calidad del agua; por lo tanto, es preciso conocer la causa de ese detrimento y establecer en su caso las posibles medidas a tomarse para evitar en la medida de lo posible, el avance del empobrecimiento de la calidad del agua, todo esto enmarcado dentro de un proyecto que incluye un detallado análisis de las condiciones hidrodinámicas, geológicas, medioambientales e hidrogeoquímicas que permitirá posteriormente una administración sustentable por parte de los organismos operadores del agua en la región.

3. METODOLOGÍA

3.1. TRABAJOS DE CAMPO.

3.1.1. Censos de aprovechamientos

Tomando como base censos anteriores (1981) del Sistema de Agua Potable, Saneamiento y Alcantarillado de Matehuala (SAPSAM), se realizaron visitas a los usuarios de Cedral, Matehuala, Vanegas y Villa de la Paz, para obtener información de la construcción y funcionamiento de los aprovechamientos utilizando para ello el cuestionario adjunto (Figura 14).

3.1.2. Recolección de muestras.

Se realizó un primer muestreo durante la temporada de estiaje (marzo 2003) de 62 aprovechamientos de agua subterránea de pozos, manantiales, norias, y canales, abarcando los municipios de Vanegas, Cedral, Matehuala y Villa de La Paz, específicamente en los poblados de San Juan de Vanegas, San Isidro, Noria de Dolores, Encarnación de Arriba, Limones, Refugio de Monjas, Sarabia, Tanque de Agua Buena, Piedrita Blanca, Rancho Nuevo, Cerro de Flores, Cerrito Blanco, Pastoriza, Ejido de Dolores, Pocitos, Cedral y Matehuala.

Un Segundo muestreo se llevó a cabo en el mes de noviembre del mismo año después de una temporada de lluvias de regular magnitud, los procedimientos utilizados para la recolección, el almacenamiento y el análisis en laboratorio fueron los mismos que se implementaron durante el primer muestreo. En esta segunda etapa se lograron obtener muestras de 56 aprovechamientos, debido a que es una temporada baja en el ciclo agrícola y un buen número de aprovechamientos se tienen sin operación durante esta temporada, representando este hecho una dificultad a vencer durante el segundo muestreo.

Para la recolección de las muestras de agua se tomó como base el "Protocolo de Toma de Muestras de Agua Subterránea" (Armienta y col., 1987, Deutsch, 1997) para que el muestreo sea realizado de manera correcta y evitar alteraciones en las

muestras tanto en su recolección, como su almacenamiento y transporte hasta su análisis en laboratorio considerando los siguientes puntos:

CENSO DE APROVECHAMIENTOS

| | | | |
|----------------------|---------------------|----------------------|---------|
| Fecha | 13 - febrero - 2003 | No. de Censo | 11 |
| Clave | CNA (7) 103 | | |
| Coordenadas X | 324901 | Coordenadas Y | 2637825 |
| Localidad | cedral | Municipio | Cedral |
| Propietario actual | Gabriel Medrano | | |
| Propietario anterior | | | |
| Vecino(s) de predio | | | |
| Nombre del predio | Buenavista | | |
| Grupo o Zona | | Fecha de perforación | |

| | | | |
|--|----------|---------------------------------|---------------|
| No. de medidor CFE | B971T1 | | |
| Nombre dado de alta en CFE | | | |
| Nombre registrado en CNA | | | |
| Forma de explotación | Bomba | Aprovechamiento | Pozo |
| Uso del agua | Agrícola | Profundidad total (m) | 300 |
| Elevación del brocal | | Prof. N.E (m) | Prof. N.D (m) |
| Φ Pozo | 18" | Φ Ademe | 14" |
| | | Φ Descarga | 2" |
| Gasto X(cm) | 6 l/s | Gasto Y(cm) | |
| Horas de operación (día) | 24 | Horas estimadas de bombeo (año) | |
| Horas estimadas de bombeo por ciclo de siembra | | | |
| Cultivo | | | |
| Horas | | | |
| Temperatura (°C) | 23 | C.E. | 1576 |

| | | | |
|---------------|------------|------------|-------|
| Tipo de bomba | Sumergible | Φ Descarga | 2" |
| Tipo de motor | Eléctrico | Potencia | 25 HP |

| | | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|----------|
| Área de predio | 25 Ha. | | | |
| Área de cultivo | 6 Ha. | | | |
| Superficie de riego | 4 Ha. | | | |
| Sistema de riego | Gravedad | | | |
| Conducción de agua | Canales | | | |
| Tipo de cultivo | Cebollas | Lechugas | Repollo | Cilantro |
| Superficie regada | 1/2 Ha. | 1/2 Ha. | 1/2 Ha. | 1/2 Ha. |
| Tipo de Fertilizante | Marca | | Composición | |
| Ton. por Hectárea | Aplicaciones por año | | | |
| Tipo de plaguicida | Tamaron | Aplicaciones por año | 56 | |
| Vende agua? | | Precio (ha) | Horas/bombeo | |

| | | | | |
|--------------------------|------------------|-------------|-----------------|---|
| Seleccionado para: | Prueba de Bombeo | Pozo piloto | Muestra de agua | / |
| Observaciones sondeable. | | | | |

Figura 14. Hoja de campo para censo de aprovechamientos.

3.1.2.1. Mediciones y registros hidrogeológicos.

Es necesario contar con datos como i) profundidad total, ii) longitud de la tubería de ademe lisa, iii) longitud de ademe ranurado, iv) diámetros de perforación y de ademe, v) diámetro de la columna de bombeo y de la descarga, vi) tipo de equipo de

bombeo, vii) tipo de motor utilizado para accionar la bomba y viii), además de profundidad al nivel dinámico, gasto de extracción, corte litológico del pozo.

3.1.2.2. Toma de la muestra.

En Primer lugar se definió el volumen de muestra requerido para el tipo de análisis químico de laboratorio, tomándose muestras en envases de polietileno en los siguientes volúmenes: 500 ml para los elementos mayores; de 125 ml. para la cuantificación de nitratos aplicándose H_2SO_4 como conservador; de 125 ml. para metales aplicándose HNO_3 como conservador y pasándose por un filtro de acetato de celulosa con aberturas de diámetro nominal de 0.45μ micras; de 60 ml. para elementos traza filtrándose al igual que la anterior y aplicándose HNO_3 como conservador. Los envases fueron previamente lavados con agua deionizada y enjuagados tres veces con agua del aprovechamiento del cual se tomaría la muestra de agua.

Todas las muestras se mantuvieron en refrigeración hasta su análisis en el laboratorio, ya que no fue posible el traslado de las mismas de Cedral o Matehuala a la ciudad de San Luis Potosí pero en todo caso su almacenamiento no excedió los 5 días, conservando con esto una buena calidad en las muestras, sin presentar las alteraciones a las que ya se ha hecho referencia.

La conservación de las muestras por medio de la refrigeración o la adición de algún ácido tiene por objeto retardar los cambios químicos y biológicos que pueden ocurrir en las muestras de agua como resultado del proceso natural de adaptación a condiciones ambientales diferentes a las que tiene el agua subterránea a profundidad. En la tabla 6 se muestran los conservadores usados y la función que desempeñan.

Tabla 6. especies preservadas, recipientes requeridos y conservador utilizado

| MUESTRA PARA: | TIPO DE ENVASE | CAPACIDAD | CONSERVADOR | FILTRADA |
|-----------------------------|----------------|-----------|--------------------------------|----------|
| FCQ-UASLP (aniones) | POLIETILENO | 500 ml | NO | NO |
| FCQ-UASLP (metales) | POLIETILENO | 125 ml | HNO ₃ | SI |
| ActLabs(traza) | POLIETILENO | 60 ml | HNO ₃ | SI |
| FCQ-UASLP(NO ₃) | POLIETILENO | 125 ml | H ₂ SO ₄ | NO |
| ISÓTOPOS | POLIETILENO | 30 ml | NO | NO |

3.1.2.3. Mediciones de campo.

Estas son necesarias debido a que varios de los parámetros que tienen que medirse se ven alterados pasando un tiempo relativamente corto, por lo que su medición en laboratorio tendrá cierta deficiencia, por lo tanto deben hacerse directamente en el lugar de la toma de la muestra. Parámetros como la alcalinidad pueden cambiar debido a la precipitación de algunos carbonatos, esto también modifica el pH de la muestra. También cambios en las condiciones redox provocan precipitación de óxidos.

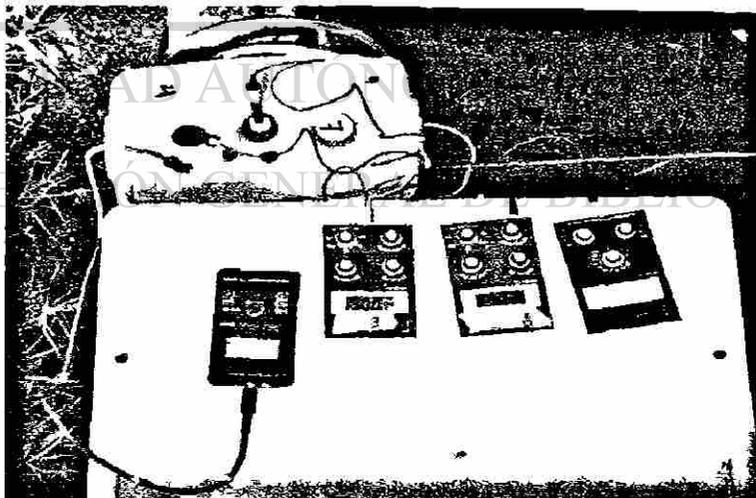


Figura 15. Arreglo de celda de aislamiento para medición de parámetros de campo durante la toma de la muestra.

Se midieron los siguientes parámetros en campo:

Temperatura (°C).

Las reacciones químicas de interacción agua-acuífero son función de la temperatura, por lo tanto, la medición en campo de este parámetro es de vital importancia en los cálculos relacionados con interpretaciones hidrogeoquímicas. La temperatura del agua subterránea generalmente varía muy poco, por lo que cuando su incremento es notable, permite distinguir diferentes profundidades de circulación o factores específicos que afectan localmente al acuífero. Su medición puede realizarse con un termómetro estándar de mercurio, pero es más recomendable utilizar termómetros digitales con una aproximación de $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

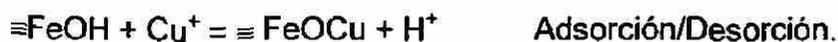
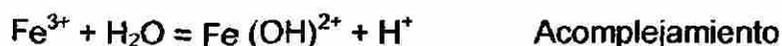
La medición de la temperatura durante la toma de muestra de agua subterránea es de vital importancia para los cálculos termodinámicos relacionados con la química del agua.

La medición en campo se realizó con termómetro Markson Digital modelo 95 con un rango de lectura de 0.1 y precisión ± 1 dígito.

pH.

El pH de una solución está definido como el logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno expresado en moles por litro, cuando el agua subterránea es removida del acuífero los controles físicos que limitan la actividad del ión hidrógeno cambian, y así, el pH cambia también.

La actividad del ion hidrógeno es una variable clave en los sistemas de agua subterránea, ya que el ion hidrógeno participa en la mayoría de las reacciones químicas que afectan la composición del agua. Por ejemplo:



Ya que existe dependencia del pH con la temperatura, debe especificarse el valor de la misma al efectuar la medición. Para la determinación de pH en las muestras en campo se utilizó medidor de pH Markson Digital modelo 95 y Orión

Alcalinidad.

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

La expresión $(m_{\text{CO}_3^{2-}} + 2m_{\text{HCO}_3^-})$ es la alcalinidad del carbonato. En la mayoría de las aguas naturales alcalinidad del carbonato = alcalinidad total (Drever, 1988).

Determinación de la alcalinidad por el método de Titulación de Gran.

Como es conocido la alcalinidad es uno de los parámetros que sufren alteración más fácilmente cuando el agua subterránea se pone en contacto con la atmósfera por lo que es una de las cuantificaciones hechas en campo. La determinación de la alcalinidad se realizó por medio de la titulación de la muestra por el método de Gran, cuyo principio consiste en que pasado el punto en que se ha convertido el total de HCO_3^- a H_2CO_3 la concentración de protones incrementa linealmente por la cantidad de protones añadidos. Para esto se utilizó un titulador marca Hach mod. AL-DT con un rango de medición de alcalinidad de 10 a 4000 mg/l. el equipo consiste en una pistola graduada y ampollas de ácido clorhídrico a 0.16N, obteniendo lecturas de pH para diferentes cantidades de ácido añadidas, posteriormente manejando los datos obtenidos en campo mediante el programa Excel, se obtuvo el valor de la alcalinidad para cada una de las muestras de la siguiente manera:

| pH | V H ₂ SO ₄ añadido | Función de Gran |
|------|--|-----------------|
| 6.42 | 0.6 | 0.00383 |
| 6.03 | 1.3 | 0.00945 |
| 5.5 | 1.9 | 0.03222 |
| 5.08 | 2.25 | 0.08505 |
| 4.01 | 2.50 | 1.00167 |
| 3.5 | 2.6 | 3.24529 |
| 3.33 | 2.8 | 4.80598 |

| | |
|---|-------------------------------|
| V muestra= | 100 ml |
| Normalidad H ₂ SO ₄ = | 0.1608 N |
| P. Equivalencia= | 2.45 ml |
| Alcalinidad Tot.= | 196.98 mg/l CaCO ₃ |
| HCO ₃ = | 240.32 mg/l |

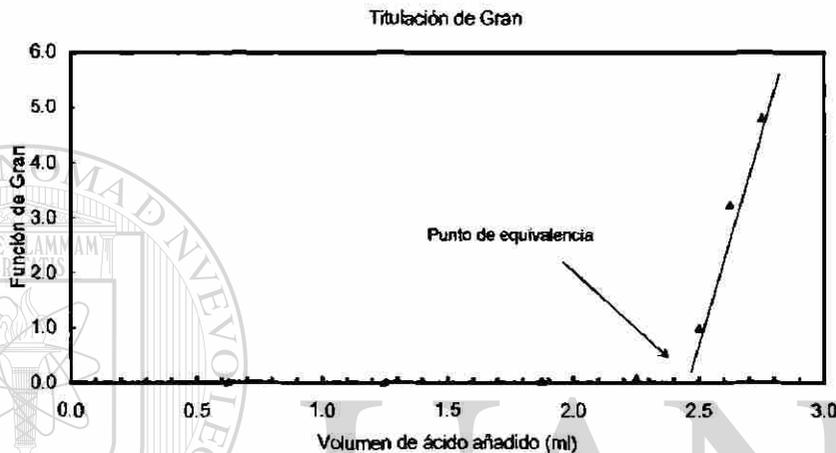


Figura 16. Procedimiento para la titulación por medio del método de Gran. (Appelo y Postma, 1996).

Función de Gran

$$F = (V + V_0) \times 10^{-\text{pH}} \quad V = \text{volumen de muestra}$$

$$V_0 = \text{volumen de ácido añadido}$$

$$\text{Punto de Equivalencia} = \frac{[(V_{\text{muestra}} + V_{\text{ácido añadido}}) \times 10^{-\text{pH}}] \times 100}{\dots}$$

La alcalinidad total se obtiene

$$\text{Alcalinidad} [(P \text{ eq} \times N_{\text{ácido}}) \times 50\,000] / \text{Vol. de muestra}$$

Conductividad Eléctrica.

La conductividad de una solución es la capacidad de la misma para transportar la corriente eléctrica. Debido a que la electricidad se transporta por la migración de los iones en solución, la conductividad se relaciona con la concentración iónica total. Como la actividad iónica es afectada por la temperatura, la conductividad eléctrica

incrementa con la temperatura. La determinación de este parámetro se efectuó por medio de conductímetro marca Conductronic modelo PC18 de donde se obtiene la lectura directa de la conductividad eléctrica de la muestra de agua. La unidad de medida utilizada es el recíproco de la resistencia en ohms y se expresa como microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Oxígeno disuelto.

La presencia de oxígeno disuelto en el agua subterránea normalmente indica reciente exposición del agua a influencia atmosférica. Una vez que la muestra es tomada, la reoxigenación puede ocurrir rápidamente por el cambio de un medio cerrado como lo es el acuífero al ambiente atmosférico, por lo tanto, el uso de la celda de aislamiento para estas y las demás determinaciones es sumamente importante, ya que de esta manera se trata de proveer condiciones similares a las que el agua subterránea se encuentra dentro del acuífero. El electrodo que se utiliza para la medición del oxígeno disuelto consiste de un ánodo de plomo cubierto por polietileno, rodeado de cátodo de plata coaxial que a su vez está cubierto con una membrana de polietileno permeable al oxígeno. El espacio anular entre los electrodos contiene una solución de un electrolito alcalino. El funcionamiento del electrodo se basa en que el oxígeno se difunde en la membrana y posteriormente se reduce en el cátodo, lo que produce una diferencia de potencial proporcional a la presión parcial del oxígeno disuelto en el agua. En campo se utilizó equipo Conductronic modelo Ox 25 con detección de 0.1 y precisión \pm dígito.

Potencial de óxido-reducción (Eh).

Aunque el Eh es una medida que para efectos prácticos se debe de considerar como cualitativa, si se registra durante la etapa de campo además del pH, se tiene una herramienta adicional para caracterizar las condiciones físicas y químicas del agua subterránea. Algunas reacciones dependen del pH o del Eh por separado, sin embargo algunas otras son función de ambos parámetros. El Eh se mide con un electrodo combinado que consiste de filamento de platino y un electrodo de referencia. El elemento sensible es el filamento de platino, por lo que debe de

mantenerse limpio y pulido para evitar mediciones erróneas. El electrodo de referencia es de tipo calomel. El potencial generado por el electrodo de referencia relativo al electrodo estándar de hidrógeno varía de acuerdo con la siguiente relación

$$E_h = E_0 + E_{\text{electrodo}}$$

En donde E_h es el potencial redox de la muestra relativo al electrodo estándar de hidrógeno, E_0 es el potencial desarrollado por la muestra en el electrodo de platino y $E_{\text{electrodo}}$ es el potencial del electrodo de referencia relativo al electrodo estándar de hidrógeno.

Algunos elementos son muy sensibles a las reacciones redox (tabla 5), y algunos de estos forman especies fuertes en el agua, y como consecuencia el pH debería ser considerado para calcular las especies disueltas dominantes

El valor de E_h en campo se midió con equipo ESD (Engineered Systems & Design) modelo 64. Es preciso realizar la conversión del valor mediante la siguiente fórmula: Valor medido + $221.79 - 0.9286 \times \text{temp. } ^\circ\text{C}$.

3.2. TRABAJO DE LABORATORIO.

Para la determinación de las diferentes especies químicas a analizar se utilizaron los siguientes métodos de laboratorio:

Cationes mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+). Espectrofotometría de Absorción Atómica por Flama (FAA). Con Espectrofotómetro Perkin-Elmer AA-5100, realizado en el laboratorio analítico de Industrial Minera México

Elementos traza. Método ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry), cuantificados en ActLabs Canadá. Control de Material SLRS-4, NIST, 1640.

Tabla 7. Elementos más sensibles a las reacciones de oxidación-reducción y sus valencias más comunes (Deutsch, 1997)

| Elemento | Estado redox |
|-----------|--------------------------------|
| Arsénico | As(III), As(V) |
| Carbono | C(-IV) a C(IV) |
| Cromo | Cr(III), Cr(VI) |
| Cobre | Cu(I), Cu(II) |
| Hierro | Fe(II), Fe(III) |
| Manganeso | Mn(II), Mn(III), Mn(IV) |
| Mercurio | Hg(0), Hg(I), Hg(II) |
| Nitrógeno | N(-III), N(0), N(III), N(V) |
| Oxígeno | O(0), O(-II) |
| Selenio | Se(-II), Se(0), Se(IV), Se(VI) |
| Azufre | S(-II) a S(VI) |
| Uranio | U(IV), U(VI) |
| Vanadio | V(III), V(V) |

Arsénico. Espectroscopia de Absorción Atómica con Generador de Hidruros equipado con FIAAS (Flow injection atomic absorption spectrometer). Realizados en el Laboratorio de Toxicología de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Como control de calidad se analizó el material estándar de referencia NIST 1640, obteniendo una recuperación de As de 101 %.

Cloruros. Método Volumétrico. Realizado en el laboratorio de Geoquímica de la UASLP.

Sulfatos. Método Turbidimétrico. Laboratorio de Geoquímica de la UASLP

Nitratos. Método Colorimétrico. Laboratorio de Geoquímica de la UASLP.

Fluoruros. Ión Selectivo. Realizado en el Laboratorio Analítico de Industrial Minera México.

Sólidos Totales Disueltos.

Las características físicas, químicas y biológicas del agua son determinadas por el tipo y cantidad de partículas suspendidas y sustancias disueltas en ellas. Los sólidos disueltos totales (STD), o residuo filtrable seco, son el resultado de evaporar la fracción de la muestra que pasa a través de un filtro.

Las partículas o materia disuelta pueden entrar en el agua por sedimentación de partículas atmosféricas, drenes agrícolas, erosión del suelo, efluentes municipales e industriales o por interacciones de naturaleza hidrogeoquímica, como sucede en el caso de las aguas subterráneas.

El valor de los SDT es un indicador adecuado al tipo y uso que debe darse el agua ya que, por ejemplo, agua con elevada concentración de SDT posee sabor desagradable, mientras que una con moderada cantidad de las mismas presenta buenas propiedades organolépticas.

3.3. TRABAJO DE GABINETE.

Una vez recibidos los resultados de laboratorio, procede hacer un análisis de la confiabilidad de los resultados, para esto se hizo el balance de electroneutralidad (Freeze y Cherry, 1979) de cada una de las muestras para comprobar la exactitud del resultado, utilizando la siguiente fórmula:

$$\%error = \left(\frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} \right) \times 100 \text{ (cationes y aniones en meq/l)}$$

El 50 % de las muestras presentó un error entre el 0% y 2 %; el 45.2% mostró un error entre 2.1 % y 5 % y el restante 4.8 % con error mayor a 5 %, el mayor valor fue de 6.5%. Esto determina que los datos obtenidos de laboratorio están dentro del

rango de precisión requerida, La siguiente gráfica presenta esta información con más detalle (Figura 17).

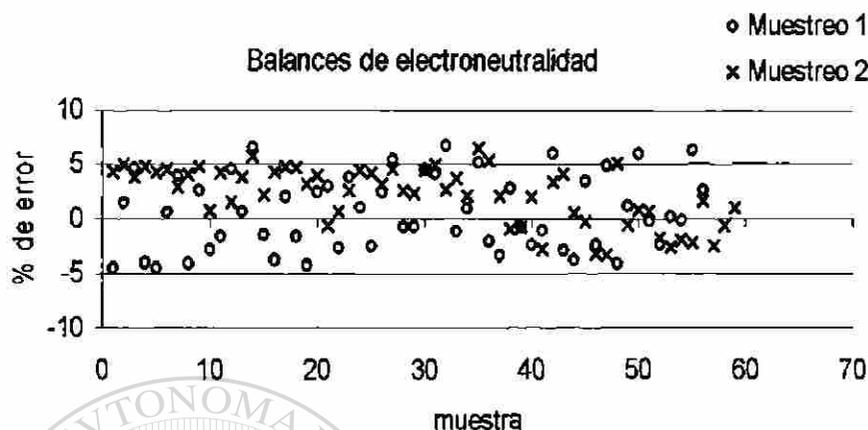


Figura 17. . Porcentaje de error de los balances de electroneutralidad para cada una de las muestras de agua para las dos etapas de muestreo.

Con los resultados anteriores se consideró que todas las muestras se presentan valores correctos por lo que no se desechó ninguna de ellas.

Se utilizaron diversos programas de cómputo para captura de información, cálculos químicos, estadísticos, elaboración de tablas, gráficas, mapas, etc. A continuación un listado de cada uno con la aplicación particular:

- Autocad Map 2000. Se utilizó para la digitalización de un plano base de referencia, donde se ubicaron geográficamente los puntos importantes en el área de estudio (poblaciones, pozos, norias, manantiales, carreteras, etc.), además para la edición de los mapas de climas, regiones y cuencas hidrológicas, vías de comunicación, ubicación geográfica del área de estudio, etc.
- Excel. Elaboración de bases de datos, preparación de archivos para otros softwares utilizados (AquaChem) y diversas gráficas como gráficas de

saturación de especies químicas disueltas en las muestras de agua subterránea, y gráficas estadísticas.

- Aqua Chem.(Waterloo Hydrogeologic, 1997. version 3.7.42) Por medio de este software se manejaron los resultados de laboratorio y algunos parámetros físicos, el cual permitió obtener balances de electroneutralidad entre otros, además de la elaboración de diagramas de Stiff, Piper, Durov, etc. Para formar familias y grupos de aguas. Se elaboró por medio de este software un archivo de entrada para manejarlo en PHREEQC.
 - PHREEQC (USGS) Este programa de cómputo que se utilizó para obtener los Índices de Saturación de diversos minerales, por medio de un archivo de entrada generado en Aqua Chem.
 - Surfer 8.0 (Golden Software, 2002). Se hizo uso de este Software para la obtención de mapas de isovalores de los parámetros más comunes (conductividad eléctrica, temperatura, pH, STD, etc.), así como de mapas de isoconcentraciones de los elementos más representativos contenidos en las muestras de agua subterránea tomadas
-
- Arc. View. Se creó con este software una base de datos completa, teniéndose el sistema a disposición para diversas visualizaciones, siendo aprovechable para posteriores trabajos, mediante la adición de datos de toda índole (hidroquímicos, geológicos, hidrodinámicos, etc.).

4. RESULTADOS

En este capítulo se indican algunos de los resultados obtenidos principalmente de los análisis químicos, presentándolos a manera de tablas simplificadas, así como los grupos de agua que se obtuvieron por medio de la utilización de diversos diagramas. También se presentan algunos mapas para la visualización de los resultados además de algunas gráficas importantes para la interpretación hidrogeoquímica. Los resultados completos se presentan en el apéndice.

En lo referente al Sistema de Información Geográfica al que se hace referencia en el capítulo 3, se cuenta con algunos mapas que se anexan a este trabajo. Se ha elaborado una base de datos con la información completa de cada uno de los aprovechamientos, tanto de datos generados en los censos así como los datos químicos y parámetros físicos de los muestreos realizados en este trabajo. Esta base de datos se podrá actualizar con información nueva que se genere en trabajos posteriores siendo una excelente herramienta de información.

En la figura 18 se indica la localización de los aprovechamientos muestreados en el área de estudio. Cada punto corresponde a un aprovechamiento con muestra de agua analizada. Los resultados de los análisis químicos se detallan más adelante.

En términos generales se observan valores uniformes de diversos parámetros como temperatura, pH, alcalinidad, etc., los valores de las determinaciones de cationes, aniones y elementos traza son los que presentan mayores fluctuaciones dentro de un rango respecto de los valores máximos y mínimos de los diversos parámetros. Las tablas 8 y 9 ilustran lo anterior.

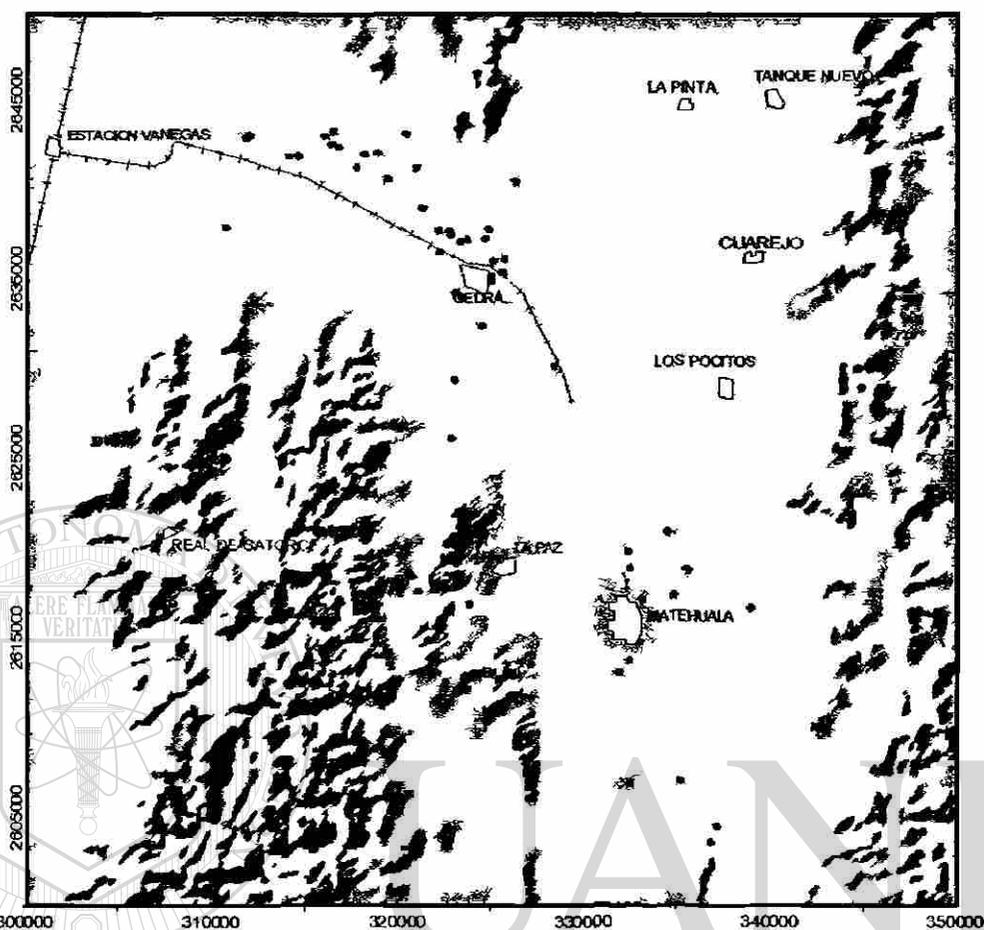


Figura 18. Localización de los aprovechamientos muestreados. ● Aprovechamiento muestreado

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

4.1 PARÁMETROS DE CAMPO

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.1.1 Temperatura

De manera general los rangos de temperatura del agua de los aprovechamientos muestreados se encuentran entre los 15.4 °C y los 29.3 °C, siendo el valor promedio 23.11 °C para todos los valores de temperatura registrados. Las muestras con las temperaturas más bajas son las pertenecientes a los manantiales ubicados en la parte sur de la Sierra de Catorce y en las cercanías a la misma al oeste de Matehuala como se puede ver en la tabla anterior, la zona cercana a la Sierra de Catorce reporta el valor medio más bajo de T (15.4°C) de las tres zonas, teniendo los demás registros del grupo similares valores de T. El valor más alto para todas las

muestras (29.3°C) se localiza en las proximidades de Vanegas (m30). De manera general la zona norte es donde se registra el valor promedio más alto (24.2°C). La zona central formada por Matehuala y sus alrededores arroja temperatura media de 22.3°C, aunque su T máxima es menor que las registradas por las zonas de Cedral y Sierra de Catorce

Tabla 8. Valores máximos, mínimos y medios de diversos parámetros separando los aprovechamientos de las zonas Cedral, Matehuala y S. de Catorce (primer muestreo).

| Limite ¹ | U.de medida | Cedral n=36 | | | Matehuala n=18 | | | S. de Catorce n=8 | | |
|----------------------------|-------------|-------------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| | | med. | máx. | Mín. | med | Máx. | Mín | med. | Máx | Mín. |
| Parámetros de campo | | | | | | | | | | |
| T (nd) | °C | 24.2 | 29.3 | 18.9 | 22.3 | 23.8 | 18.3 | 21.3 | 27 | 15.4 |
| O.D.(nd) | mg/l | 8.3 | 57.0 | 0.8 | 3.0 | 6.3 | 0.1 | 4.4 | 7.4 | 1.1 |
| pH (6.5-8.5) | — | 7.02 | 7.5 | 6.7 | 6.96 | 7.9 | 6.6 | 7.4 | 8.1 | 7.0 |
| Eh (nd) | µS/cm | 327.5 | 442.9 | 141.8 | 352.9 | 428.4 | 253.6 | 348.4 | 392.0 | 291.2 |
| STD (1000) | mg/l | 941 | 2662 | 496 | 2166 | 4110 | 1575 | 716 | 1259 | 277 |
| Aniones | | | | | | | | | | |
| HCO ₃ (nd) | mg/l | 234.4 | 375 | 164 | 223.3 | 293 | 164 | 253.9 | 316 | 210 |
| Cl (250) | mg/l | 26.5 | 364 | 6 | 173.2 | 509 | 52 | 52.9 | 164 | 2 |
| SO ₄ (400) | mg/l | 740.5 | 1843 | 270 | 1896 | 2850 | 1650 | 359.8 | 612 | 18 |
| NO ₃ -N (10) | mg/l | 2.4 | 17.5 | 0.8 | 11.5 | 43 | 1.2 | 5.7 | 10.4 | 1.6 |
| F (1.5) | mg/l | 1.02 | 1.7 | .05 | 1.4 | 1.8 | 0.2 | .52 | 1.0 | 0.1 |
| Sr (nd) | mg/l | 6.5 | 17.6 | 2.1 | 11.3 | 14.0 | 10.5 | 3.3 | 7.4 | 0.1 |
| Cationes | | | | | | | | | | |
| Ca (dureza) | mg/l | 350.1 | 742 | 164 | 645.0 | 787 | 362 | 195.4 | 236 | 91 |
| Mg (dureza) | mg/l | 27.5 | 57 | 15 | 53.8 | 111 | 30.0 | 20.1 | 49 | 1.0 |
| Na (200) | mg/l | 51.5 | 630 | 11 | 238.9 | 836 | 48 | 64.7 | 192 | 2 |
| K (nd) | mg/l | 5.0 | 30 | 2.0 | 11.3 | 19 | 6.0 | 3.4 | 4.9 | 0.5 |
| Elementos traza | | | | | | | | | | |
| B (nd) | µg/l | 159.1 | 1344 | 31.0 | 670.5 | 3003 | 121.5 | 237.0 | 929 | 9.0 |
| Fe (300) | µg/l | 457.1 | 1035 | 145.9 | 867.4 | 1556 | 403.5 | 271.6 | 893.3 | 145.9 |
| Mn (150) | µg/l | 10.0 | 157.7 | 0.1 | 16.8 | 117.5 | 1.6 | 6.9 | 1.5 | 0.2 |
| Se (nd) | µg/l | 1.9 | 7.9 | 0.0 | 6.2 | 18.8 | 0.7 | 3.7 | 11.3 | 0.2 |
| As (30) ² | µg/l | 2.7 | 7.9 | 0.6 | 2100. | 13160 | 0.3 | 2.4 | 8.56 | 0.3 |

¹ NOM-127-SSA1-1994 modificada. ²25µg/l para 2005

nd=no determinado.

Tabla 9. Valores máximos, mínimos y medios de diversos parámetros separando los aprovechamientos de las zonas Cedral, Matehuala y S. de Catorce (segundo muestreo).

| Límite ¹ | U.de medida | Cedral=32 | | | Matehuala n=19 | | | S. de Catorce n=5 | | |
|-------------------------|-------------|-----------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| | | med. | máx. | Mín. | med | Máx. | Mín | med. | Máx | Mín. |
| Parámetros de campo | | | | | | | | | | |
| T (nd) | °C | 23.12 | 29.1 | 20.7 | 22.07 | 29.1 | 19.1 | 21.85 | 25 | 19.1 |
| O.D.(nd) | mg/l | 3.27 | 6.3 | ND | 2.5 | 6.7 | 0.0 | 2.8 | 5.7 | 1.0 |
| pH (6.5-8.5) | — | 6.9 | 7.27 | 6.68 | 7.06 | 9.47 | 6.52 | 7.08 | 7.45 | 6.77 |
| Eh (nd) | µS/cm | 543.0 | 6.5 | 204.2 | 393.0 | 570.0 | 196.8 | 504.0 | 563.6 | 286.5 |
| STD (1000) | mg/l | 1087 | 3397 | 558 | 2491 | 4402 | 1725 | 1162 | 2790 | 465 |
| Aniones | | | | | | | | | | |
| HCO ₃ (nd) | mg/l | 241.8 | 307.3 | 196.2 | 203.3 | 320.4 | 65.4 | 226.5 | 255 | 183 |
| Cl (150) | mg/l | 29.3 | 365.9 | 11.8 | 154.0 | 536.4 | 28.8 | 101.8 | 160.6 | 30.5 |
| SO ₄ (400) | mg/l | 623 | 1583 | 177 | 1733 | 2599 | 1394 | 392 | 1131 | 37 |
| NO ₃ -N (10) | mg/l | 2.9 | 16.8 | 1.2 | 12.3 | 46.5 | 1.6 | 10.7 | 27.4 | 4.6 |
| F (1.5) | mg/l | 0.9 | 1.7 | ND | 1.5 | 1.8 | 0.9 | .6 | 1.0 | 0.2 |
| Sr (nd) | mg/l | 2.6 | 9.9 | .5 | 5.7 | 9.3 | 2.1 | 1.9 | 3.3 | 0.3 |
| Cationes | | | | | | | | | | |
| Ca (dureza) | mg/l | 284.5 | 667.2 | 126.8 | 641.1 | 726.2 | 528 | 161.6 | 291 | 89.6 |
| Mg (dureza) | mg/l | 24.3 | 60.3 | 12.3 | 47.5 | 105 | 22.1 | 32.9 | 111.3 | 6.1 |
| Na (200) | mg/l | 34.1 | 554.0 | 8.0 | 177.5 | 806.9 | 20.0 | 131.3 | 349.0 | 10.0 |
| K (nd) | mg/l | 3.4 | 8.4 | .05 | 13.1 | 23 | 6.8 | 3.7 | 8.1 | 1.5 |
| Elementos traza* | | | | | | | | | | |
| Ba (nd) | µg/l | 21.7 | 37.26 | 9.5 | 22.8 | 45.5 | 7.7 | 68.8 | 126.7 | 11.01 |
| Fe (300) | µg/l | 515.9 | 1869 | 165.7 | 2050 | 5771 | 339 | 337 | 776 | 0.0 |
| Mn (150) | µg/l | 2.03 | 5.5 | 0.0 | 41.0 | 293.0 | 0.0 | 00 | 0.0 | 0.0 |
| Se (nd) | µg/l | 1.28 | 4.31 | 0.0 | 14.18 | 89.65 | 0.0 | 1.9 | 4.24 | 0.0 |
| As (30) | µg/l | 3.82 | 16.4 | 0.0 | 1844 | 12310 | 4.1 | 3.9 | 12.8 | 0.0 |

¹ NOM-127-SSA1-1994 modificada.

nd=no determinado.

²25µg/l para 2005

De acuerdo a los resultados obtenidos existe cierta uniformidad en la de la temperatura en toda el área de estudio, aunque se tienen valores diferentes en pozos cercanos entre sí, se puede observar que la tendencia de la temperatura define a la parte norte, como la zona con de aprovechamientos con las temperaturas más altas;

la parte centro y sur que comprende desde Matehuala hasta Santa Lucía como la zona con las temperaturas medias. La zona con temperaturas menores está bien definida, encontrándose los valores bajos en las cercanías de la Sierra de Catorce y el sur de Matehuala (Figura 19).

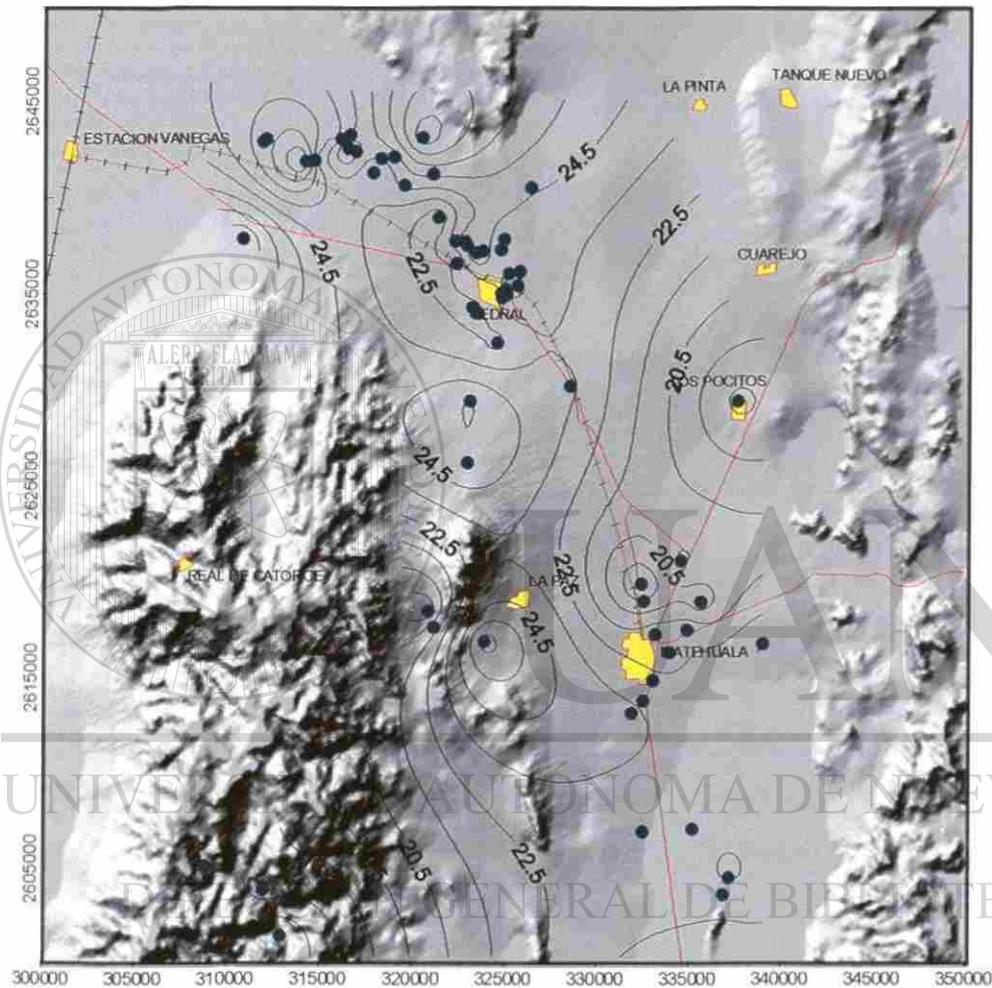


Figura 19. Mapa que muestra la distribución de la temperatura en el área de estudio.

En la figura anterior (Figura 19) se aprecia claramente las zonas con las temperaturas más bajas localizadas en la Sierra de Catorce y las más altas al norte de Cedral, aunque existen algunos puntos esporádicos con registros de temperaturas altas como es el caso de Villa de la Paz).

La siguiente tabla muestra los valores máximos y mínimos separando por tipo de aprovechamiento.

Tabla 10. Registros de las 10 muestras con las temperaturas más bajas y altas respectivamente y el tipo de aprovechamiento del cual fueron tomadas.

| Temperaturas más bajas | | | Temperaturas más altas | | |
|------------------------|------|-----------|------------------------|------|-----------|
| Muestra | T°C | Tipo | Muestra | T°C | Tipo |
| m32 | 18.7 | noria | m3 | 25.9 | pozo |
| m33 | 21.1 | pozo | m12 | 25.4 | pozo |
| m38 | 19.6 | noria | m20 | 26 | pozo |
| m42 | 18.2 | galería | m27 | 28 | pozo |
| m46 | 18.3 | pozo | m29 | 25.7 | pozo |
| m50 | 18.9 | pozo | m30 | 29.3 | pozo |
| m54 | 19.8 | galería | m34 | 27 | pozo |
| m60 | 15.4 | manantial | m35 | 25.6 | pozo |
| m61 | 18.1 | manantial | m36 | 25.4 | pozo |
| m62 | 16.5 | manantial | m43 | 28.6 | manantial |

4.1.2. pH

Los valores de pH de las muestras en su gran mayoría están cercanos a la neutralidad, teniéndose como valor máximo y valor mínimo 8.12 y 6.63 respectivamente para toda el área de estudio observándose valores promedio de 7.07 pH para todas las muestras de agua tomadas. Existen ciertas diferencias en valores de pH dividiendo el área en las zonas ya citadas (Cedral, Matehuala y Sierra de Catorce). El rango de valores de pH más alto se registra en las muestras tomadas de los aprovechamientos que rodean a la Sierra de Catorce donde se ubica el máximo general (8.12).

4.1.3. Conductividad eléctrica. Los valores de conductividad eléctrica registran los máximos en dos diferentes puntos, uno de ellos al norte de Cedral en el poblado de Cerro de Flores y en forma más general en los pozos y norias situados en la ciudad de Matehuala como lo muestra la siguiente figura (Figura 20).

La mayor parte de las muestras de agua subterránea presentaron valores altos de CE, resultando como valor máximo los 5400 $\mu\text{mohs/cm}$ y teniéndose como promedio 1644.22 $\mu\text{mohs/cm}$, registrando los valores más bajos (del orden de los 700 $\mu\text{mohs/cm}$) los aprovechamientos pertenecientes a los Servicios de Agua Potable, Saneamiento de Matehuala (SAPSAM), además de los manantiales cercanos a la Sierra de Catorce donde se tomó el valor más bajo de conductividad eléctrica (370 $\mu\text{s/cm}$).

Los valores altos de conductividad están directamente relacionados con los valores de STD y sulfatos, teniendo los tres parámetros mencionados una distribución similar a través de toda el área de estudio.

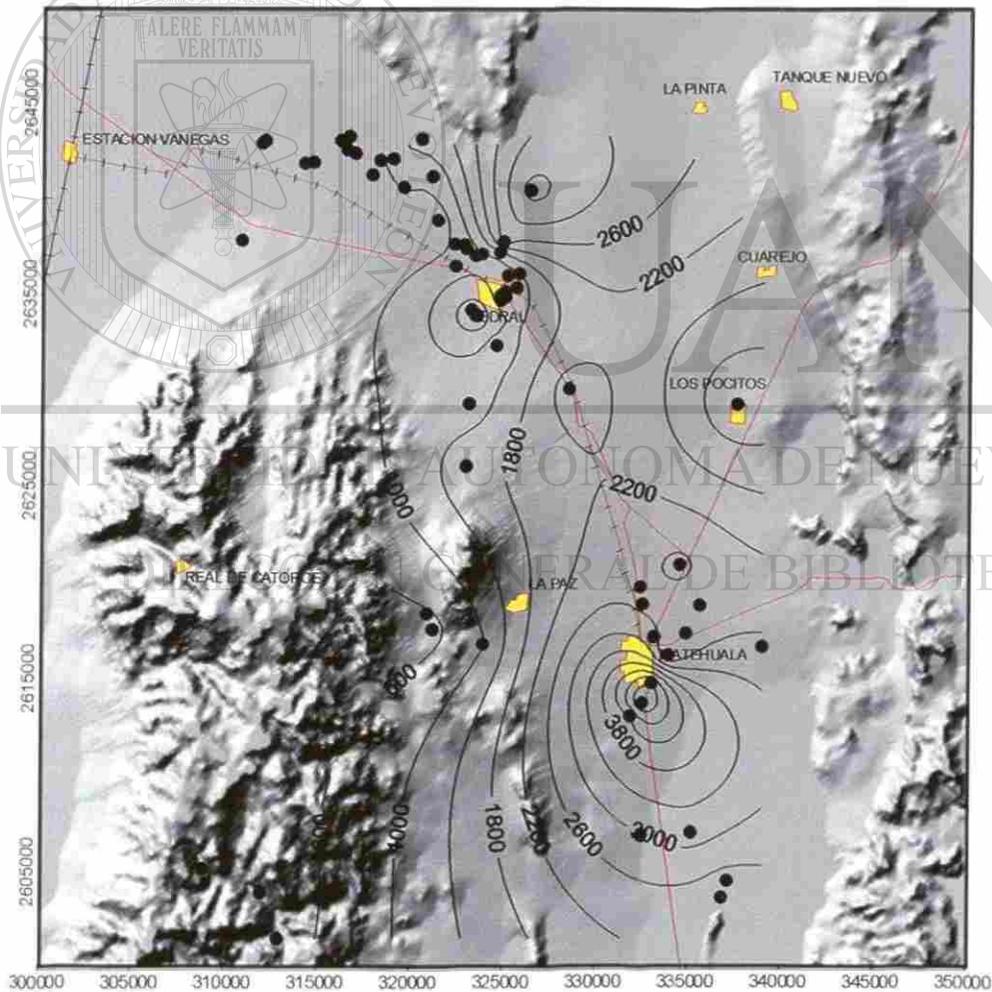


Figura 20. Distribución de la conductividad eléctrica en el área de estudio.

4.1.4. Sólidos Totales Disueltos.

Dentro de los parámetros físicos los sólidos totales disueltos (STD) representan claramente el incremento de la salinidad en toda la zona este del área de estudio (Figura 21), teniéndose los valores más bajos en las cercanías de Cedral, principalmente en los pozos operados por SAPSAM, y los manantiales localizados al sur de la Sierra de Catorce. Los valores de la totalidad de las muestras fluctúan entre los 277 mg/l STD y los 3772 mg/l. STD El valor promedio para este parámetro es de 1244 mg/l STD. En las muestras con contenidos mayores a 1000 mg/l el promedio es de 1924 mg/l STD y para las muestras con menores contenidos a 1000 mg/l es valor promedio es de 667 mg/l STD.

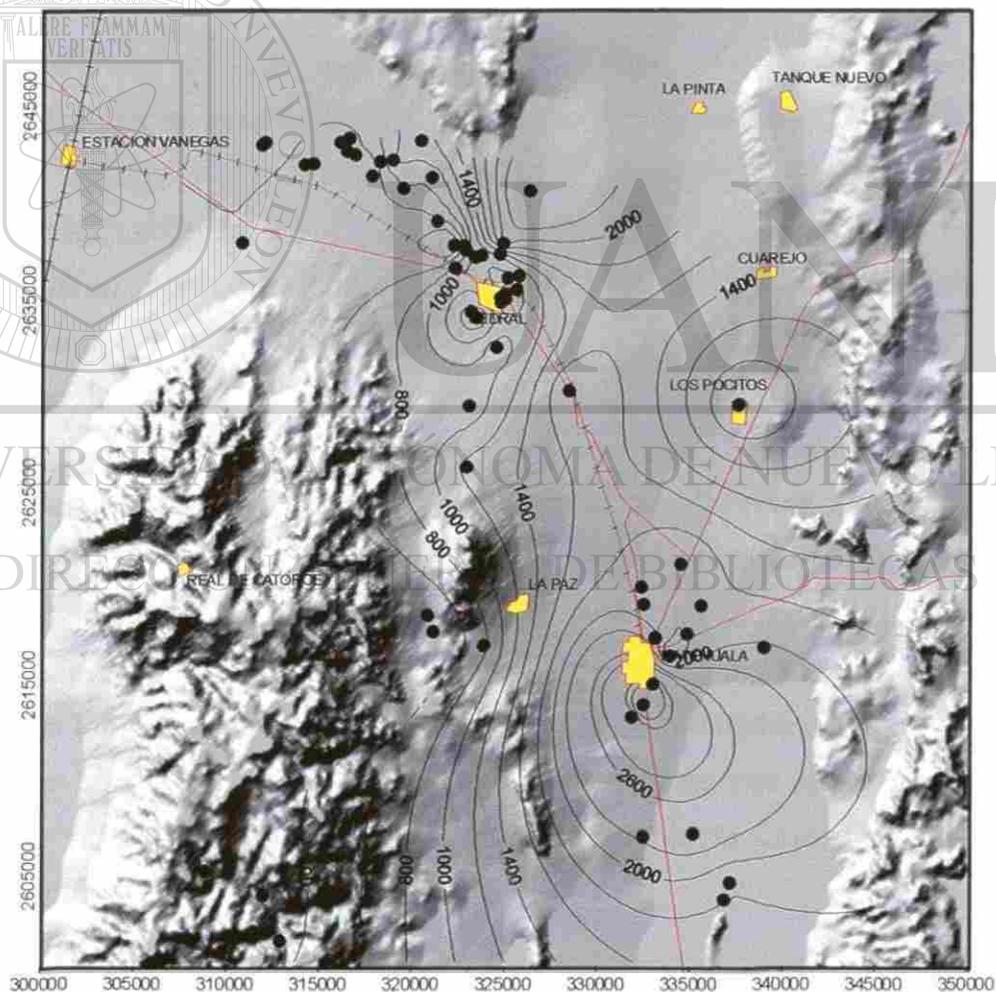


Figura 21. Mapa que muestra la distribución de STD en el área de estudio.

4.2. ELEMENTOS MAYORES

4.2.1. Aniones

4.2.1.1. Sulfatos

En términos generales para toda el área de estudio se registran valores elevados de sulfatos tomando en consideración que un número importante de aprovechamientos son utilizados con fines de abastecimiento público, sin embargo, la situación respecto a este tópico es común tomando en cuenta las características del área de estudio, sobre todo la litología, que como ya se ha establecido anteriormente se cuenta con cantidad considerable de yeso mezclado con otros minerales dentro del aluvión que conforma la litología del acuífero.

La distribución de las concentraciones de los sulfatos está hasta cierto punto bien definida, teniéndose principalmente tres zonas con diferencias significativas en los valores de sulfato. En primer lugar y hacia la parte más occidental del área, es decir, en los aprovechamientos cercanos a la Sierra de Catorce como ya se ha establecido, se encuentran aprovechamientos con las concentraciones más bajas, estas concentraciones son inferiores a los 450 mg/l que es el límite máximo permisible marcado por la Norma Mexicana de Calidad del Agua para Uso y Consumo Humano (NOM-127-SSA1-1994). La segunda zona está definida por valores más elevados de sulfatos respecto a la zona anterior (Sierra de Catorce) localizada en las inmediaciones de Cedral, presentándose valores de hasta 2049 mg/l en el primer muestreo y un promedio de 740.5 para el primer muestreo y 623 mg/l para el segundo muestreo. La tercera zona presenta los valores más elevados de sulfatos, alcanzando los 2850 mg/l como valor máximo y un promedio de 1896 mg/l y 1698 mg/l para el primer y segundo muestreo respectivamente. Los aprovechamientos con los valores más altos se encuentran principalmente en la Ciudad de Matehuala tal como se aprecia en las figuras 22 y 23.

Dentro de la zona Cedral se tienen dos puntos donde los concentraciones de sulfato se disparan fuertemente comparándolos con los aprovechamientos adyacentes por lo que sus valores resultan anómalos dentro de la zona donde se sitúan, estos son los

aprovechamientos marcados como m7 y m18 y corresponde el primero a la población de Cerro de Flores, y el segundo a la zona agrícola de Cedral donde los 1844 y los 2049 mg/l de sulfato respectivamente contrastan con los valores obtenidos en los aprovechamientos vecinos donde se tiene como promedio un valor de 740 mg/l de sulfato

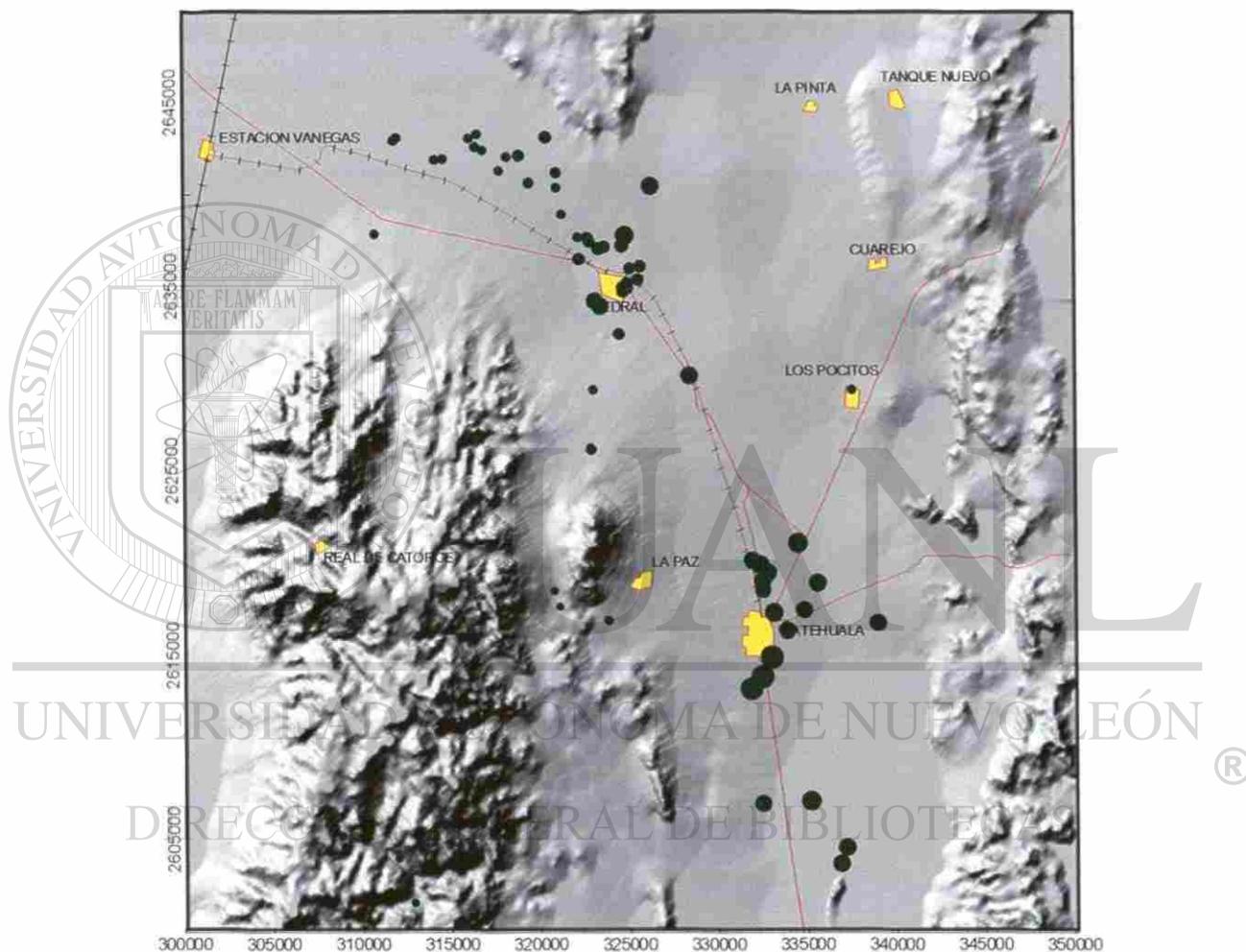


Figura 22. Concentración de sulfato. El tamaño de los círculos es proporcional a la concentración.
 18 mg/l ●
 1850mg/l ●

Como se aprecia en la figura 22, en el norte de Cedral donde se localizan los pozos operados por SAPSAM las concentraciones de sulfato se encuentran dentro del límite marcado por la norma mexicana, también se puede observar como la totalidad de las muestras tomadas en Matehuala y sus cercanías sobrepasan dicho valor, lo

que explica el por qué los pozos de la zona de Matehuala no son usados con fines potables, aunque algunos aprovechamientos particulares, principalmente norias, si funcionan como proveedores de agua potable para las familias que son propietarias de tales aprovechamientos. Los pozos con las concentraciones más altas se utilizan principalmente para propósitos agrícolas y/o pecuarios tanto en Cedral como en Matehuala, aunque esta práctica no ofrece algún peligro importante para la salud, es muy posible que los terrenos de cultivo se encuentren afectados por las altas concentraciones de este y otros compuestos.

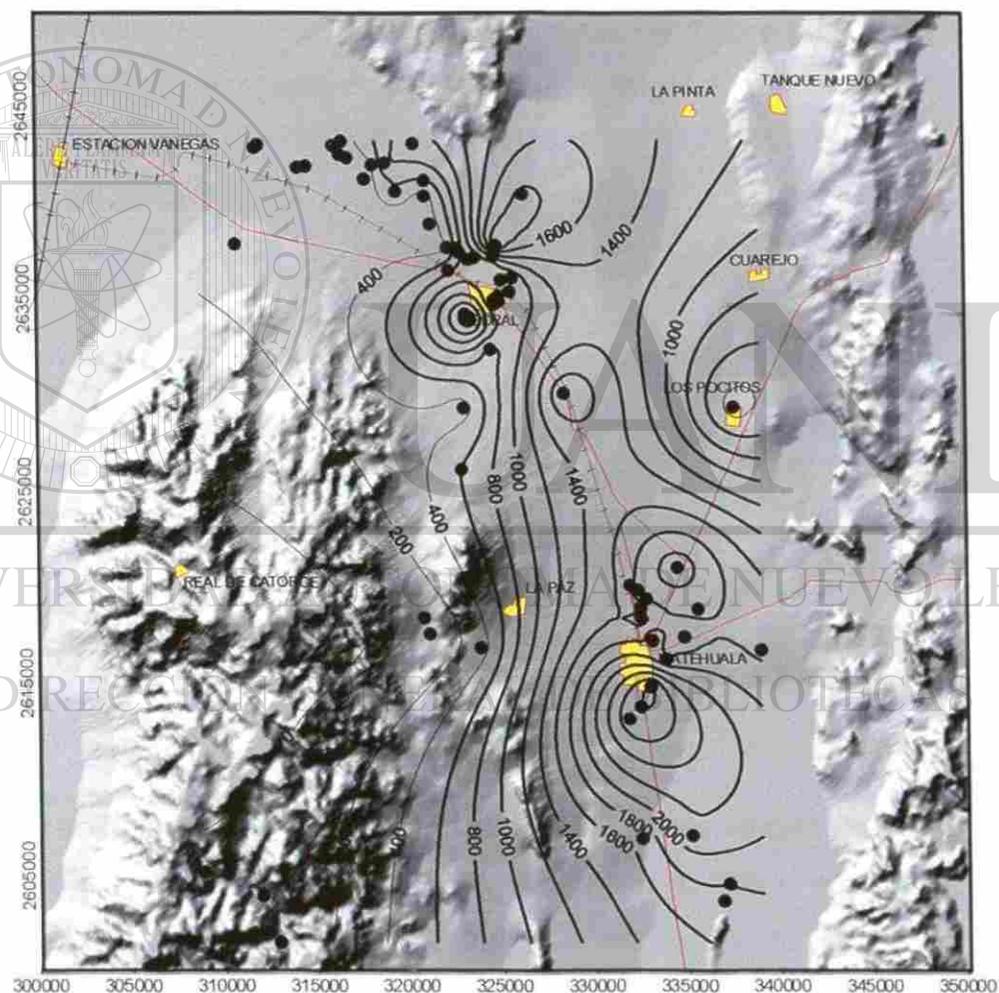


Figura 23. Mapa de isovalores de sulfatos (mg/l).

4.2.1.2. Cloruros

El comportamiento de la distribución de cloruros es relativamente uniforme de manera análoga al comportamiento de los iones expuesto con anterioridad.

Generalmente se presentan concentraciones bajas dentro de toda el área de estudio, no muestran problema con el límite establecido por la norma mexicana (250 mg/l Cl⁻). La mayor parte de los valores altos de cloruro registrados (Tabla 11) y que sobrepasan dicho límite se ubican dentro de la ciudad de Matehuala (Fig.24); el agua extraída de tales aprovechamientos (m39, m55 y m56) se destina principalmente a la agricultura y ganadería. Un aprovechamiento más en el ejido Cerro de Flores (m7) presenta concentraciones superiores a la norma como se muestra en la misma figura y se utiliza con fines agrícolas; al igual que el exceso de sulfato en la misma muestra, el alto contenido de cloruro corresponde a una situación diferente a la de las muestras tomadas de los aprovechamientos cercanos a este pozo ya que como se aprecia en el siguiente mapa, este no presenta un comportamiento esperado con relación a los pozos o norias ubicados dentro de la misma zona por lo que se considerará un caso especial.

Tabla 11. Muestras con valores de cloruro mayores a 250 mg/l

| Muestra | Cl mg/l | Tipo | Uso | Prof.m. |
|---------|---------|------|--------------|---------|
| m7 | 364 | Pozo | Agropecuario | 150 |
| m39 | 530 | Pozo | Pecuario | 120 |
| m47 | 259 | Pozo | Agrícola | 100 |
| m55 | 366 | Pozo | Agrícola | 126 |
| m56 | 508 | Pozo | Pecuario | -- |

*El límite máximo establecido por la norma mexicana es de 250 mg/l de Cl⁻.

En la tabla anterior se puede apreciar que el rango de los valores elevados de cloruro sobrepasan apenas 2 veces el límite establecido, y tomando en cuenta que estos aprovechamientos no se utilizan con fines potables, el uso al que se destinan está adecuado con su calidad.

Los valores de cloruro registrados en la segunda etapa de muestreo para las mismas sitios de la tabla 11 no sufrieron fluctuaciones considerables sino que se mantuvieron estrechamente cercanos a los presentados en la primera etapa de muestreo.

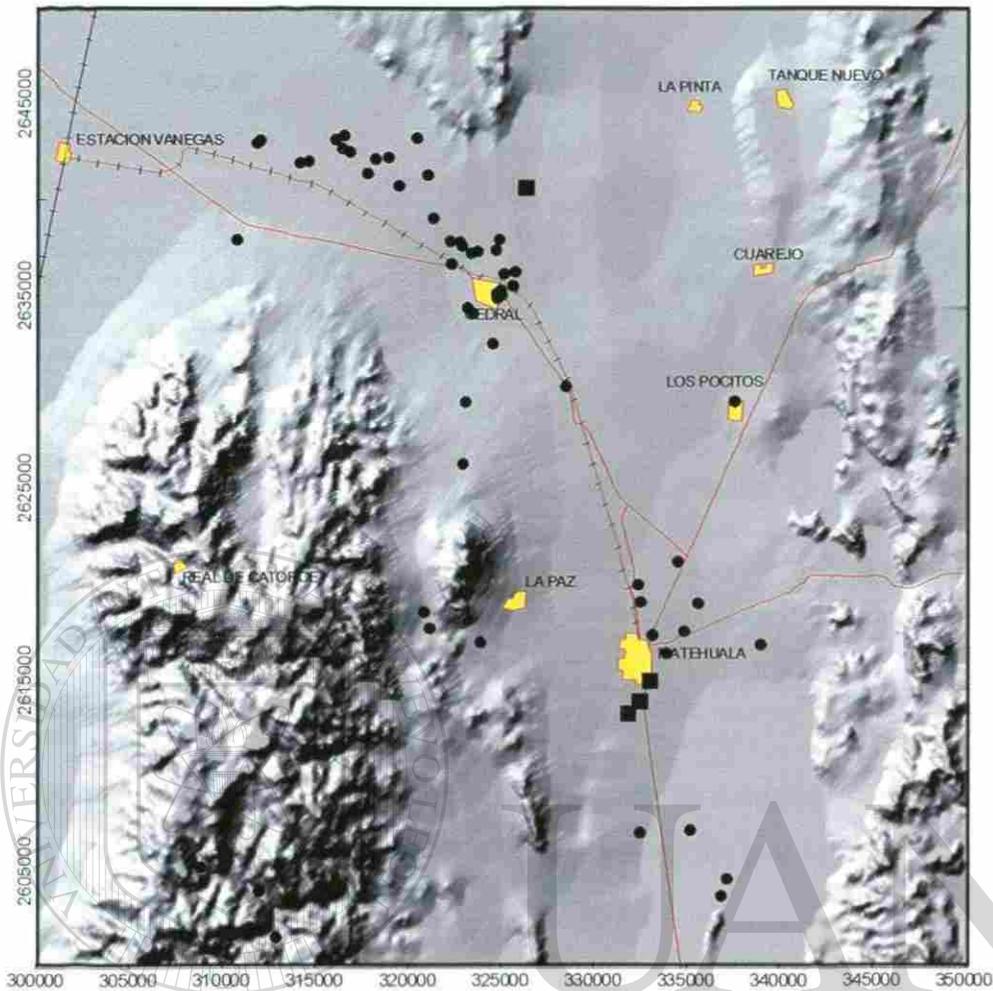


Figura 24. En el mapa los círculos muestran los aprovechamientos donde las concentraciones de cloruros están dentro del límite marcado por la norma mexicana, los cuadrados son los que sobrepasan los 250 mg/l de Cl.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.2.1.3. Nitratos (como N)

En lo que respecta a la distribución de los nitratos en toda el área de estudio, se puede decir de acuerdo a los resultados que el comportamiento es relativamente uniforme, ya que 57 de los 67 aprovechamientos muestreados (15%) presentan un valor inferior al indicado por la norma mexicana (10 mg/l de $\text{NO}_3\text{-N}$). Los valores de las concentraciones de nitrato en los aprovechamientos restantes fluctúan entre los 10.2 mg/l y los 43.0 mg/l, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 12. Muestras con valores de N-NO₃ por encima de la norma.
N-NO₃ (mg/l)

| MUESTRA | N-NO ₃ (mg/l) | | UBICACIÓN | TIPO | USO | PROF. M |
|---------|--------------------------|------|--------------|-----------|--------------|---------|
| | 1 | 2** | | | | |
| M7 | 17.5 | 16.8 | C. de Flores | Pozo | Agropecuario | 150 |
| M32 | 10.4 | 7.7 | Limonés | Manantial | Potable | — |
| M36 | 10.4 | 11.3 | B. de Arriba | Pozo | Potable | — |
| M39 | 15.8 | 33.3 | Matehuala | Pozo | Servicios | 120 |
| M47 | 18.4 | 27.4 | Piedra Bca. | Pozo | Agrícola | — |
| M55 | 27.6 | n.m | Matehuala | Pozo | Agrícola | 126 |
| M56 | 43.0 | 46.5 | Matehuala | Pozo | Servicios | — |
| M57 | 10.2 | 10.9 | Sarabia | Pozo | Pecuario | — |
| M58 | 15.5 | 15.7 | E. de Abajo | Noria | Pecuario | 24 |
| m66 | n.m | 15.9 | Ojo de Agua | Noria | Agropecuario | 20. |

El valor máximo indicado por la NOM-127-SSA1-1994. en Aguas Para uso y Consumo Humano es de 10.0 mg/l de N-NO₃.

* primer muestreo (marzo 2003).

** segundo muestreo (noviembre 2003).

Como lo refleja la tabla anterior nuevamente la muestra m7 presenta una situación que difiere mucho de las demás muestras tomadas por la misma zona ya presentada en los anteriores resultados.

En la siguiente figura (Figura 25) se muestran la localización de los aprovechamientos muestreados y la distribución de las concentraciones de nitratos, en este se puede puntualizar que la característica que presentan los puntos con valores altos de N-NO₃ es que se encuentran dispersos a través de toda el área de estudio. Esto es un hecho importante a considerar, ya que no existe una zona definida contaminada por nitrato, sino que tal dispersión es un factor de riesgo que hace vulnerable a toda la zona para que este tipo de contaminación pudiera extenderse.

Aunque la situación no presenta tintes alarmantes puesto que el valor promedio para toda la zona es de 5.5 mg/l N-NO₃ la contaminación por nitratos se hace presente principalmente en pozos y norias situados dentro de tierras de cultivo más específicamente en la parte sur del área de estudio.

Otro aspecto interesante es que en uno de los manantiales situados en la Sierra de Catorce también se encuentra afectado por la contaminación con nitratos, consistiendo su importancia en la rápida migración de cualquier agente contaminante a través del medio del que forman parte los manantiales donde el rápido tránsito del agua se vuelve un factor de riesgo para la movilización de cualquier sustancia no deseada, aunque también los cambios repentinos en las concentraciones de tales sustancias pueden resultar benéficos como es el caso, ya que como se puede observar en la tabla anterior (tabla 10) los valores pueden fluctuar entre una época de lluvias y de estiaje y en este caso la concentración de nitratos baja drásticamente, atribuyéndose esto a la mezcla de agua de mejor calidad proveniente de la lluvia.

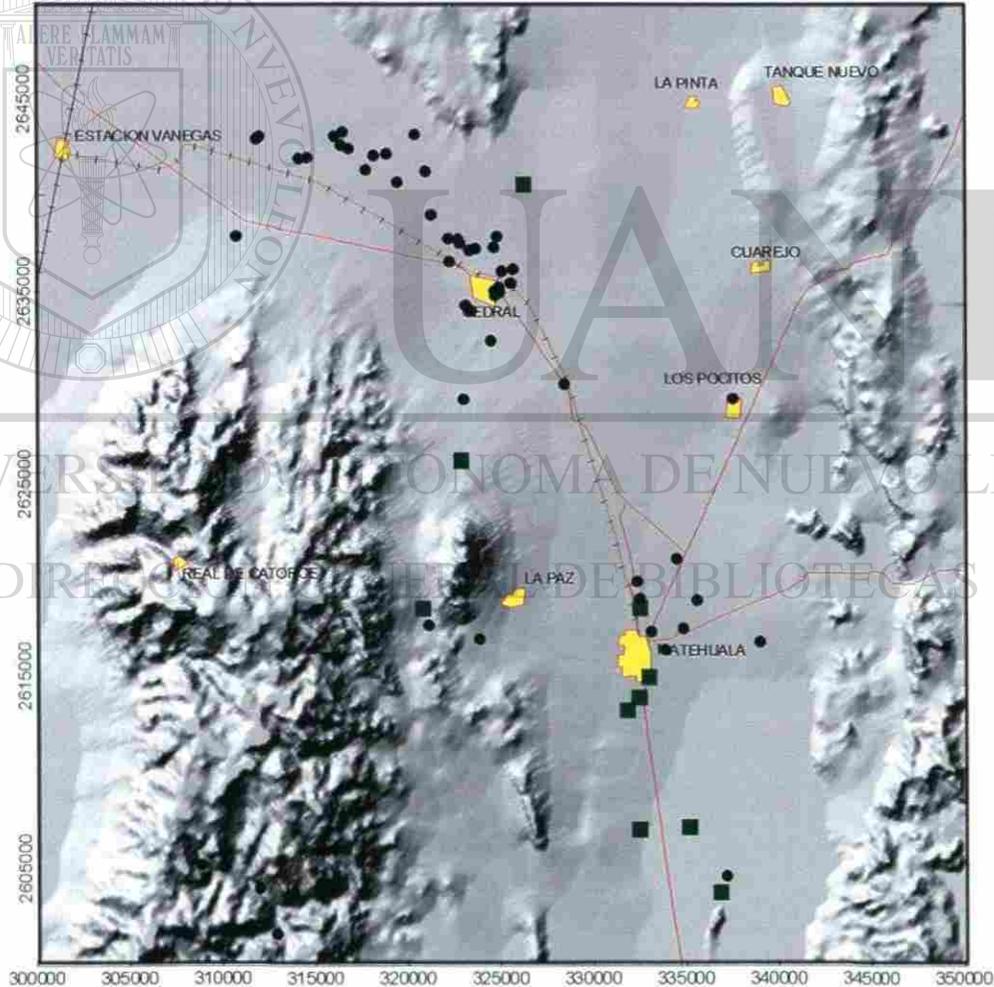


Figura 25. Localización de aprovechamientos muestreados para NO_3 . Los puntos representan valores aceptables de NO_3 . Los cuadrados aprovechamientos con valores por encima de la norma.

Durante el segundo muestreo en lo relativo a los valores de nitratos, solo se registraron algunos cambios notables en la composición de las muestras m39 y m47 pertenecientes a Matehuala y Piedrita Blanca, las cuales mostraron un incremento en el contenido de N-NO₃ (33.32 y 27.4 respectivamente), agregándose además una nueva muestra (m66) con un contenido de 15.9 mg/l N-NO₃. Las muestras restantes permanecieron con valores muy cercanos a los obtenidos en la primera etapa de muestreo.

4.2.1.4. Fluoruros

La distribución de los fluoruros en toda el área de estudio se presenta de manera uniforme, es decir, sin grandes cambios entre una zona y otra dentro de la misma área Cedral-Matehuala. Las concentraciones tienden a encontrarse en su mayoría en valores bajos, esto es, inferiores a 1.5 mg/l como lo indica la norma oficial mexicana en su límite máximo permisible. Un 28 % de las muestras analizadas presentan concentraciones altas de fluoruros,

Los valores que presentan concentraciones mayores (Tabla 13) que los constituyen 19 de las 67 muestras analizadas durante el segundo y primer muestreo fluctúan entre los 1.51 mg/l y 1.8 mg/l, encontrándose principalmente en la Ciudad de Matehuala (Figura 25).

Por medio de la tabla 12 se puede comentar que solo uno de los aprovechamientos con más de 1.5 mg/l de fluoruro se utiliza con fines potables, siendo el pozo de agua potable de Cerrito Blanco que presenta 1.59 mg/l de flúor. Como se observa el valor está casi en el límite, sobrepasando apenas 0.09 mg/l, aunque esta misma fuente de suministro ha presentado ya presencia de otros iones por arriba de la norma establecida y es necesario observarlo atentamente.

Tabla 13. Muestras con contenidos de fluoruro mayor al establecido por la norma mexicana.

| Muestra | F mg/l | Uso | Localidad | Tipo |
|---------|--------|--------------|--------------|-----------|
| m17 | 1.51 | Agrícola | Cedral | pozo |
| m20 | 1.64 | Agrícola | Cedral | pozo |
| m21 | 1.70 | Agrícola | Cedral | pozo |
| m22 | 1.60 | Agrícola | Cedral | pozo |
| m37 | 1.65 | Agropecuario | La Cruz | pozo |
| m38 | 1.64 | Servicios | Matehuala | Noria |
| m39 | 1.54 | Pecuario | Matehuala | pozo |
| m40 | 1.57 | Servicios | Matehuala | pozo |
| m41 | 1.6 | Servicios | Matehuala | pozo |
| m45 | 1.59 | Potable | Cerrito Bco. | pozo |
| m46 | 1.83 | Agrícola | Ojo de Agua | pozo |
| m52 | 1.6 | Construcción | Rancho Nvo. | Tajo |
| m54 | 1.57 | Agropecuario | Cerrito Bco. | Galería |
| m55 | 1.56 | Agropecuario | Matehuala | Pozo |
| m56 | 1.62 | Agrícola | Matehuala | Pozo |
| m57 | 1.71 | Agrícola | Sarabia | Pozo |
| m63 | 1.77 | Agropecuario | Ojo de Agua | Noria |
| m65 | 1.62 | Pecuario | Ojo de Agua | Manantial |
| m66 | 1.54 | Agrícola | Matehuala | Noria |

Lo que se puede observar en el mapa siguiente es que la tendencia del flúor a aumentar se dirige hacia el este, y hacia el sur en las cercanías con la ciudad de Matehuala donde se registran los valores más elevados ilustrados en la tabla 12. También se presenta con claridad que toda la zona donde se sitúan los pozos de agua potable operados por SAPSAM para el suministro de agua potable para la población de Matehuala presentan características favorables con relación al ion fluoruro, por lo que no existe el riesgo de sufrir las afecciones provocadas por el exceso del mismo para los habitantes de Cedral y Matehuala.

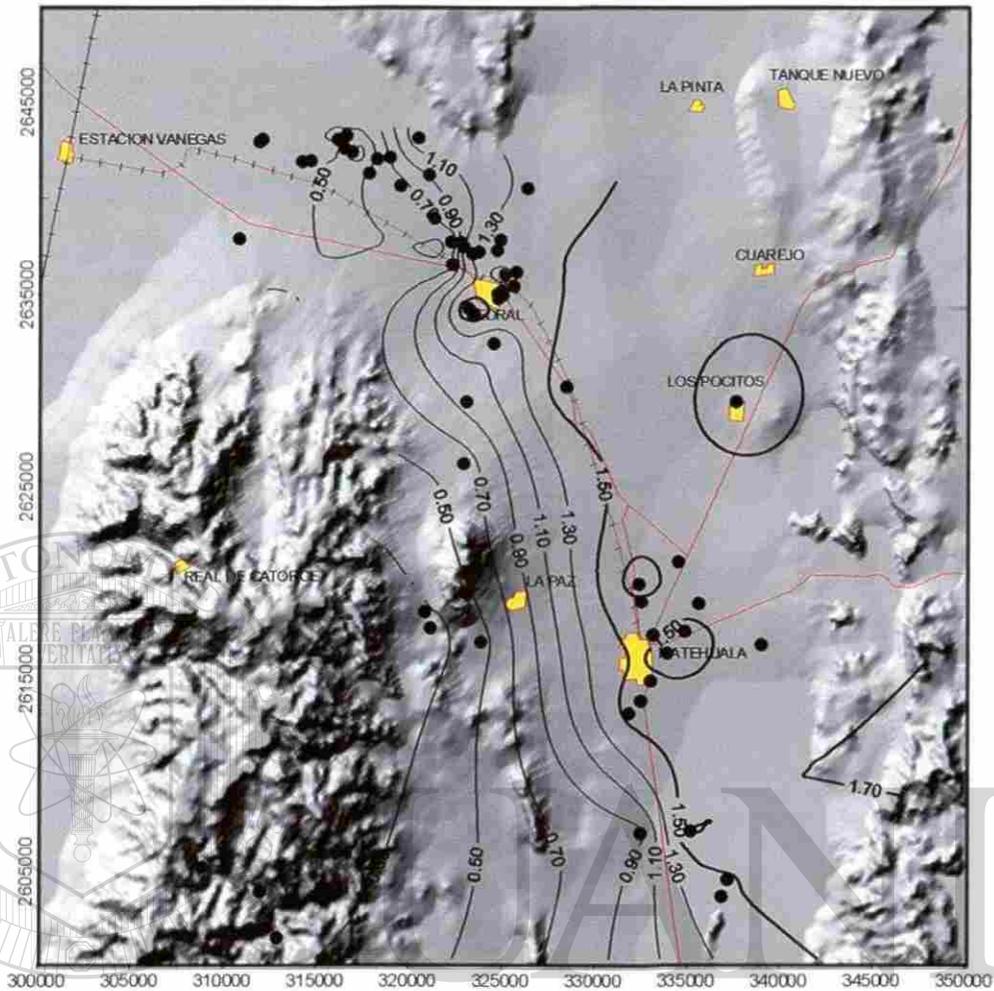


Figura 26. Comportamiento del fluoruro en los aprovechamientos muestreados.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

4.2.2. CATIONES

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.2.2.1. Sodio

La concentración de este catión se presenta en la mayoría de las muestras de agua subterránea con valores muy bajos, solamente 7 de los 67 aprovechamientos muestreados presentan valores máximos a los permitidos (200 mg/l), los valores que exceden este límite fluctúan de los 226 mg/l a los 836 mg/l. La tabla 13 describe de manera más detallada las muestras con valores altos de sodio.

Tabla 14. Muestras con contenidos de sodio mayores al límite permisible.

| MUESTRA | Na mg/l | | UBICACIÓN | TIPO | USO | PROF. M |
|---------|---------|-------|---------------|------|--------------|---------|
| | 1* | 2** | | | | |
| M7 | 630.0 | 554.0 | C de Flores | Pozo | Agropecuario | 150 |
| M39 | 814.0 | 768.0 | Matehuala | Pozo | Servicios | 120 |
| M47 | 446.0 | 349.0 | Piedra Blanca | Pozo | Agrícola | ¿ |
| M55 | 568.0 | n.m. | Matehuala | Pozo | Agrícola | 156 |
| M56 | 836.0 | 806.8 | Matehuala | Pozo | Servicios | ¿ |
| M57 | 226 | 207 | Sarabia | Pozo | Pecuario | 24 |

La Norma oficial mexicana marca un límite de 200 mg/l de Na

* primer muestreo (marzo 2003). ** segundo muestreo (noviembre 2003).

Como se puede observar en la tabla 13, los contenidos altos de sodio se limitan a la zona sur del área de estudio, a excepción de la muestra m7. El valor promedio de sodio para toda el área es de 51.5 mg/l, aunque para la zona de Matehuala el valor promedio es de 238.9 mg/l de sodio, descendiendo el valor de ambos promedios durante el segundo muestreo.

4.2.2.2. Potasio

El potasio al ser un elemento muy estable, se presenta en toda la zona con rangos de valores muy cercanos entre sí. El valor mínimo es de 0.51 mg/l y el máximo de 30.0 mg/l, más específicamente todos los valores a excepción de este último se encuentran entre los 0.51 mg/l y los 19 mg/l, teniéndose un promedio para toda la zona de 6.6 mg/l de potasio. Para la zona norte (Cedral) el valor promedio de potasio es de 5.0 mg/l (3.4) mientras que para la zona de Matehuala es de 11.3 mg/l (13.0) y para las cercanías a la Sierra de Catorce se registra un promedio de 3.4 mg/l de potasio (4.0). Durante el segundo muestreo los valores tuvieron solo pequeñas fluctuaciones (3.4, 13.0 y 4.0 mg/ de potasio para las tres zonas respectivamente como promedio).

4.2.2.3. Calcio y Magnesio

Las concentraciones de calcio y magnesio se determinaron como dureza total en términos de CaCO₃. Un total de 58 muestras del total de las muestras analizadas

presentaron valores superiores a los 500 mg/l, valor que es el límite permisible dentro de la norma mexicana. A pesar que la mayor parte del área presenta elevada dureza, la distribución de la misma tiene cierta tendencia de aumentar hacia la parte sureste de toda la zona como se aprecia en la figura 27. Los valores más bajos y que son los que se encuentran dentro del límite establecido por la norma lo constituyen los manantiales localizados al pie de la Sierra de Catorce, y algunos otros aprovechamientos cercanos a la misma, además de 2 localizados en la parte norte mientras que los más altos se encuentran dentro de la ciudad de Matehuala como se observa en la siguiente figura.

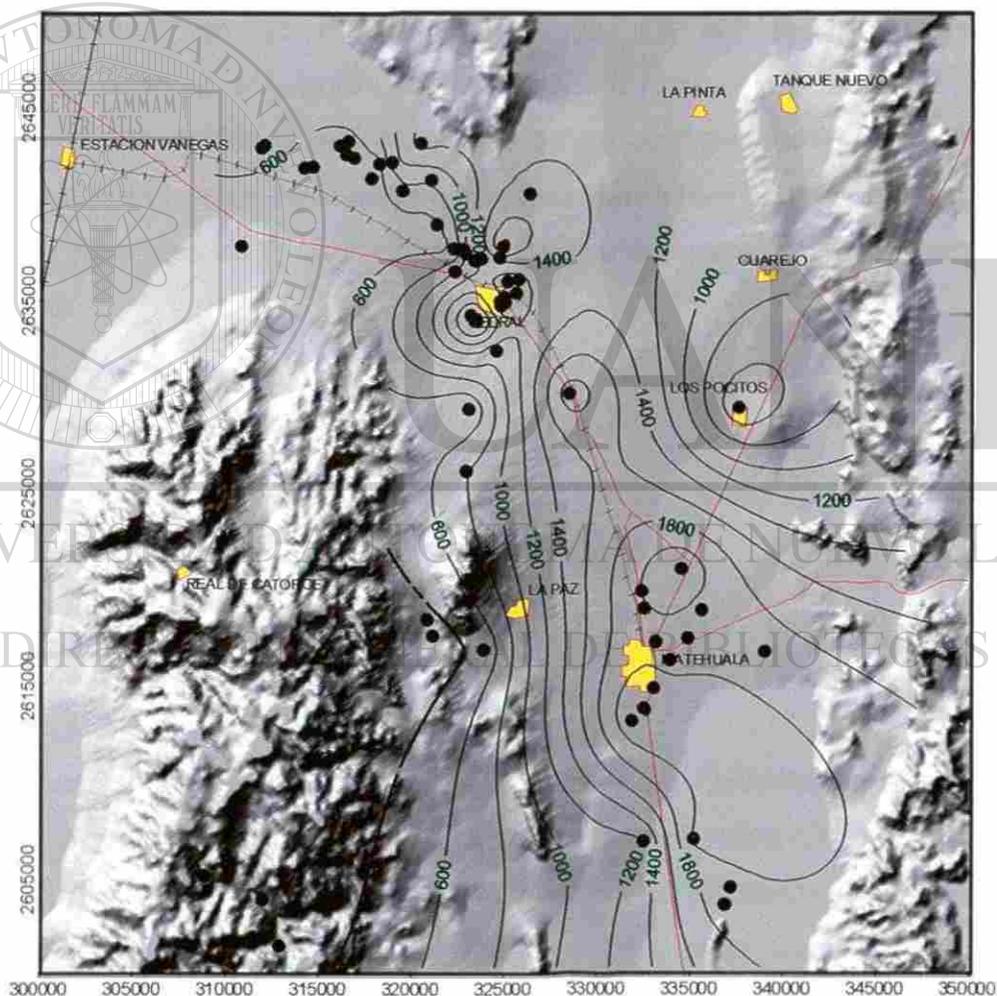


Figura 27. Distribución espacial de la dureza a través del área de estudio.

Se puede apreciar en el mapa anterior con claridad que casi la totalidad del área de estudio presenta problemas de dureza, donde los rangos de los valores son elevados, registrando para los aprovechamientos que sobrepasan la norma mexicana (500 mg/l CaCO_3) un promedio de 1312.6 mg/l CaCO_3 con valores máximos y mínimos de 2215 y 501.6 mg/l CaCO_3 respectivamente.

4.2.2.4. Estroncio

Aunque dentro de la norma mexicana no se muestran los límites permisibles de este catión, es relevante su presencia en casi la totalidad de las muestras analizadas, presentándose valores elevados tales como 17.6 mg/l, teniéndose en promedio 7.23 mg/l de estroncio en las muestras de agua. En el caso particular de esta investigación se tomó al estroncio como elemento mayor para fines del balance de electroneutralidad debido al alto contenido dentro del agua subterránea del área de estudio. Durante el segundo muestreo se presentaron importantes modificaciones en los valores obtenidos en el primer muestreo teniéndose como valor máximo 9.9 mg/l de estroncio.

4.3. GRUPOS DE AGUA

4.3.1. Diagramas de Piper

Para determinar la familia de agua a la que pertenecen los aprovechamientos muestreados se utilizó el diagrama de Piper.

Esta clasificación se basa en el contenido de cationes y aniones en meq/l colocados dentro de dos triángulos equiláteros graduados, uno para cationes y otro para aniones y en el centro de ambos un rombo donde se intersectan por medio de una línea recta los contenidos de cationes y aniones para cada muestra. La clasificación obtenida se expone en la figura 28.

Se obtuvieron de manera general 7 familias de agua que son 1) familia cálcica sulfatada, 2) familia cálcica –sulfatada bicarbonatada, 3) familia cálcica sódica-

sulfatada, 4) cálcica-bicarbonatada sulfatada, 5) cálcica sódica-sulfatada bicarbonatada, 6) cálcica-bicarbonatada y 7) sódica cálcica-sulfatada.

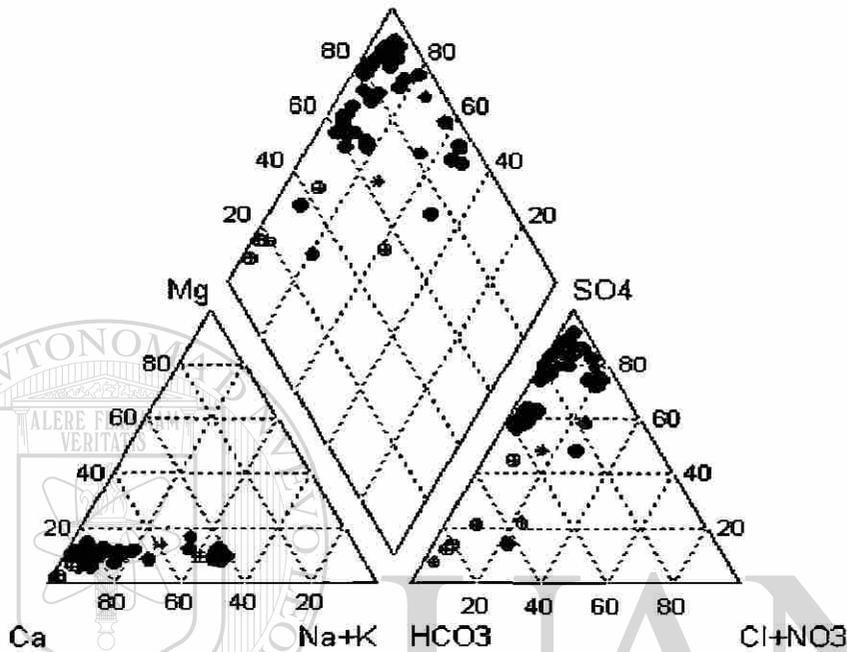


Figura 28. Clasificación de las muestras de agua por medio de diagrama de Piper.

Dentro de las 7 familias de agua identificadas, la cálcica-sulfatada es la que alberga a la mayor parte de las muestras, con un 50.7% del total. Las muestras de esta familia se dispersan en una franja de norte a sur desde Cedral hasta Matehuala y más al sur, otro grupo donde se sitúa buena parte de las muestras lo forman aguas de la familia cálcica-sulfatada; localizándose solo en la parte norte del área de estudio, específicamente en la parte oeste de Cedral, donde la mayor parte de esos aprovechamientos pertenecen a SAPSAM. Otro grupo presente lo constituyen muestras de agua de la familia cálcica sódica-sulfatada que lo conforman muestras que se diseminan en la parte norte (Cerro de Flores) y en la parte sur específicamente en Matehuala y Piedra Blanca (apéndice I).

La tabla siguiente ilustra de manera más clara la distribución de las muestras dentro de cada grupo de agua resultante (Tabla 15).

Tabla 15. Distribución de las muestras de agua subterránea en los diferentes grupos de agua (AquaChem 4.0).

| GRUPOS | MUESTRAS |
|---|---|
| Ca-SO ₄ | 1-6, 8, 9, 10, 11, 17, 19-23, 29, 30, 37, 38, 40, 41, 44-46, 49, 51-54, 57, 58, 63, 65, 66. |
| Ca-SO ₄ -HCO ₃ | 12-16, 24-28, 31, 43, 50, 59, 64, 67. |
| Ca-Na-SO ₄ | 18, 36, 39, 55 |
| Ca-HCO ₃ -SO ₄ | 32, 48 |
| Ca-HCO ₃ | 33, 60-62 |
| Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃ | 34, 42 |
| Na-Ca-SO ₄ | 7, 35, 47, 56, , |

4.3.2. Diagramas de Stiff

Se hizo una clasificación adicional tomando como base los diagramas de Stiff (Hem, 1985), donde se calculan los valores de cationes y aniones en meq/l y graficando cationes y aniones en una figura de tres ejes (Figura 29).

De acuerdo a la clasificación hecha en los Diagramas de Stiff las aguas del grupo 1 son aguas clasificadas como aguas de media salinidad para uso agrícola con los valores más bajos de conductividad eléctrica (< a 800 μ S), mientras que las muestras de agua del grupo 2 son aguas de alta salinidad con valores de conductividad eléctrica mayores a 800 μ S y las muestras de agua del grupo 3 son aguas de muy alta salinidad con valores de conductividad eléctrica mayores de 1250 μ S. La distribución de las muestras dentro de cada uno de estos grupos sigue siendo similar a las anteriores clasificaciones. Las muestras del grupo 1 se distribuyen principalmente en los aprovechamientos cercanos a la Sierra de Catorce, las muestras del grupo dos se localizan en los aprovechamientos de la parte norte del área de estudio (Cedral y Vanegas) y las muestras del grupo 3 pertenecen a los aprovechamientos de Matehuala. Esta distribución se puede observar en la figura 29.

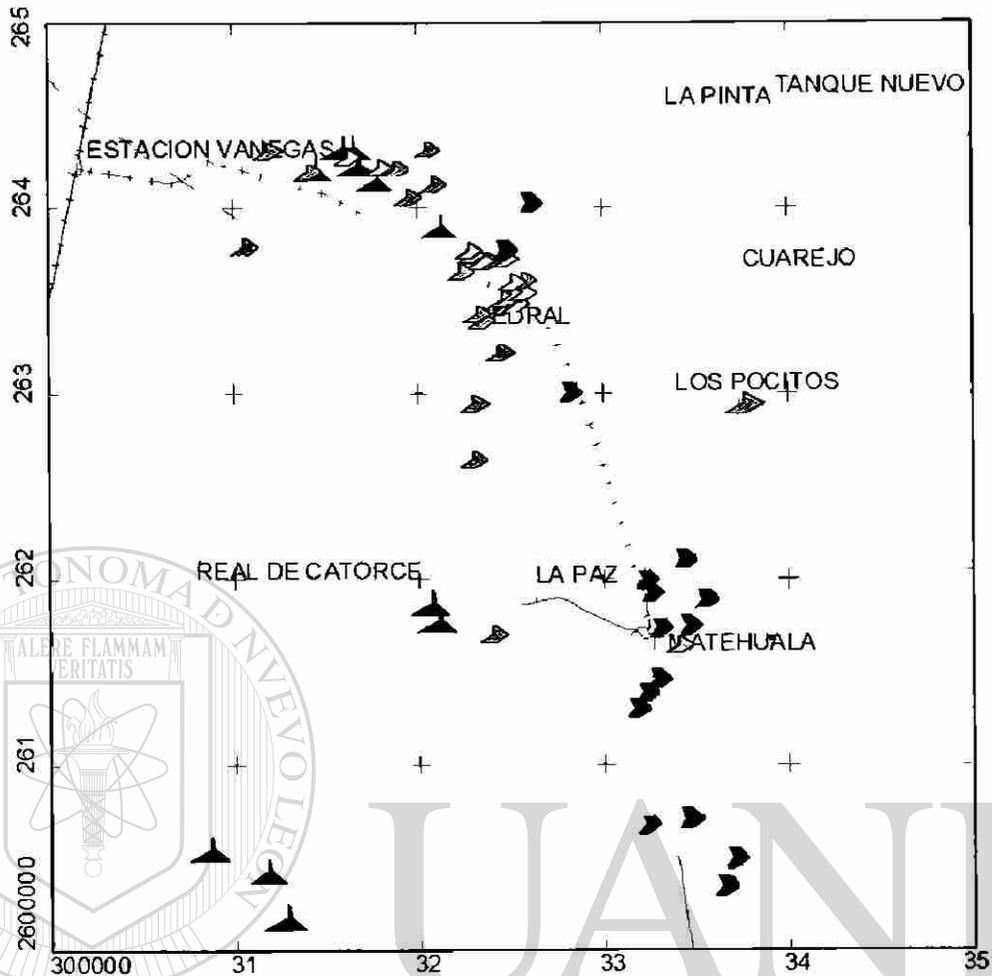


Figura 29. Clasificación por medio de Diagramas de Stiff..



4.3.3. Calidad del agua para consumo humano.

De acuerdo a los resultados de laboratorio se establece que los aprovechamientos utilizados con fines potables presentan una calidad buena salvo algunas excepciones. La siguiente tabla provee información esencial de los pozos, norias y manantiales de los que se extrae agua para consumo humano.

Tabla 16. Química de los aprovechamientos de agua para uso doméstico.

| Muestra | pH | STD mg/l | Dureza mg/l CaCO ₃ | SO ₄ mg/l | N-NO ₃ mg/l | F mg/l | As ppb | Fe ppb |
|---------------|----------------|----------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------------|-------------|------------|---------------|
| m9 | 6.85 | 996 | <u>1148.90</u> | <u>849.6</u> | 1.5 | 1.17 | 1.95 | <u>546.10</u> |
| m10 | 6.95 | 860.25 | <u>972.00</u> | <u>745.22</u> | 1.6 | 1.05 | 2.04 | <u>426.16</u> |
| m11 | 6.9 | 893.25 | <u>1038.80</u> | <u>735.36</u> | 1.5 | 1.07 | 1.86 | <u>453.04</u> |
| m12 | 7.09 | 537.75 | <u>509.90</u> | 307.2 | 3.2 | 0.05 | 2.28 | 219.70 |
| m13 | 7.1 | 527.25 | <u>512.40</u> | 302.88 | 1.8 | 0.48 | 3.40 | 234.49 |
| m14 | 7.11 | 522.75 | <u>524.90</u> | 302.88 | 1.5 | 0.44 | 2.68 | 229.34 |
| m15 | 7.07 | 543 | <u>501.60</u> | 327.84 | 1.8 | 0.54 | 1.06 | 220.66 |
| m16 | 6.94 | 663.75 | <u>687.70</u> | 392.64 | 3.7 | 0.56 | 0.85 | <u>308.90</u> |
| m24 | 6.90 | 660 | <u>650.40</u> | 360 | 1.2 | 0.58 | 0.88 | 268.56 |
| m25 | 7.14 | 495.75 | 470.90 | 269.76 | 1.5 | 0.56 | 2.68 | 188.61 |
| m26 | 7.08 | 612.75 | <u>514.00</u> | 360.00 | 1.2 | 0.53 | 4.66 | 215.27 |
| m28 | 7.20 | 775.5 | <u>739.30</u> | <u>557.76</u> | 1.3 | 0.63 | 2.05 | 224.84 |
| m32 | 7.26 | 425.25 | 362.10 | 79.96 | 10.4 | 0.28 | 1.38 | 157.14 |
| m33 | 7.02 | 378.75 | 329.80 | 43.99 | 6.8 | 0.23 | 0.50 | 157.26 |
| m34 | 7.05 | 726 | 448.80 | 300 | 9.6 | 0.42 | 0.26 | 191.22 |
| m35 | 7.30 | 855 | 393.40 | 312.5 | 6.1 | 0.97 | 2.03 | 163.75 |
| m36 | 7.02 | <u>1259.25</u> | <u>790.40</u> | <u>612.48</u> | <u>10.4</u> | 0.58 | 0.45 | <u>330.66</u> |
| m42 | 7.51 | 751.5 | 417.60 | 285 | 3.4 | 1.41 | 7.78 | 145.92 |
| m45 | 7.15 | <u>2025</u> | <u>1886.80</u> | <u>1750</u> | 6.5 | <u>1.59</u> | 18.79 | <u>895.70</u> |
| m48 | 7.65 | 281.25 | <u>573.90</u> | 50 | 2.4 | 0.30 | 10.74 | 262.40 |
| m53 | 6.68 | <u>1575</u> | <u>1909</u> | <u>1800</u> | 3.0 | 1.4 | <u>849</u> | <u>1033.3</u> |
| m59 | —nm | nm— | 284.20 | 350 | 6.5 | 0.48 | 0.80 | <u>556.21</u> |
| m60 | 8.12 | 332.25 | 284.2 | 36 | 1.6 | 0.25 | 8.56 | 218.03 |
| m61 | 7.95 | 277.5 | 231.2 | 18 | 2 | 0.13 | 1.35 | 150.01 |
| m62 | 7.62 | 363 | 315.5 | 36 | 2.4 | 0.16 | 1.99 | 183.28 |
| Limite | 6.5-8.5 | 1000 | 500 | 400 | 10 | 1.5 | 30 | 300 |

nm=no medido.

Como lo muestra la tabla anterior, la mayoría de los pozos que se utilizan con fines domésticos cumplen con las normas nacionales de calidad del agua para uso y consumo humano con respecto a parámetros como el pH que se encuentra entre los 6.5 y los 8.5 establecidos por la norma mexicana. Igualmente la mayoría de las muestras de estos aprovechamientos presentan valores de sólidos totales disueltos que se encuentran dentro del rango marcado por la misma norma (1000 mg/l). Sin embargo más del 50% de las fuentes de suministro de agua potable sobrepasan los

500 mg/l de CaCO_3 expresados como dureza; en lo relativo al contenido de sulfatos también existen algunos pozos con registros mayores de los 450 mg/l. los pozos presentan concentraciones de arsénico mayores a los 10 ppb que es el límite marcado por la OMS para este elemento traza, estos son los pozos de la comunidad de Cerrito Blanco y de Pastoriza que es la comunidad localizada en el límite sur del área de estudio, no obstante que el agua de este aprovechamiento presenta excelentes condiciones de dureza, STD y sulfatos. Las concentraciones de fierro sobrepasan el valor de 300 mg/l como límite para uso potable, estos son los pozos Cedral (m9, m10, m11, m16 y m59), Cerrito Blanco (m45) y Blanco de Arriba (m36).

4.4. Elementos Traza

Los elementos traza son definidos como aquellos elementos que generalmente ocurren en el agua a concentraciones de 1 mg/l o menores. Aquellos analizados en este trabajo son: Li, B, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Cd, Sb, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sa, Eu, Gd, Dy, Er, Yb, Re, Tl, Th, Pb y U. Sin embargo no se detectaron valores por encima del límite de detección del método ICP-MS utilizado, por lo que se realizó una depuración conservando únicamente aquellos que presentaron valores.

Otro elemento traza importante dados los elevados contenidos dentro de las muestras de agua analizadas es el Fe, cuyos contenidos registran un promedio de 548.4 ppb en toda el área de estudio. Las muestras que registran valores mayores a 300 ppb, que es el límite establecido por la SSA (NOM-SSA1-127- 1994), promedian en 724 ppb, mientras que las muestras con valores menores a este límite máximo se tienen en un promedio de 206 ppb. La zona de Cedral presenta un valor promedio de 457 ppb, mientras que la parte sur perteneciente a Matehuala casi dobla ese valor (867.4 ppb), la zona con los valores más bajos es la perteneciente a las cercanías de la Sierra de Catorce con un valor de Fe promedio de 271.6 ppb.

De las 41 muestras que rebasan el límite permitido por la norma mexicana solo 7 de estas son usadas con fines potables (Tabla 17).

Tabla 17. Muestras de agua con contenidos de Fe mayores a 300 mg/l usados con fines potables.

| Muestra | Fe (ppb) | pH | Eh (μ S/cm) | localidad | tipo |
|---------|----------|------|------------------|----------------|------|
| m9 | 546 | 6.9 | 303.8 | Cedral | Pozo |
| m10 | 425 | 7.0 | 346.5 | Cedral | Pozo |
| m11 | 453 | 6.9 | 354.3 | Cedral | Pozo |
| m16 | 309 | 6.9 | 344.4 | Vanegas | Pozo |
| m36 | 331 | 7.02 | 291.2 | Bco. de Arriba | Pozo |
| m45 | 896 | 7.15 | 381.9 | Cerrito Bco. | Pozo |
| m59 | 556 | n.m. | n.m. | Cedral | Pozo |

nm = no medido en campo.

4.5. ARSÉNICO

Otro elemento traza que se encontró en elevadas concentraciones en algunos de los sitios muestreados, y que debido a su reconocida toxicidad es de gran importancia para efectos de la interpretación hidrogeoquímica, el arsénico. Este elemento se presenta en concentraciones que abarcan desde los 0.26 ppb hasta 13 160 ppb, con un promedio de 545 ppb.

De las 67 muestras de agua subterránea tomadas en la zona Cedral-Matehuala se obtuvieron algunos puntos (Tablas 18 y 19) con concentraciones de arsénico superiores a 0.03 mg/l o 30 ppb que es el límite establecido por la norma mexicana (NOM-127-SSA1-1994).

De acuerdo a los resultados arrojados en las últimas investigaciones llevadas a cabo por diversos científicos (Smedley y Kinniburgh, 2002) la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la USEPA (United States Environmental Protection Agency) han establecido un límite máximo permisible para agua de uso y consumo humano con un valor de 10 ppb, este parámetro junto con la norma oficial mexicana (NOM-127-SSA-1994) serán considerados para la determinación del grado de contaminación de los aprovechamientos muestreados en este trabajo.

Los resultados obtenidos se detallan en las siguientes tablas:

Tabla 18. Muestras que presentan contenidos elevados de arsénico, sobrepasando la NOM-127-SSA-1994.

| Muestra | As ppb | | Lugar | Uso |
|---------|--------------|-------------|----------------|--------------|
| | 1er muestreo | 2° muestreo | | |
| m 38 | 66 | 131 | Matehuala | Agrícola |
| m40 | 13160 | 12310 | Matehuala | Servicios |
| m41 | 9480 | 9510 | Matehuala | Servicios |
| m44 | 834 | 540 | Matehuala | Servicios |
| m46 | 391 | 292 | Ojo de Agua | Pecuario |
| m49 | 582 | 115 | Santa Lucía | Agrícola |
| m52 | 54 | 115 | Rancho Nuevo | Construcción |
| m53 | 849 | 1973 | Matehuala | Doméstico |
| m54 | 8162 | 4366 | Cerrito Blanco | Agropecuario |
| m63 | nm | 69 | Ojo de Agua | Agropecuario |
| M66 | nm | 107 | Matehuala | Agrícola |

nm No muestreado

Se toma como base la NOM-127-SSA-1994 (30 µg/l)

Comparando con la norma de la OMS y USEPA habrá que añadir 7 muestras más

Tabla 19. muestras que rebasan el límite máximo de arsénico en agua para uso y consumo humano establecido por la OMS.

| Muestra | As ppb | | Lugar | Uso |
|---------|--------------|-------------|----------------|--------------|
| | 1er muestreo | 2° muestreo | | |
| m21 | <10 | 13 | Cedral | Agrícola |
| m37 | <10 | 13 | La Cruz | Agropecuario |
| m39 | 10.08 | 13 | Matehuala | Pecuario |
| m45 | 19 | 10 | Cerrito Blanco | Potable |
| m48 | 11 | nm | Pastoriza | Potable |
| m57 | 17 | <10 | Sarabia | Agrícola |
| m58 | 18 | 17 | E. de Abajo | Agrícola |
| m65 | nm | 23 | Ojo de Agua | Pecuario |

nm- No muestreado

La norma mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece como límite máximo 30 µg As/L.

El límite máximo de As establecido por la OMS es 10 µg As/L.

Como se aprecia en las tablas anteriores, las muestras con contenidos altos se encuentran distribuidas dentro de un amplio rango, encontrándose un valor máximo (13160 ppb) excesivamente elevado y un valor mínimo de 54.40 ppb, todos los demás valores están ampliamente distribuidos dentro de este rango. El principal uso

a que se le destina al agua extraída de estos aprovechamientos es a la actividad agrícola, además de que algunos pozos son de uso privado, por lo cual el uso que se le da al agua extraída de estos es muy variado, aprovechándose para uso doméstico incluso llegándose a ingerir en algunos casos, o bien como agua para riego de huertos familiares, etc.

El valor promedio de las muestras con contenidos bajos (menores a 10 ppb) de arsénico es de 3 ppb, mientras que para las muestras con valores elevados de arsénico el promedio es de 2464 ppb.

De acuerdo con la distribución espacial de la concentración de arsénico (Figura 30), es en la parte sur del área donde se localizan los aprovechamientos que presentan altas concentraciones de arsénico, principalmente en la ciudad de Matehuala en la parte este es donde se tienen los valores más altos de arsénico, aunque hacia el sur de la misma ciudad también se encuentran aprovechamientos con contenidos significativos de arsénico (Santa Lucía, Pastoriza y Encarnación de Abajo) que rebasan las 10 ppb

Durante el segundo muestreo algunos de los puntos con altos contenidos de arsénico registraron cambios importantes en la concentración del mismo, como se puede apreciar en las tablas 18 y 19. Para este segundo muestreo se obtuvo un promedio de 1846 ppb aunque dadas las cantidades tan elevadas, este cambio en las concentraciones desde un enfoque general no es tan alentador como en un principio lo parece, ya que los valores máximos registrados durante el primer muestreo solo registran un decremento de 6.5 %.

Otro aspecto relevante a considerar es la profundidad de los aprovechamientos con altos contenidos de arsénico; en todos ellos la profundidad al nivel estático no es mayor a 20 m, la profundidad total de los pozos es variada, aunque por lo regular dentro de la ciudad de Matehuala los aprovechamientos no son muy profundos, ya que muchos de ellos en inicio fueron norias excavadas manualmente. Para los pozos

situados en la ciudad de Matehuala se midieron profundidades máximas al nivel estático de 19.8 m.

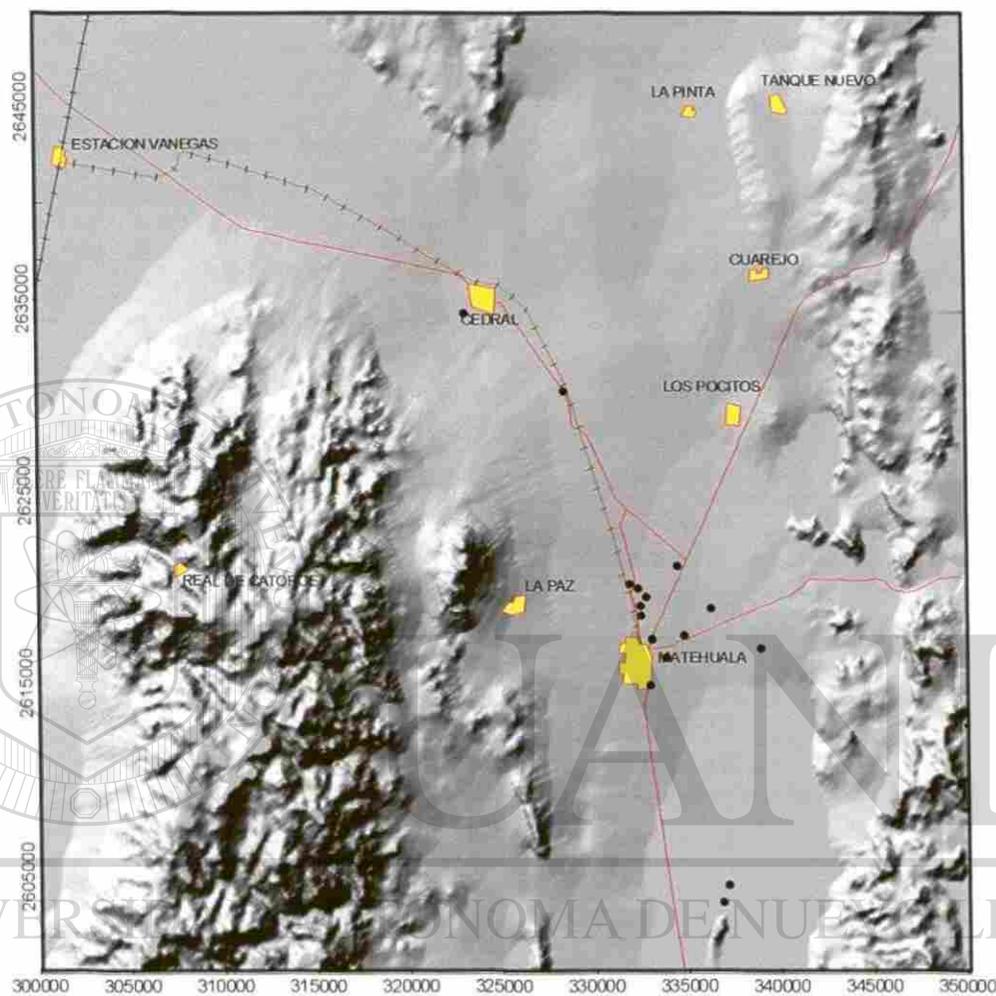


Figura 30. Mapa donde se pueden observar los puntos donde se tienen concentraciones de arsénico superiores al límite establecido por la NOM-127-SSA1-1994.

La especiación calculada (Tabla 20) para diferentes especies iónicas, se observa que la especie dominante de es el As(V), que es la especie de menor toxicidad, aunque como se menciona en el primer capítulo una vez ingerida cualquiera de las dos especies, podría repercutir en similares niveles toxicológicos.

Tabla 20. Especies de arsénico dominantes en las muestras que manifestan contaminación (valores obtenidos por medio del programa PHREEQC).

| muestra | As (III) mmol(eq)/L | As (V) mmol(eq)/L |
|---------|------------------------|----------------------|
| m21 | 1.39E-09 | 7.68E-13 |
| m37 | 2.47E-18 | 3.01E-13 |
| m39 | 3.40E-19 | 1.05E-12 |
| m40 | 2.74E-17 | 2.38E-09 |
| m41 | 9.61E-17 | 1.53E-09 |
| m44 | 1.33E-17 | 1.24E-10 |
| m45 | 2.87E-21 | 4.54E-13 |
| m46 | 3.86E-17 | 1.67E-11 |
| m48 | 4.17E-19 | 4.59E-14 |
| m49 | 2.44E-18 | 7.41E-11 |
| m52 | 4.23E-23 | 4.68E-14 |
| m53 | 3.91E-15 | 1.29E-10 |
| m54 | 1.15E-20 | 8.55E-11 |
| m57 | 6.93E-18 | 1.38E-13 |
| m58 | 7.70E-21 | 1.14E-12 |
| m63 | 3.45E-17 | 1.62E-12 |
| m65 | 2.97E-18 | 4.22E-13 |
| m66 | 3.36E-16 | 1.35E-11 |

4.6. Índices de saturación de minerales.

Un mineral en contacto con el agua subterránea representa un sistema geoquímico que consiste de una fase sólida y una fase en solución. Si la solución inicialmente no contiene ninguno de los componentes del mineral, entonces existe desequilibrio entre las fases y el mineral disolverá para proveer componentes a la solución.

Los cálculos de equilibrio mineral para una muestra de agua subterránea son de utilidad para predecir la presencia de minerales reactivos en el sistema utilizando los índices de saturación para ello. Debido a incertidumbres inherentes a los cálculos de los índices de saturación (IS), en diversos trabajos se ha considerado un rango de valores para índices de saturación cercano a cero dentro de la zona de equilibrio. Si $= \pm(5\%) (\log K_{eq})$.

Si el índice de saturación para un mineral calculado es menor que cero, el agua está subsaturada con respecto a ese mineral, esto significa que el mineral no puede precipitar de la solución y deberá disolverse si está presente dentro de la solución para alcanzar el equilibrio. En caso de sobresaturación (cuando el índice de saturación es mayor a cero) entonces el mineral no es reactivo. Si el mineral fuera reactivo, este limitaría la concentración de sus constituyentes a valores que producirían un índice de saturación cercano a cero. En esto juega un papel importante las constantes de equilibrio (K_{eq}), ya que es necesario obtener los valores de la misma de las reacciones más importantes para el posterior cálculo del índice de saturación en el agua con relación a diversos minerales.

La constante de equilibrio expresa la relación constante de las actividades de los reactantes presentes cuando las velocidades de reacción se han igualado.

La constante de equilibrio se define en términos de actividades (concentraciones activas), la forma más común de expresarla es mediante la concentración molar de las especies en solución.

$$K_{eq} = \frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_D^d} \quad \begin{array}{l} \text{(Actividades de los productos)} \\ \text{(Actividades de los reactantes)} \end{array}$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El índice de saturación se utiliza para determinar el estado de equilibrio de la solución con relación a diversos minerales:

$$IS = \log \frac{(PAI)}{(K_{eq})} \quad \begin{array}{l} \text{Producto de actividad iónica} \\ \text{Constante de equilibrio} \end{array}$$

El producto de actividad iónica se obtiene: (Ejemplo calcita)



Las siguientes figuras que muestran los valores de saturación para diversos minerales obtenidos por medio de PRHEEQC indican el grado de saturación de los minerales más comunes y que están presentes en el sistema acuífero de acuerdo a los datos termodinámicos y químicos introducidos al programa para los diversos cálculos.

4.6.1 Calcita

Como se observa en la figura siguiente (Figura 31), la mayoría de las muestras analizadas se encuentran en equilibrio con respecto a la calcita. Las muestras del grupo 3 son las que se encuentran en su totalidad dentro de la franja de equilibrio limitada por las dos líneas discontinuas que indican los límites superior e inferior para el estado de equilibrio respectivamente; algunas muestras del grupo 2 (manantiales de la Sierra de Catorce y pozo del límite sur del área de estudio) se encuentran en estado de supersaturación, por lo que se esperará que en la zona donde se ubican geográficamente se presente precipitación de calcita.

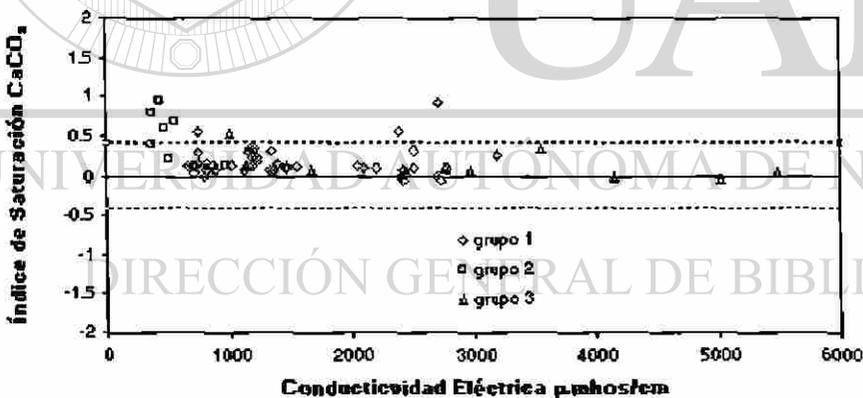


Figura 31. . Saturación del agua subterránea con respecto a la calcita.

4.6.2. Yeso

La gráfica de saturación de yeso (Figura 32) deja ver claramente la tendencia del agua subterránea de alcanzar el equilibrio a través del tránsito del flujo, ya que al inicio de su recorrido, expuesto por las muestras de los grupos 1 y 2 principalmente los cuales tienen los valores más bajo de conductividad eléctrica se encuentran

subsaturadas, y conforme avanza en la dirección de flujo se va enriqueciendo, hasta alcanzar el equilibrio, que es la zona donde se sitúan las muestras del grupo 3 y esto está definido principalmente por la profundidad de algunos pozos, ya que comparten la característica de ser mayores a los 100 m.

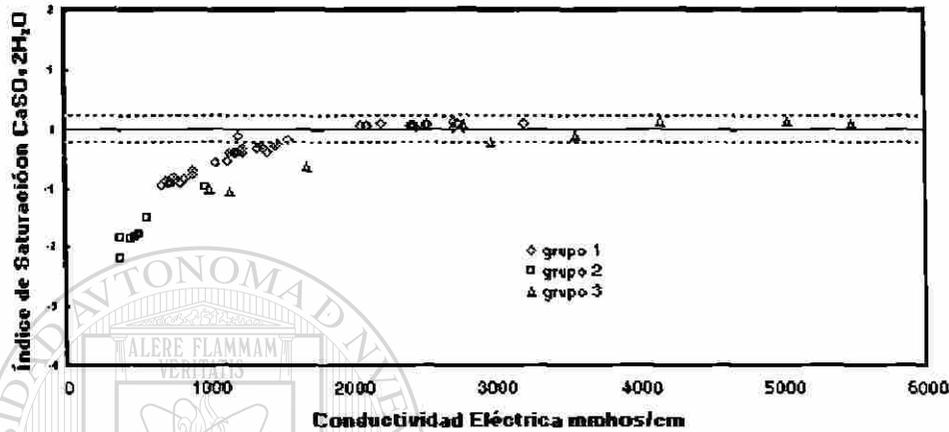


Figura 32. Saturación con respecto al yeso.

4.6.3. Siderita

La siderita como se puede ver en la figura siguiente (Figura 33) presenta subsaturación en toda la el área de estudio, a pesar de los altos valores de fierro registrados a través de una amplia zona, este mineral que se considera un control de la solubilidad del yeso se encuentra en valores negativos.

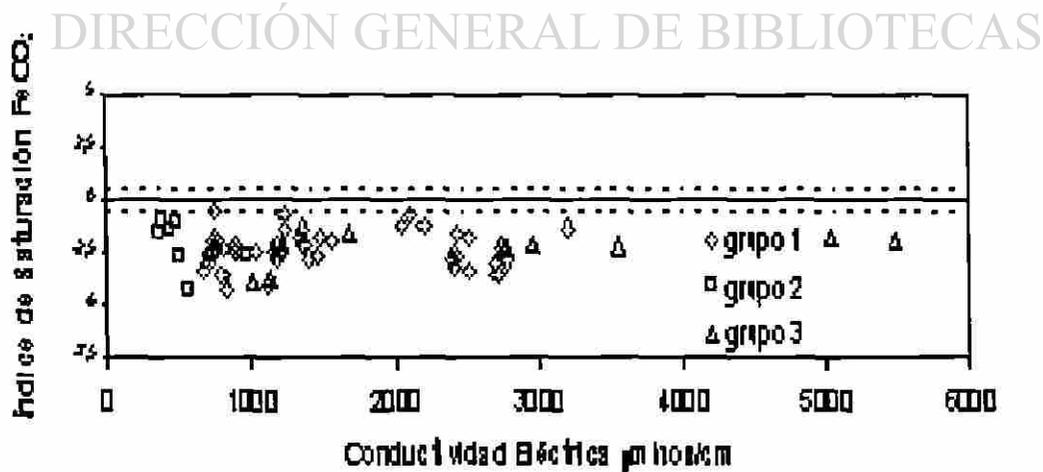


Figura 33. Saturación de siderita.

4.6.4. Fluorita

De acuerdo a los datos obtenidos por medio del software PHREEQC para los índices de saturación, el contenido de fluorita en el agua subterránea del área de estudio se encuentra una zona cercana al equilibrio y otra en equilibrio como se observa en la figura 34. Las muestras de agua del grupo 2 muestran evidente subsaturación, al igual que algunas de las muestras pertenecientes al grupo mientras que la mayoría de las muestras que conforman el grupo 3 se sitúan dentro de la franja de equilibrio.

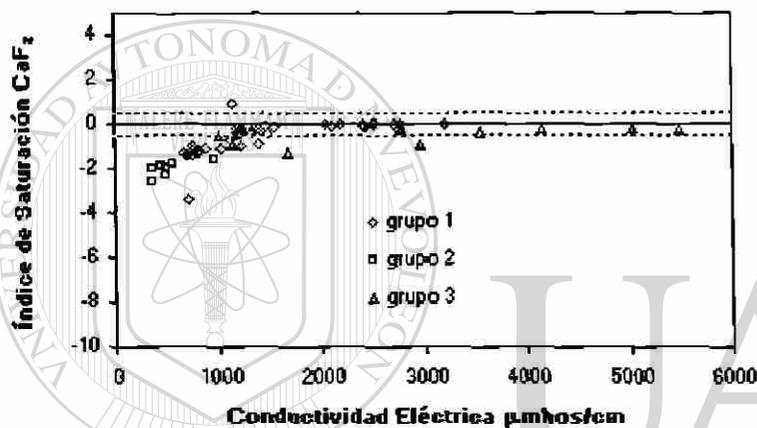


Figura 34. Saturación de la fluorita.

4.6.5. Estroncianita

En relación con la estroncianita, el agua subterránea del área de estudio en su totalidad se encuentra subsaturada con respecto a la misma, los altos contenidos de estroncio presentes en el agua subterránea del acuífero de Cedral-Matehuala, continuarán incrementando hasta alcanzar el equilibrio si aún hay disponibilidad en la fase sólida

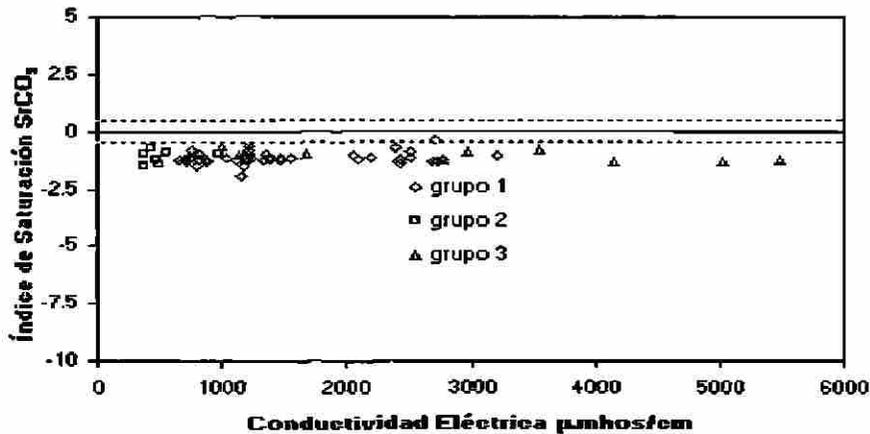


Figura 35.
Saturación de
estroncianita.

4.7. Profundidad al Nivel Estático

En lo que respecta a la profundidad de los niveles estáticos en el área de estudio, se tienen marcadas diferencias de las que ya se han hablado en el primer capítulo de este trabajo. Los niveles estáticos para octubre del 2003 presentan mayores profundidades en la parte norte de Cedral respecto a los valores medidos en marzo del mismo año y que corresponden desde el concepto de los sistemas de flujo a una zona de descarga con fuerte explotación, registrándose lecturas de profundidad del nivel estático del orden de 72 metros, aunque es posible encontrar niveles más profundos en la zona donde operan los pozos de SAPSAM donde no fue posible medir los niveles estáticos debido a la extracción ininterrumpida.

La parte norte de Cedral, donde se observan los niveles estáticos más profundos y por lo tanto el cono de abatimiento del que se ha hablado en el primer capítulo de este trabajo, corresponde a la ubicación de los pozos operados por SAPSAM y además a la zona agrícola más importante del área de Cedral, que es donde se encuentra un número significativo de aprovechamientos; de éstos se extraen las cantidades mayores de agua.

En la figura 36 se muestra la distribución de la profundidad del nivel estático en toda el área Cedral-Matehuala. En el se pueden apreciar claramente los puntos expuestos con anterioridad.

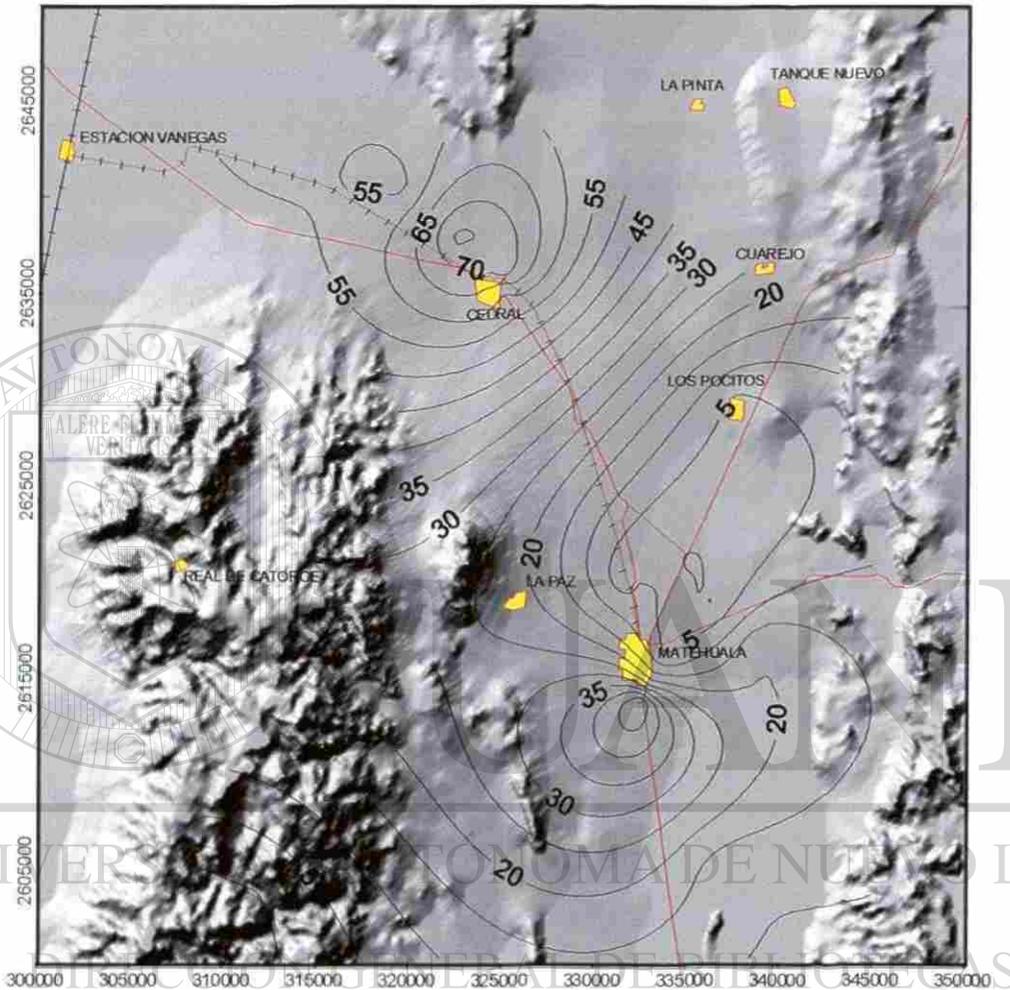
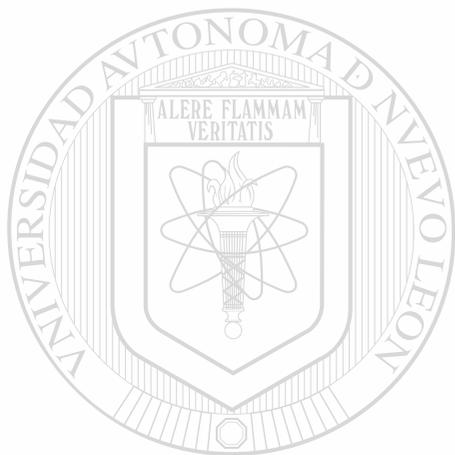


Figura 36. Distribución de la profundidad al nivel estático para octubre 2003

En dirección al sur, los niveles estáticos van presentando disminuciones en su profundidad comportándose de una manera uniforme, acercándose a Matehuala se observa una repentina elevación del nivel estático debido al punto m42, donde se localiza una galería filtrante de poco más de 3 metros de profundidad del nivel estático, además del manantial de Ojo de Agua y los canales de Cerrito Blanco, también es importantes señalar que los aprovechamientos situados dentro de la

ciudad corresponden a extracciones mínimas, llegando en algunos casos a pasar hasta dos meses entre un primer y segundo periodo de extracción donde el aprovechamiento no sobrepasa las 10 horas de operación, aunque esto solo es válido para los pozos o norias situados dentro de la ciudad y en la zona de ojo de agua.

Dentro de la ciudad de Matehuala nuevamente se aprecia un cono de abatimiento en la parte sureste de la misma, donde los niveles estáticos alcanzan nuevamente los 50 metros de profundidad en algunos pozos (m55 y m56) y que es también una importante zona agrícola de Matehuala con fuertes extracciones.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Como ya se ha mencionado en el primer capítulo de este trabajo, la principal situación a enfrentar en las regiones semiáridas en materia de suministro de agua para los diversos usos, es la escasez de medios proveedores, debido a las bajas precipitaciones, elevadas evaporaciones, suelos erosionados y escasez de vegetación para aumentar la infiltración.

En este caso particular el suministro de agua no es el problema principal, ya que la batería de pozos operados por SAPSAM hasta cierto punto provee a la población de agua para uso doméstico, mientras que en la región existen aprovechamientos particulares que se utilizan para los diversos usos de acuerdo a la actividad de cada sector de la región. La calidad de los aprovechamientos se convierte en la principal preocupación de las autoridades dedicadas a la administración de los recursos hídricos, ya que el deterioro en algunos pozos y/o norias es patente, principalmente en la zona de descarga del sistema donde se encuentra la ciudad de Matehuala como se ha observado en los resultados de los dos muestreos llevados a cabo para el fin de esta investigación.

En general, el suministro de agua para consumo humano en las principales poblaciones se ve sustentado por la batería de pozos que SAPSAM opera en la parte oeste de Cedral, donde la calidad de la mayoría de esos aprovechamientos cumple con los estándares marcados por las autoridades sanitarias para el uso a que se destina, teniendo valores medios de salinidad, dureza, alcalinidad, etc, los valores de sulfato muestran concentraciones superiores a las recomendadas por la NOM-127-SSA1-1994 en el 25% de los aprovechamientos muestreados.

Haciendo una comparación con los datos químicos históricos con los que se cuenta, se aprecia una ligera elevación de los valores de algunos iones como lo son los sólidos totales disueltos que presentaban para 1981 valores de 1190 mg/l (Figura 35), igualmente los registros de sulfato promediaban para el mismo año 283 mg/ y el promedio de la dureza se registraba en 961 mg/l , registrándose a la fecha promedios de 1291 mg/l de

sólidos totales disueltos, 740 mg/l de sulfato y 941 mg/l de CaCO_3 (dureza). El principal indicador de la evolución química del agua subterránea a través del tiempo en esta zona es sin duda el anión sulfato que muestra un incremento muy fuerte en este lapso de tiempo.

La elevación del sulfato en el agua subterránea según indican los resultados de este trabajo se debe a la disolución de yeso, que se encuentra presente en gran cantidad dentro del material aluvial de la cuenca como se ha puntualizado en la descripción litológica de algunos pozos ubicados dentro del área de estudio en las investigaciones realizadas anteriormente.

En su recorrido a lo largo de toda la línea de flujo el agua subsaturada de yeso en el inicio (Figura 32), sigue disolviendo este mineral hasta alcanzar el equilibrio con el mismo, sucediendo esto en la parte sur del acuífero Cedral-Matehuala, lo que explica las altas concentraciones de sulfatos en el área de Matehuala donde se tienen los valores más elevados (Figura 37).

Este proceso, no se lleva a cabo de una manera simple, sino que además están involucrados los cambios en las concentraciones Ca y Mg.

Por medio de las gráficas de saturación se ha encontrado que la causa del comportamiento del yeso, el calcio y magnesio en particular se debe al proceso de dedolomitización (Figuras 38, 39 y 40) presente en el área de estudio.

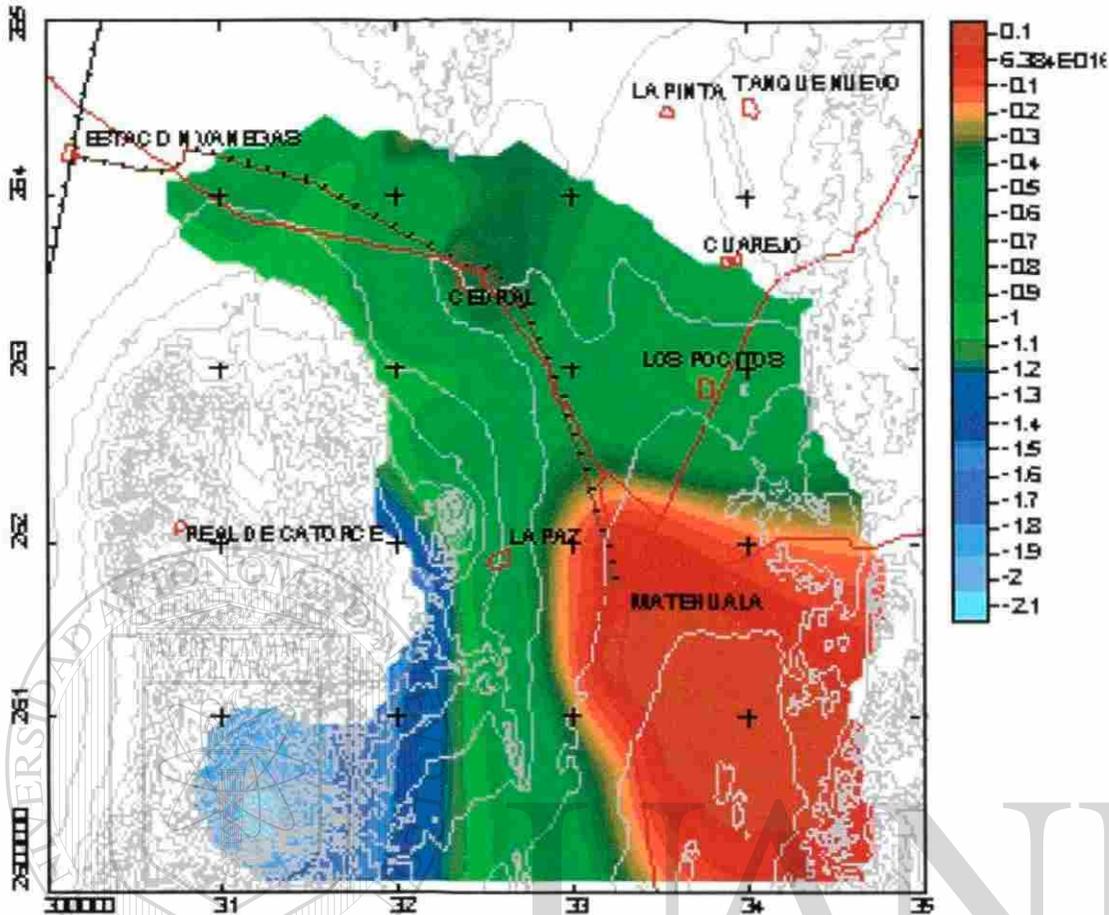
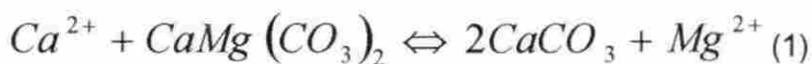


Figura 37. Mapa que muestra la distribución de la saturación de yeso en el agua subterránea.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

La dedolomitización ocurre en acuíferos que contienen calizas y dolomías, en combinación con capas yesíferas (Back y Hanshaw, 1970; Wingley, 1973; Atkinson, 1983; Back et al., 1984). Como resultado de la disolución de yeso o anhídrita, la dolomita se disuelve y la calcita precipita. La reacción ha sido deducida en la mayoría de los casos de la tendencia en la química del agua, pero esto fue además confirmado en estudios petrográficos por Deike (1991).



En un acuífero que contiene dolomita y calcita, podemos esperar que el agua subterránea esté muy cercana al equilibrio con ambos minerales:

Y de acuerdo a la relación $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ permanece fijo como

$$K_r = \frac{[Mg^{2+}]}{[Ca^{2+}]} = \frac{K_{dot}}{K_{cc}^2} = \frac{10^{-17.09}}{(10^{-8.48})^2} = 0.8 \text{ para } 25^\circ (2)$$

La disolución de la anhidrita o yeso tiene lugar de acuerdo a:



El incremento en la concentración de calcio debido a la disolución de yeso causa la precipitación de la calcita. La concentración de CO_3^{2-} decrece cuando la calcita precipita, y esto provoca la disolución de la dolomita y un incremento en la concentración de Mg^{2+} . Cuando el magnesio incrementa, el calcio también incrementa por la relación de la ecuación 2. El resultado es por lo tanto que la disolución del yeso induce a la transformación de dolomita a calcita en la roca y produce aguas con elevadas concentraciones de Mg^{2+} , Ca^{2+} y SO_4^{2-} (Figuras 38,39 y 40) y baja alcalinidad.

El pronóstico que se puede obtener de las gráficas de saturación de las figuras siguientes es que la disolución mineral continuará en algunas zonas, principalmente donde se sitúan las muestras del grupo 1 (Figura 38) donde se observa que hay sub saturación del mineral yeso, una buena parte de las muestras.

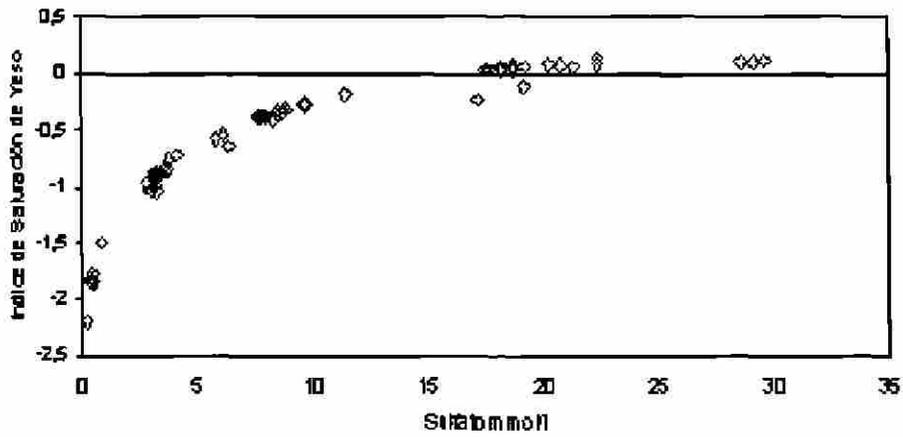


Figura 38. Comparación de la saturación del yeso como función de la concentración total de sulfato

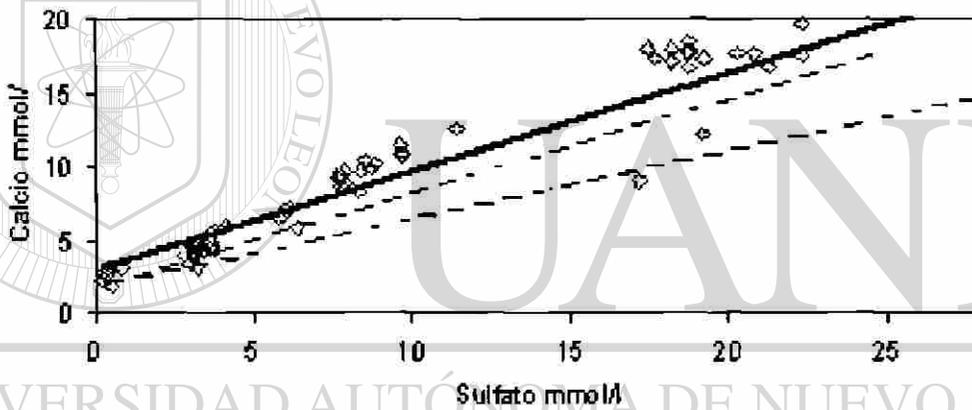


Figura 39. Concentraciones de calcio en relación con la concentración sulfato

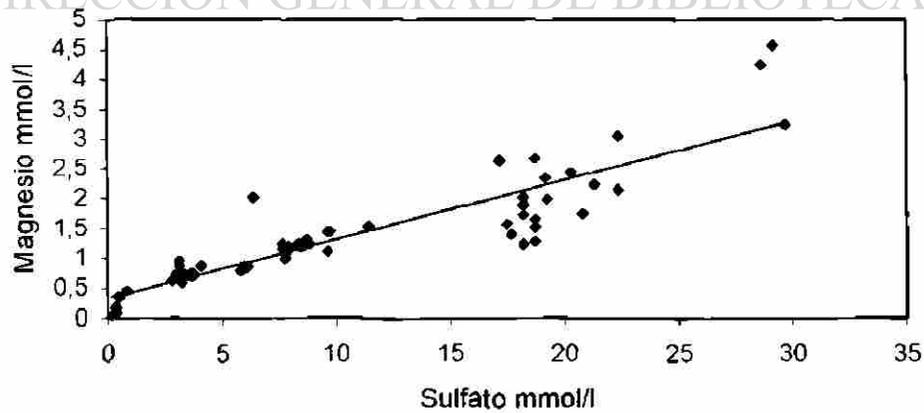
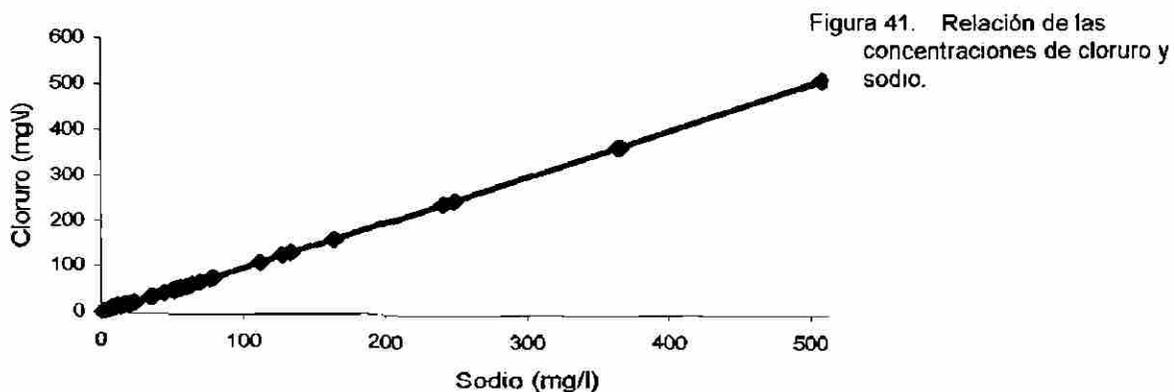


Figura 40. Concentración de magnesio con relación a la concentración de sulfato

Los cambios que presenta el anión sulfato a través de la línea de flujo son significativos, aunque se localizan zonas con contenidos muy elevados de este al igual que STD dentro de la zona de buena calidad (parte norte del área de estudio), esto puede representar la presencia de flujos muy locales, producidos por retornos de riego como es el caso de m7 (Cerro de Flores) y m18 (Cedral), donde algunos parámetros físicos y químicos como elevados valores de STD, conductividad eléctrica, y baja alcalinidad, no guardan concordancia con los resultados de muestras tomadas en los pozos adyacentes a estos puntos.

Cloruro y magnesio

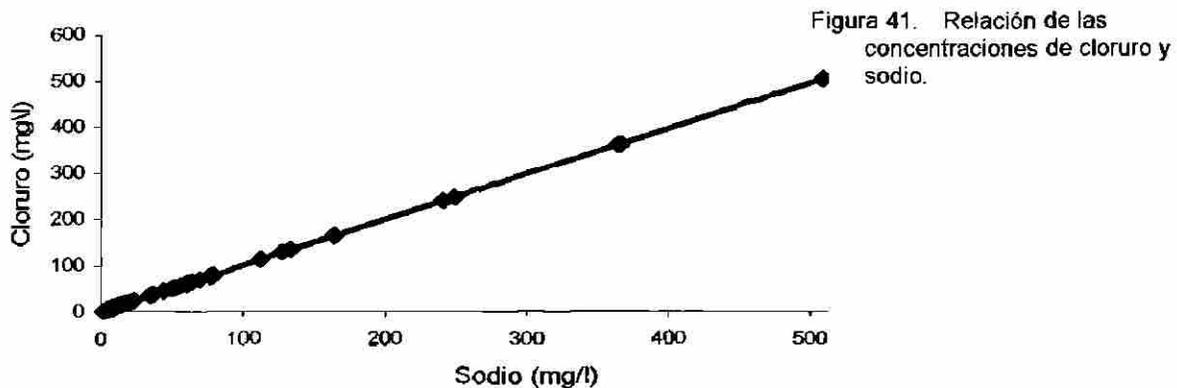
Por su parte el anión cloruro se hace presente en concentraciones elevadas solamente en 4 muestras (m7, m39, m55 y m56), situándose estos aprovechamientos principalmente en la ciudad de Matehuala. Los contenidos altos de sodio excediendo hasta más de cuatro veces el límite máximo establecido (200 mg/l) coinciden con los de cloruro como se puede observar en la siguiente gráfica (Figura 41), por lo que es necesario relacionarlos como de posible origen marino, aunque se ignora en dónde se encuentran contenidos. Debido a la diversa mineralogía de los sedimentos que forman el material aluvial del acuífero, existe la posibilidad que estos iones se encuentren alojados en los fragmentos minerales que componen el mismo. Una característica que comparten los aprovechamientos que registran los más altos contenidos de cloro con un promedio de 442 mg/l Cl, es la profundidad, siendo esta superior a 100 m en todos los pozos con estos valores altos.



Los cambios que presenta el anión sulfato a través de la línea de flujo son significativos, aunque se localizan zonas con contenidos muy elevados de este al igual que STD dentro de la zona de buena calidad (parte norte del área de estudio), esto puede representar la presencia de flujos muy locales, producidos por retornos de riego como es el caso de m7 (Cerro de Flores) y m18 (Cedral), donde algunos parámetros físicos y químicos como elevados valores de STD, conductividad eléctrica, y baja alcalinidad, no guardan concordancia con los resultados de muestras tomadas en los pozos adyacentes a estos puntos.

Cloruro y magnesio

Por su parte el anión cloruro se hace presente en concentraciones elevadas solamente en 4 muestras (m7, m39, m55 y m56), situándose estos aprovechamientos principalmente en la ciudad de Matehuala. Los contenidos altos de sodio excediendo hasta más de cuatro veces el límite máximo establecido (200 mg/l) coinciden con los de cloruro como se puede observar en la siguiente gráfica (Figura 41), por lo que es necesario relacionarlos como de posible origen marino, aunque se ignora en dónde se encuentran contenidos. Debido a la diversa mineralogía de los sedimentos que forman el material aluvial del acuífero, existe la posibilidad que estos iones se encuentren alojados en los fragmentos minerales que componen el mismo. Una característica que comparten los aprovechamientos que registran los más altos contenidos de cloro con un promedio de 442 mg/l Cl, es la profundidad, siendo esta superior a 100 m en todos los pozos con estos valores altos.



Nitratos.

Las muestras de agua con contenido elevado de nitratos deben la abundante presencia de este anión, principalmente a las prácticas agrícolas tradicionales que se ejecutan en la zona, ya que se observó en gran parte de los terrenos de cultivo donde se cosecha tomate, ajo, cebolla, alfalfa, col, etc. existe el uso de abonos orgánicos (estiércol), previo a la temporada de siembra, también se utilizan fertilizantes de amonio, además de que existen, sitios dedicados a la crianza de ganado (reses, cabras, ovejas, avestruz), por lo que es posible afirmar que las altas concentraciones de $N-NO_3$ tienen un origen antrópico.

A pesar de que los pozos, norias y manantiales impactados por nitratos son relativamente bajos en número (9 de las 67 muestras analizadas) y sus concentraciones no sobrepasan en valores alarmantes (18.7 en promedio) como el caso del arsénico por ejemplo, es un aspecto importante a considerar desde el punto de vista de contaminación del agua subterránea, ya que no se encuentran limitados a una zona específica, sino por el contrario, son puntos esparcidos indistintamente a lo largo de toda el área de estudio, lo que puede en un futuro ser una importante fuente de contaminación orgánica dentro del acuífero Cedral-Matehuala sobre todo por la poca o nula atención que se le presta a aspectos como este dentro de las prácticas agrícolas entre la gente que las lleva a cabo.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Distribución geográfica de las familias de agua

Las familias de agua formados por medio de los diagramas de Piper (Figura 28), muestran con definición zonas con una química diferente entre estas. La distribución del grupo de aguas cálcicas-bicarbonatadas está bien ubicada, ocupando la parte de los manantiales de la Sierra de Catorce. Esta composición se debe a la corta residencia del agua subterránea en ese medio. En este inicio del tránsito del agua subterránea a través del medio, el agua se encuentra supersaturada con respecto a la calcita (Figura 31), ya que proviene de una formaciones principalmente calcáreas, presentes en el área de

recarga (Sierra de Catorce) encontrándose gran cantidad de material para disolver hasta saturarse con respecto a esta.

Conforme va aumentando el recorrido del agua a través del sistema, los nuevos componentes que se encuentran en el mismo como son las arcillas con grandes cantidades de cristales de yeso como lo reportan las descripciones litológicas de algunos pozos perforados en los años 70's y 80's, van reaccionando con el agua, y ya que el yeso es un mineral altamente reactivo comienza la disolución, incorporándose cantidades importantes de sulfato provenientes de la disolución del yeso, mientras tanto el calcio proveniente del mismo mineral comienza a precipitar debido a que existe supersaturación (efecto del ión común) por lo que el agua subterránea ya no tiene la capacidad de disolver y trata de mantenerse en equilibrio. El sulfato se hace presente en concentraciones bajas (promedio de 383 mg/l de sulfato). La saturación del agua con respecto del yeso continúa incrementando, aunque no alcanza todavía el equilibrio, por lo que sigue la disolución.

Hacia el sur el agua subterránea sigue enriqueciéndose con sulfato por el mismo proceso anterior, hasta que alcanza el equilibrio con respecto al yeso en la zona de descarga (Matehuala) por lo que la cantidad de sulfato es incrementada presentando los valores tan altos como los que se registran en los aprovechamientos de ese lugar.

Las cantidades tan elevadas de calcio bien puede deberse a ambas situaciones; por un lado el alto contenido inicial de calcita proveniente de las formaciones calcáreas del área de recarga y por otro lado el incremento de calcio debido al efecto del ion común (disolución del yeso), por lo que el agua subterránea se encontrará en diversos sitios supersaturada con respecto a la calcita. Dentro de las gráficas de saturación (Figura 31).

Calidad del Agua Subterránea.

Las muestras pertenecientes a la familia de aguas cálcicas-bicarbonatadas (Tabla 15 y Figura 28) que se encuentran en el norte del área de estudio donde se ubican los pozos

operados por SAPSAM representan además de los manantiales localizados en la parte sur (familia cálcica-bicarbonatada) de la Sierra de Catorce las aguas de mejor calidad, por lo que no representa ningún riesgo su consumo por parte de la población de Cedral y Matehuala.

La familia de agua cálcica-sulfatada se distribuye a lo largo de una franja con dirección norte-sur en la zona dentro del área de estudio, aunque forman parte de la misma familia, existen diferencias significativas entre las muestras de agua de la parte norte y las de la parte sur, mientras que las muestras de esta familia situadas en las cercanías de Cedral presentan valores moderados de sulfatos (902 mg/l sulfato como promedio), mientras que las muestras de esta familia localizadas en la zona adyacente a Matehuala registran valores promedio de sulfatos de 1350 mg/l, esto refuerza la teoría de disolución de yeso a lo largo de la línea de flujo, llegando a tener los más altos contenidos de sulfatos la parte sur.

Por lo que respecta a los pozos de la zona de Cedral, estos tienen un comportamiento distinto a los pozos vecinos que registran comportamientos típicos para la teoría propuesta en este trabajo. Particularmente se trata de 4 pozos (m17, m18, m21 y m22) que registran contenidos altos de sulfatos, estos tienen la particularidad de ser los pozos más profundos de la zona y están localizados en un área donde los terrenos son fuertemente explotados para la agricultura, ya que la producción agrícola en los mismos se registra durante todo el año, solo cambiando el cultivo de acuerdo a la temporada (excepto m21 que pertenece a SAPSAM), de acuerdo con esto, esta zona específica presentaría aspectos adversos provocados por los retomos de riego, ya que como se mencionó, son irrigados durante todo el año

Arsénico en el agua.

Es importante resaltar que en la ciudad y en las cercanías de Matehuala, los pozos más profundos registran contenidos de arsénico bajos, como los son las muestras m55, m56 estando estos en relativa cercanía a otros pozos donde se obtuvieron valores altos de arsénico, esto implica que la presencia de arsénico se limita a la zona donde el nivel del

agua se encuentra más somero, ya que los datos obtenidos en este trabajo así lo reflejan.

Las muestras pertenecientes a los pozos del hotel Las Palmas, que son las que registran los contenidos más elevados de arsénico (13160 ppb y 9480 ppb en el primer muestreo y 12310 y 9510 para el segundo muestreo), las pertenecientes a Ojo de Agua, así como todo el sistema de canales de Cerrito Blanco, se encuentran dentro de una zona muy limitada donde el flujo es visiblemente afectado, precisamente por el sistema de canales de Cerrito Blanco, modificando localmente el flujo que generalmente es norte-sur, haciéndolo oeste-este.

El cambio en la dirección de flujo es muy evidente si observamos la distribución de la salinidad y de los sulfatos además del comportamiento de las concentraciones de arsénico, en donde en los siguientes mapas (Figura 42) se puede apreciar de manera clara la modificación en la dirección de flujo ya mencionada, ya que la tendencia general de aumento de la mayoría de los parámetros químicos (dureza, salinidad, sulfatos, etc.) hacia el sur se ve modificada, registrando una desviación en dirección al este, en toda la zona de Matehuala, siendo válidos los cambios hidrogeoquímicos dentro del acuífero como herramienta para establecer direcciones de flujo.

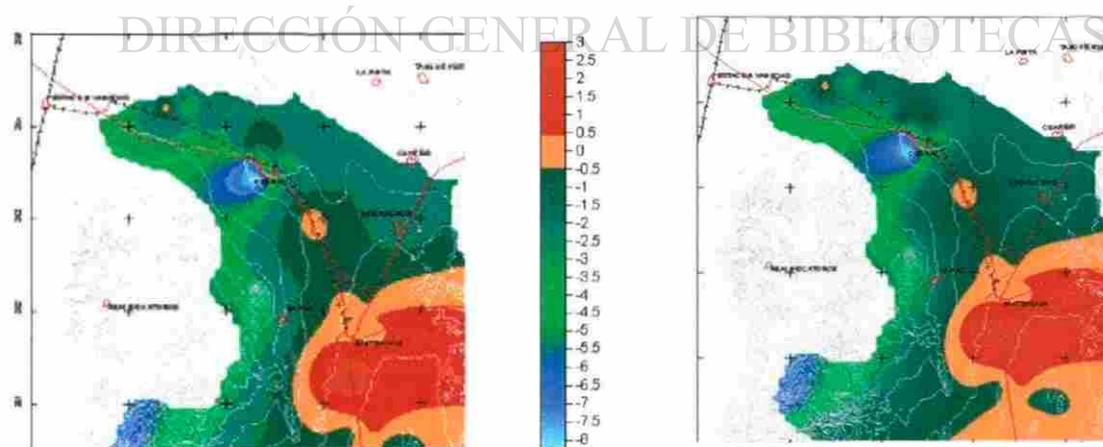


Figura 42. Mapas de saturación de jarosita y yeso en el agua subterránea.

La presencia de tales concentraciones de arsénico como las que en este trabajo se han reportado es de origen incierto todavía, los múltiples mecanismos que provocan alteraciones en la composición del agua subterránea enriqueciéndola o empobreciéndola en iones disueltos son tan variados que casi siempre actúan de manera combinada, aunque ciertamente es de suma importancia la mineralogía del acuífero, así como el clima, etc. sobre todo cuando se tiene como este caso la presencia de una zona mineralizada como lo son la vetas que conforman la mina de Santa María de la Paz. En trabajos previos se sostiene la hipótesis sobre la influencia de los desechos de mina de Santa María de La Paz, donde propone como mecanismo contaminante principalmente la dispersión física de las partículas alojadas en las presas de jales (Razo, 2002).

En este trabajo debido a que no se realizaron estudios mineralógicos de los sedimentos que componen el acuífero no es posible establecer un origen claro del arsénico que se presenta a concentraciones tan altas, aunque apoyándose en la literatura existente al respecto y tomando en cuenta aspectos como la distribución de arsénico como mineral traza dentro del acuífero, siendo esta muy uniforme en toda la parte norte del área de estudio, y la distribución tan puntual de las altas concentraciones registradas exclusivamente en el área de Matehuala y las variaciones tan altas que se registran en los valores de arsénico en una área relativamente pequeña, así como los niveles estáticos de los aprovechamientos contaminados los cuales son en todos los casos muy someros es posible interpretar como fuente de esta contaminación del agua subterránea a los desechos provenientes de las operaciones de la mina de La Paz, por medio de el agua bombeada del interior de la misma que posteriormente se infiltraría de manera casi directa en las aberturas que se encuentran en la zona, o bien, los polvos esparcidos de las presas de jales, etc. apoyando la hipótesis anteriormente establecida por Razo aunque los mecanismos no están del todo establecidos. Los posibles a estarse desarrollando de acuerdo con los resultados de la especiación calculada son:

Especiación de arsénico en hidróxidos amorfos.

Sustitución.

Sustitución de arsenato por sulfato en la superficie de la jarosita ($\text{KFe}_3[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6$).

Este proceso ha sido documentado en estudios espectroscópicos (Foster et al., 1999; Savage et al., 2000). Donde la jarosita proveniente de ambientes donde existe explotación de minerales está estrechamente asociada al As(V). La manera como el As(V) se incorpora a la jarosita es mediante la sustitución de sulfato adsorbiéndose en la superficie de la primera. Por medio del modelado utilizando el software PHREEQC se obtuvo el índice de saturación de la jarosita al igual que las demás especies, resultando en un incremento del índice de saturación en la parte de Matehuala, encontrándose sobresaturada el agua subterránea con respecto a la jarosita y algunas muestras de la misma zona en estado de equilibrio.

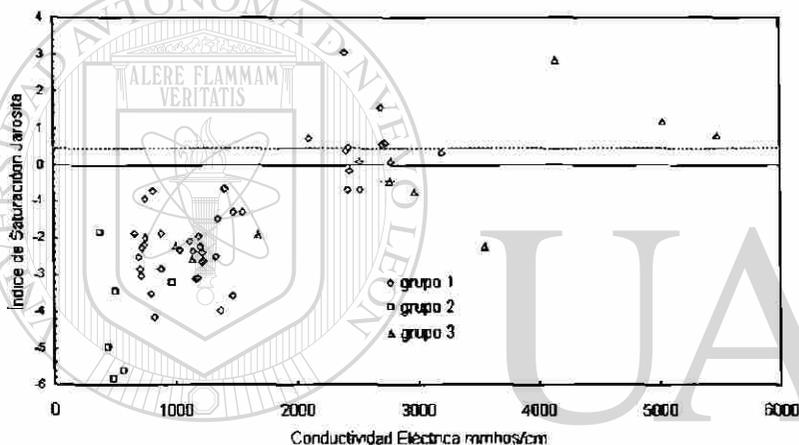


Figura 43. Saturación de la jarosita en las 62 muestras de agua subterránea del primer muestreo.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Examinando los resultados obtenidos, se tiene que todos los pozos del área de Matehuala (Ojo de Agua, Rancho Nuevo, Cerrito Blanco, etc.) y los pozos del sur, presentan sobresaturación o equilibrio con la jarosita, y todas las muestras de norte de la zona de estudio a excepción de m18 se encuentran subsaturadas con respecto a la misma (Figura 43), por lo que es posible que el mecanismo de incorporación de arsénico en la superficie de la jarosita sea uno de los mecanismos que están actuando en la zona.

La distribución de las altas concentraciones de arsénico como se muestran en el siguiente mapa (Figura 44) muestran enorme similitud en la geometría de la distribución

de la jarosita para la misma área recortada, aunque como se mencionó antes, quizás no sea un mecanismo único el que opere en la zona.

Adsorción.

Adsorción en goetita y ferrihidrita.

Al igual que la jarosita, estas dos especies químicas han sido espectroscópicamente estudiadas por diversos autores (Fendorf et al, 1997; Manceau, 1995; Waychunas et al., 1993; Manning et al., 1997). En este caso particular es posible encontrar tanto As(III) como As(V) absorbido en la superficie de goethita y ferrihidrita, ya que para la zona sur del área de estudio se tiene supersaturación de ambas especies en el agua subterránea. (Figuras 45 y 46).

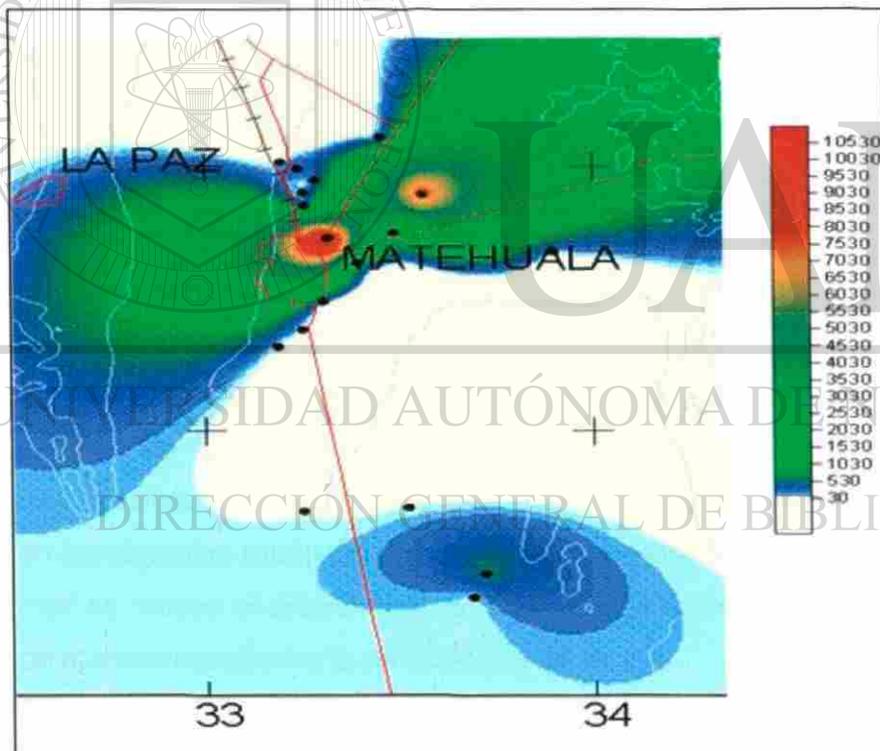


Figura 44. Distribución de arsénico en la zona sur del área de estudio. Unidades en ppb

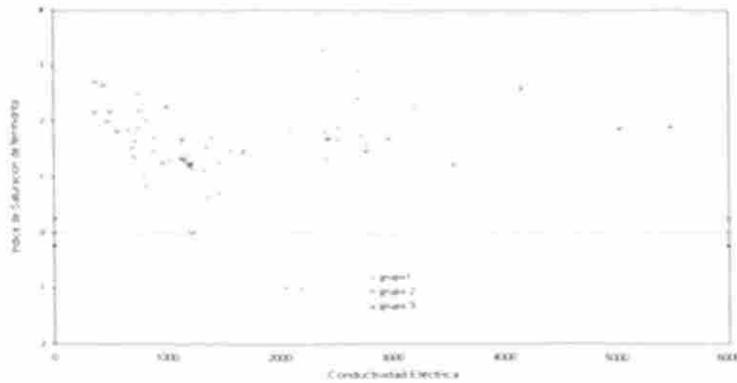


Figura 45. Saturación de la ferrihidrita, donde se observa la sobresaturación de todas las muestras de agua subterránea.

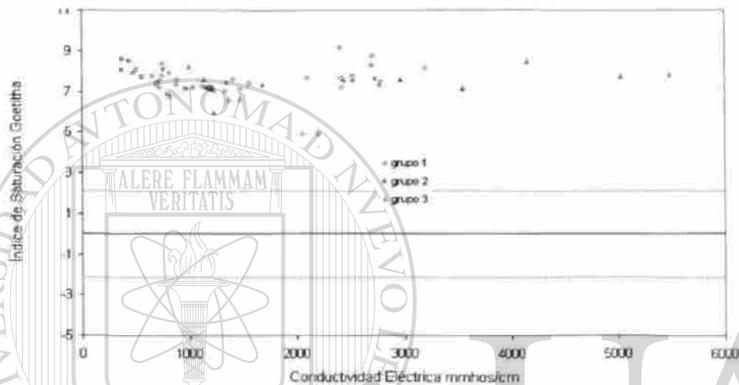


Figura 46. Gráfica de saturación de goethita.

Como se aprecia en las gráficas anteriores, la zona contiene importantes cantidades de los estos minerales disueltos en el agua subterránea, por lo que no se puede descartar que los procesos anteriormente mencionados estén actualmente operando en esta parte del área de estudio, ya que las condiciones son aptas para que se lleven a cabo estos mecanismos de incorporación de arsénico por medio de la adición de una u otra forma en las especies citadas. Aunque este es solamente un intento por explicar la forma en la cual se mueve el arsénico en el medio subterráneo, quedando por definir claramente y de manera inequívoca la procedencia de este.

Un signo preocupante es la movilización de arsénico hacia la parte sur del área de estudio, debido a que se encuentran situadas a través de toda la zona diversos puntos de población, donde el abastecimiento de agua potable se sustenta en pozos o norias que no tienen un monitoreo frecuente de las características físicas y químicas del agua que de estos se extrae. Aunque los pozos y norias afectados por concentraciones de más de 10 mg/l de arsénico no presentan fluctuaciones grandes respecto a las mismas,

el solo hecho de estar dentro de esos 10 $\mu\text{g/l}$ los debe hacer sujeto de monitoreo continuo para permitir en cualquier momento el conocimiento de una situación de emergencia sanitaria ante un aumento de los valores de arsénico pudieran elevarse a través de los años.

El promedio de las muestras con contenidos mayores a 10 $\mu\text{g/l}$ de arsénico es de 20 $\mu\text{g/l}$, por lo que la norma mexicana la contempla como agua para uso potable, sin embargo el valor establecido por la OMS que es de 10 $\mu\text{g/l}$ se encuentra rebasado, bastando este hecho para que se considere como agua no potable, aunque precisamente en uno de estos lugares el agua que se extrae del aprovechamiento contaminado es para uso exclusivamente potable (m45).

Observando la distribución de arsénico en el mapa anterior, se aprecia la movilización del mismo hacia la parte sur teniendo concentraciones más pequeñas (<50 $\mu\text{g/l}$ y > 10 $\mu\text{g/l}$ para el azul más claro), aunque se encuentra también una pequeña zona que registra concentraciones de más de 50 $\mu\text{g/l}$ de arsénico (m49), pero es preciso mencionar que el valor registrado durante el primer muestreo sufrió una fuerte fluctuación habiendo registrado 582 $\mu\text{g/l}$ de arsénico en el primer muestreo y 49 $\mu\text{g/l}$ durante el segundo muestreo. Este suceso ocurrió en diversas muestras de agua, donde los primeros valores de arsénico registrados en el primer muestreo cambiaron drásticamente en el segundo, atribuyendo este hecho a la dilución debida a la recarga casi inmediata del agua proveniente de las lluvias de verano por medio del sistema de canales que cruzan la ciudad de Matehuala de oeste a este, además como también ya se ha mencionado, el hecho de que los pozos y norias tengan poca profundidad ayuda a que la interacción entre el agua de lluvia y el agua subterránea sea hasta cierto punto rápida para mecanismos como la dilución.

De acuerdo con lo anterior, la mayoría de las muestras tomadas durante la segunda etapa de muestreo presentan sensibles cambios químicos y físicos, los más visibles son en los valores de sulfato, que en el primer muestreo alcanzó un promedio de 1049 mg/l, en el segundo muestreo se registró un promedio de 949 mg/l, esto es más visible en la zona sur, donde el primer y el segundo muestreo registraron 1896 y 1698 mg/l de sulfato

respectivamente. Esta diferencia de 200 mg/l se puede atribuir igualmente a la dilución por parte del agua de lluvia, ya que como se ha mencionado, en la zona sur se tiene una infiltración rápida.

Las diferencias en lo relativo a la composición química del agua se pueden determinar por medio de la división en tres zonas incluidas dentro del acuífero, debido a que las muestras tomadas de aprovechamientos localizados en la parte de Cedral-Vanegas presentan similitudes en composición y enormes diferencias entre las muestras tomadas en la zona sur del área de estudio con valores de los principales iones visiblemente más altos que los primeros, también es necesario tratar por separado los aprovechamientos situados en las cercanías de la Sierra de Catorce (Limonés, Blanco de Arriba, Refugio de Monjas y La Boca, además de los manantiales situados en la misma sierra). Dentro de la segunda zona (Matehuala), es conveniente hacer una distinción entre los aprovechamientos de profundidades diferentes, porque como ya se ha visto las muestras que presentan contaminación por arsénico fueron tomadas de pozos y norias cuyo nivel estático es relativamente alto (Tablas 18 y 19).

Basándose en estas observaciones se puede aseverar que la contaminación por arsénico no ha avanzado en el sentido vertical a distancias considerables. Este puede ser en el futuro un aspecto de suma importancia para la determinación de la magnitud de las medidas a tomar cuando se proyecte un programa de control de la dispersión de arsénico o mitigación del mismo en las fuentes de agua subterránea invadidas por concentraciones mayores de 10 µg/l.

En general la evolución química del agua subterránea en el área Cedral –Matehuala está claramente definida por el tránsito de la misma a lo largo del sistema de flujo, siendo la parte norte el inicio del recorrido de un sistema de flujo regional donde los parámetros químicos presentan contenidos medios de cationes y aniones. Conforme se va avanzando en dirección al rumbo del flujo de agua las concentraciones minerales se van incrementando, teniéndose valores elevados de STD (Figura 21) y sulfatos principalmente (m52) debido a los procesos de disolución ya explicados anteriormente. En la zona de Matehuala se registran los valores más elevados de cationes y aniones,

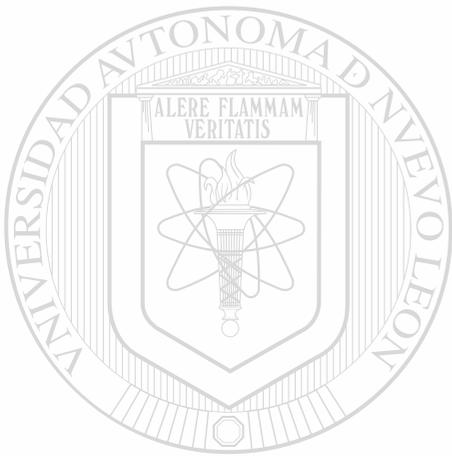
que es la zona de descarga del flujo de agua subterránea, y en todo su recorrido se ha ido disolviendo gran cantidad de minerales, llegándose a saturar de varias especies minerales justamente en esta zona (Figuras 32 y 35). Hacia el límite sur continúan los valores elevados de los principales iones.

El flujo regional tiene una dirección nor-noroeste sur-sureste, aunque en la zona de Matehuala se desvía hacia el este, formando un flujo local, debido en cierta medida al sistema de canales de Cerrito Blanco que corren en dirección oeste-este. También existen pequeños flujos locales como es el caso de la zona agrícola de Cedral que presenta cambios fuertes en el nivel estático en una zona muy pequeña (Figura 36), pero este hecho es debido a las fuertes extracciones de agua subterránea por el sistema de pozos utilizados para los fines agrícolas. Otro cono de abatimiento se observa en la parte sur de Matehuala, en donde igualmente se extraen volúmenes importantes de agua subterránea con fines agrícolas, ya que en la zona existe un grupo de ranchos agrícolas importantes donde las lecturas de los niveles estáticos muestran la intensiva explotación del acuífero.

De manera general se pueden apreciar dos zonas anómalas tomando en consideración la distribución de los niveles estáticos en toda el área de estudio. En primer lugar en el norte de Cedral donde se tienen los máximos abatimientos es relativamente sencillo explicar este hecho como un reflejo de las fuertes extracciones tanto por parte del sector agrícola así como para satisfacer la demanda para uso doméstico. Hasta el momento esta situación no ha repercutido fuertemente en la calidad del agua, pero tomando en cuenta los contenidos de cationes y aniones en el agua analizada hace 20 años, se aprecia un ligero incremento sobre todo en los valores de sulfatos y un poco de nitratos. Por otra parte en la ciudad de Matehuala con los contrastes mostrados en la distribución de los niveles estáticos es posible determinar un efecto mayor de esas diferencias entre niveles, con elevada salinidad y valores altos de la mayoría de los parámetros medidos, para este caso las altas extracciones principalmente para abastecer las necesidades agrícolas es la causa principal de los abatimientos mostrados.

Otra consideración que es pertinente hacer la define el comportamiento totalmente anómalo del pozo perteneciente al ejido Cerro de Flores, el cual difiere totalmente del comportamiento de los pozos de la región.

Con base en todas las observaciones de las características hidrogeoquímicas, prevalentes en toda el área de estudio y las modificaciones existentes a lo largo de la línea de flujo en las diferentes zonas diferenciadas en este trabajo, se propone el siguiente modelo conceptual:

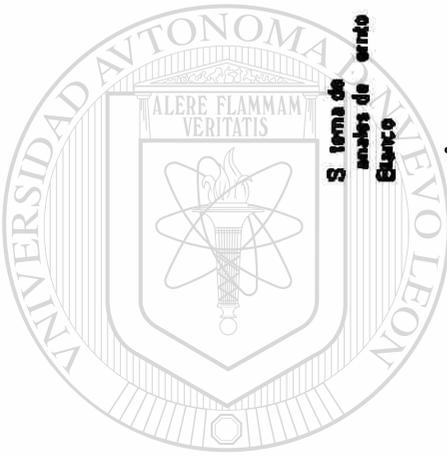


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





CEDRAL

La Cruz

Aguas sulfatadas
relacionadas al Ca,
dolomita, yeso, etc.



Rancho N e o

8162
pg/l Ag

MATEHUALA

13 100ug/l Ag

Aguas en equilibrio y
sobresaturadas en
respecto al yeso

Contamina aún
por arsénico

Santa Lucía

592 ug/l Ag

S tema de
análisis de
Bianco

Modelo conceptual del área de estudio

Figura 47



6. CONCLUSIONES.

El área Cedral –Matehuala desde el punto de vista hidrogeológico presenta fuertes contrastes, sobre todo en lo que respecta a la calidad del agua. Con zonas de excelente calidad situadas distantemente de la ciudad principal que es Matehuala se hace un esfuerzo por parte de las autoridades que manejan el recurso para proveer agua de buena calidad a una población que está en constante crecimiento. El problema del arsénico se hace visible a los ojos de toda la población que comienza a mostrar preocupación tanto por el desconocimiento de las posibles afectaciones como por la aparente indiferencia de los propios usuarios de los aprovechamientos afectados.

Otro aspecto a tomar en cuenta tal vez con más prontitud lo sea el hecho de que los pozos de agua potable operados por SAPSAM se encuentran en visible deterioro en la calidad del agua que ofrecen, deterioro que se traduce en elevadas concentraciones de sulfatos presentes en agua que aún se clasifica como potable, va incrementándose también la salinidad y dureza de la misma, por lo que es necesario planear el uso sustentable de las fuentes que aún ofrecen agua de calidad potable y también contar con alternativas de otras fuentes distintas a las actuales para prever el problema de la calidad del agua que se presentará en el futuro. De esta manera tomando medidas preventivas y correctivas donde sea necesario se evitará recurrir a prácticas desesperadas, las cuales la mayor parte de las ocasiones constituyen solo una solución momentánea sin resolver el problema desde su origen.

El caso de la contaminación por nitratos es una cuestión que ofrece oportunidad de practicar igual que para la problemática anterior medidas preventivas, debido a que se observan apenas casos de contaminación leve, aunque es preciso darle la debida importancia, ya que la contaminación por nitratos provoca problemas de salud rápidamente en los consumidores del agua contaminada. Por otro lado también es clara la procedencia de los nitratos, donde las concentraciones que rebasan la norma establecida por la SSA provienen de aprovechamientos situados en zonas agrícolas.

La contaminación por arsénico reportada en este trabajo en la zona de Matehuala y que avanza en dirección al sur representa los resultados más preocupantes de esta investigación, por lo que es un aspecto urgente a resolver, ya que algunos de los aprovechamientos utilizados con fines potables están viéndose afectados por esta situación por lo que, es preciso incluir este problema de contaminación por arsénico como un punto esencial para la planeación de cualquier nueva fuente de extracción de agua, sobre todo en la zona de Matehuala y al mismo tiempo controlar las políticas de extracción de los aprovechamientos afectados por este problema.

En la zona de Cedral después de la problemática del aumento de la salinidad del agua toma importancia la cantidad del agua extraída, ya que se observa que es la zona que presenta los abatimientos mayores de los niveles estáticos, esto puede resultar en lo futuro un factor de riesgo para los pozos operados por SAPSAM, ya que al norte de Cedral (Cerro de Flores), se tiene agua de muy mala calidad que debe evitarse que se pudiera dar una mezcla entre esa agua de mala calidad y el agua hasta el momento de buena calidad que se extrae de los pozos de San Isidro y los demás pozos de SAPSAM.

La calidad del agua de los manantiales situados al pie de la Sierra de Catorce, así como el de Limones y el manantial de San Juan de Vanegas presentan excelentes características hidrogeoquímicas, siendo los aprovechamientos que registraron los valores más bajos de sulfato y STD, por lo que su uso como fuente de agua potable para la población que fuera necesario proveer debe ser considerada en un proyecto formal.

8. APÉNDICES

Apéndice 1. Parámetros físicos y químicos del primer muestreo.

Parámetros de Campo

| Muestra | X | Y | Censo | Tipo | Prof.m | Fecha | T(°C) | pH | Eh (mV) | Eh | CE |
|---------|--------|---------|-------|-----------|--------|------------|-------|------|---------|--------|------|
| m1 | 325159 | 2636036 | 25 | pozo | 100 | 19/03/2003 | 24.5 | 6.85 | 145 | 344.03 | 1216 |
| m2 | 325632 | 2635420 | 19 | pozo | 90 | 19/03/2003 | 24.8 | 6.87 | 87 | 285.8 | 1230 |
| m3 | 324996 | 2635198 | 17 | pozo | 90 | 19/03/2003 | 25.9 | 7.05 | 79 | 276.7 | 1352 |
| m4 | 324783 | 2634774 | 13 | pozo | 80 | 19/03/2003 | 24.3 | 7.05 | 131 | 330.2 | 1219 |
| m5 | 325035 | 2634941 | 16 | pozo | 80 | 19/03/2003 | 24 | 7.09 | 100 | 299.5 | 1183 |
| m6 | 324756 | 2635002 | 15 | pozo | 58 | 19/03/2003 | 22.1 | 7.02 | 170 | 371.3 | 1206 |
| m7 | 326357 | 2640506 | 27 | pozo | 150 | 20/03/2003 | 24.6 | 7.19 | 95 | 293.9 | 3550 |
| m8 | 324550 | 2632422 | 26 | pozo | 60 | 20/03/2003 | 22.2 | 7.12 | 136 | 337.2 | 1169 |
| m9 | 323728 | 2637201 | 1 | pozo | 160 | 20/03/2003 | 24.8 | 6.85 | 105 | 303.8 | 1328 |
| m10 | 322887 | 2637487 | 2 | pozo | 150 | 20/03/2003 | 24 | 6.95 | 147 | 346.5 | 1147 |
| m11 | 322777 | 2637691 | 3 | pozo | 100 | 20/03/2003 | 25.3 | 6.9 | 156 | 354.3 | 1191 |
| m12 | 316884 | 2642412 | 45 | pozo | 200 | 20/03/2003 | 25.4 | 7.09 | 135 | 333.2 | 717 |
| m13 | 316570 | 2643275 | 44 | pozo | | 20/03/2003 | 24.5 | 7.1 | 146 | 345.0 | 703 |
| m14 | 316106 | 2643053 | 46 | pozo | 150 | 20/03/2003 | 23.7 | 7.11 | 174 | 373.8 | 697 |
| m15 | 314646 | 2641944 | 52 | pozo | 120 | 20/03/2003 | 23.6 | 7.07 | 119 | 318.9 | 724 |
| m16 | 312054 | 2643061 | 49 | pozo | 67 | 20/03/2003 | 22 | 6.94 | 143 | 344.4 | 885 |
| m17 | 324727 | 2637266 | 10 | pozo | | 21/03/2003 | 23.9 | 6.89 | 127 | 326.6 | 1554 |
| m18 | 324901 | 2637825 | 11 | pozo | 300 | 21/03/2003 | 24.1 | 7.01 | 119 | 318.4 | 2770 |
| m19 | 325763 | 2636141 | 23 | pozo | | 21/03/2003 | 24 | 6.87 | 91 | 290.5 | 1367 |
| m20 | 323389 | 2637109 | 5 | pozo | 90 | 21/03/2003 | 26 | 6.86 | 137 | 334.6 | 1466 |
| m21 | 323183 | 2634260 | 33 | pozo | 180 | 21/03/2003 | 22.3 | 6.85 | -54 | 147.1 | 2050 |
| m22 | 323492 | 2633973 | 34 | pozo | | 21/03/2003 | 22.3 | 6.82 | -58 | 143.1 | 2200 |
| m23 | 322315 | 2636538 | 28 | pozo | 50 | 21/03/2003 | 22.6 | 7.08 | -59 | 141.8 | 1225 |
| m24 | 311886 | 2642922 | 48 | pozo | 78 | 21/03/2003 | 21.9 | 6.99 | 145 | 346.5 | 880 |
| m25 | 317815 | 2641304 | 41 | pozo | 150 | 22/03/2003 | 23.6 | 7.14 | 205 | 404.9 | 661 |
| m26 | 318240 | 2642053 | 42 | pozo | 150 | 22/03/2003 | 24.5 | 7.08 | 166 | 365.0 | 817 |
| m27 | 316465 | 2642588 | 53 | pozo | 150 | 22/03/2003 | 28 | 7.12 | 210 | 405.8 | 826 |
| m28 | 319501 | 2640664 | 39 | pozo | 150 | 22/03/2003 | 24.8 | 7.02 | 132 | 330.8 | 1034 |
| m29 | 321039 | 2641227 | 67 | pozo | | 22/03/2003 | 25.7 | 6.92 | 245 | 442.9 | 1121 |
| m30 | 320459 | 2643142 | 61 | pozo | 155 | 22/03/2003 | 29.3 | 6.72 | 132 | 326.6 | 1474 |
| m31 | 321340 | 2638960 | 58 | pozo | | 22/03/2003 | 21.7 | 7.18 | 141 | 342.6 | 747 |
| m32 | 320837 | 2618482 | 70 | noria | | 23/03/2003 | 18.7 | 7.78 | 177 | 381.4 | 567 |
| m33 | 321144 | 2617641 | 71 | pozo | | 23/03/2003 | 21.1 | 7.26 | 171 | 373.2 | 505 |
| m34 | 323882 | 2616903 | 72 | pozo | | 23/03/2003 | 27 | 7.05 | 153 | 349.7 | 968 |
| m35 | 323074 | 2629392 | 74 | pozo | | 23/03/2003 | 25.6 | 7.3 | 194 | 392.0 | 1140 |
| m36 | 322937 | 2626181 | 75 | pozo | | 23/03/2003 | 25.4 | 7.02 | 93 | 291.2 | 1679 |
| m37 | 328488 | 2630175 | 32 | pozo | 100 | 24/03/2003 | 23.7 | 6.92 | 103 | 302.8 | 2440 |
| m38 | 332534 | 2619013 | 78 | noria | 10 | 24/03/2003 | 19.6 | 6.93 | 205 | 408.6 | 2520 |
| m39 | 333040 | 2614892 | 89 | pozo | 120 | 24/03/2003 | 22.7 | 6.75 | 156 | 356.7 | 5030 |
| m40 | 333150 | 2617271 | 84 | pozo | | 24/03/2003 | 22 | 6.63 | 227 | 428.4 | 2780 |
| m41 | 333157 | 2617300 | 85 | pozo | | 24/03/2003 | 22.3 | 6.66 | 183 | 384.1 | 2730 |
| m42 | 337604 | 2629420 | 83 | galería | | 24/03/2003 | 18.2 | 7.51 | 220 | 424.9 | 1002 |
| m43 | 310809 | 2637879 | 22 | manantial | | 25/03/2003 | 28.6 | 6.85 | 216 | 411.2 | 798 |
| m44 | 334873 | 2617486 | 93 | pozo | 38 | 25/03/2003 | 22.4 | 6.69 | 174 | 375.0 | 2420 |
| m45 | 339004 | 2616786 | 86 | pozo | 120 | 25/03/2003 | 23.6 | 7.15 | 182 | 381.9 | 2700 |
| m46 | 332402 | 2619918 | 100 | pozo | | 25/03/2003 | 18.3 | 7 | 122 | 326.8 | 2520 |

| Parámetros de Campo | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------|---------|-------|-----------|--------|------------|-------|------|---------|-------|------|
| Muestra | X | Y | Censo | Tipo | Prof.m | Fecha | T(°C) | pH | Eh (mV) | Eh | CE |
| m47 | 332507 | 2606963 | 87 | pozo | | 25/03/2003 | 22.7 | 7.05 | 127 | 327.7 | 2970 |
| m48 | 333728 | 2593873 | 91 | pozo | | 25/03/2003 | 25.8 | 7.65 | 56 | 253.8 | 375 |
| m49 | 337184 | 2604582 | 92 | pozo | | 25/03/2003 | 22.3 | 6.73 | 187 | 388.1 | 2430 |
| m50 | 314179 | 2641891 | 51 | pozo | 184 | 26/03/2003 | 18.9 | 7.33 | 107 | 311.2 | 755 |
| m51 | 318933 | 2642139 | 40 | pozo | 150 | 26/03/2003 | 25 | 6.93 | 190 | 388.6 | 1402 |
| m52 | 334528 | 2621094 | 104 | tajo | | 26/03/2003 | 21.8 | 7.9 | 165 | 366.5 | 2710 |
| m53 | 333925 | 2616341 | 105 | noria | 10 | 26/03/2003 | 22 | 6.68 | 103 | 304.4 | 2100 |
| m54 | 335621 | 2618942 | 106 | galería | | 26/03/2003 | 19.8 | 7.34 | 225 | 428.4 | 2400 |
| m55 | 331879 | 2613188 | 90 | pozo | 126 | 27/03/2003 | 23.8 | 6.97 | 142 | 341.7 | 4150 |
| m56 | 332515 | 2613838 | 107 | pozo | | 27/03/2003 | 23.2 | 6.93 | 142 | 342.2 | 5480 |
| m57 | 335197 | 2607104 | 102 | pozo | 24 | 27/03/2003 | 22.8 | 7.39 | 53 | 253.6 | 3200 |
| m58 | 336868 | 2603699 | 88 | pozo | 12 | 27/03/2003 | 23.2 | 6.92 | 195 | 395.2 | 2410 |
| m59 | 322257 | 2637724 | | pozo | | 28/03/2003 | | | | | |
| m60 | 312897 | 2601569 | | manantial | 0 | 04/04/2003 | 15.4 | 8.12 | | | 443 |
| m61 | 311978 | 2603959 | | manantial | 0 | 04/04/2003 | 18.1 | 7.95 | | | 370 |
| m62 | 308866 | 2605205 | | manantial | 0 | 04/04/2003 | 16.5 | 7.62 | | | 484 |

| Parámetros de Campo | | | | | | | | | Aniones | |
|---------------------|--------------|--------|--------|------------------|---------|-------------|------------------|--------|-----------------|-------------------|
| Muestra | Localidad | O.D(%) | O mg/l | HCO ₃ | STD | Uso de Agua | HCO ₃ | Alc.. | SO ₄ | N-NO ₃ |
| m1 | Cedral | 56 | 4.6 | 269.74 | 912 | Agrícola | 234.38 | 221.10 | 758.4 | 1.6 |
| m2 | Cedral | 52 | 4.2 | 240.3156 | 922.5 | Agrícola | 257.82 | 196.98 | 818.88 | 1.2 |
| m3 | Cedral | - | 9.2 | 170.9 | 1014 | Agrícola | 234.38 | 88.44 | 934.56 | 1.5 |
| m4 | Cedral | 57 | 4.9 | 205.98 | 914.25 | Agrícola | 222.66 | 168.84 | 808.32 | 1 |
| m5 | Cedral | 35 | 3 | 211.87 | 887.25 | Agrícola | 246.1 | 173.66 | 745.92 | 2.4 |
| m6 | Cedral | 63 | 57 | 211.87 | 904.5 | Agrícola | 234.38 | 173.66 | 734.88 | 4.7 |
| m7 | C. de Flores | 10 | 0.8 | 154.98 | 2662.5 | Agrícola | 234.38 | 127.03 | 1843.68 | 17.5 |
| m8 | Cedral | 79 | 7.1 | 219.72 | 876.75 | Agrícola | 187.5 | 180.1 | 741.6 | 5 |
| m9 | Cedral | 60 | 5.2 | 219.72 | 996 | Potable | 234.38 | 180.1 | 849.6 | 1.5 |
| m10 | Cedral | 40 | 3.3 | 234.38 | 860.25 | Potable | 234.38 | 180.1 | 745.92 | 1.6 |
| m11 | Cedral | 54 | 47 | 225.6 | 893.25 | Potable | 234.38 | 184.92 | 735.36 | 1.5 |
| m12 | N.S Pedro | 48 | 4.2 | 211.87 | 537.75 | Potable | 234.38 | 173.66 | 307.2 | 3.2 |
| m13 | N.S Pedro | 75 | 6 | 207.95 | 527.25 | Potable | 234.38 | 170.45 | 302.88 | 1.8 |
| m14 | N.S Pedro | - | 21.6 | 219.72 | 522.75 | Potable | 234.38 | 180.1 | 302.88 | 1.5 |
| m15 | Vanegas | 31 | 2.7 | 207.95 | 543 | Potable | 222.66 | 170.45 | 327.84 | 1.8 |
| m16 | Vanegas | 42 | 3.9 | 262.88 | 663.75 | Potable | 269.54 | 215.47 | 392.64 | 3.7 |
| m17 | Cedral | 109 | 9.8 | 211.87 | 1165.5 | Agrícola | 222.66 | 173.66 | 1097.76 | 1.3 |
| m18 | Cedral | 62 | 5.3 | 149.09 | 2077.5 | Agrícola | 164.07 | 122.21 | 2049.6 | 1 |
| m19 | Cedral | 38 | 3.3 | 227.56 | 1025.25 | Agrícola | 246.1 | 186.53 | 836.64 | 4.3 |
| m20 | Cedral | - | 9 | 223.64 | 1099.5 | Agrícola | 234.38 | 183.31 | 924.96 | 1.5 |
| m21 | Cedral | 69 | 5.9 | 215.79 | 1537.5 | Agrícola | 234.38 | 176.88 | 1699.68 | 1.2 |
| m22 | Cedral | 52 | 4.6 | 200.1 | 1650 | Agrícola | 210.94 | 164.02 | 1800 | 1.1 |
| m23 | Cedral | 66 | 5.9 | 227.56 | 918.75 | Agrícola | 234.38 | 186.53 | 762.24 | 1 |
| m24 | Vanegas | 57 | 5.3 | 241.3 | 660 | Potable | 269.54 | 197.78 | 360 | 1.2 |
| m25 | San Isidro | 93 | 8 | 211.87 | 495.75 | Potable | 234.38 | 173.66 | 269.76 | 1.5 |

| Muestra | Localidad | Parámetros de Campo | | | | | | | Aniones | |
|---------|---------------|---------------------|--------|------------------|---------|--------------|------------------|--------|-----------------|-------------------|
| | | O.D(%) | O mg/l | HCO ₃ | STD | Uso de Agua | HCO ₃ | Atc.. | SO ₄ | N-NO ₃ |
| m26 | San Isidro | 31 | 2.7 | 211.87 | 612.75 | Potable | 234.38 | 173.66 | 360 | 1.2 |
| m27 | Vanegas | 98 | 8 | 204.02 | 619.5 | Agrícola | 222.66 | 167.23 | 349.92 | 1.9 |
| m28 | N. Dolores | 33 | 2.7 | 200.1 | 775.5 | Potable | 222.66 | 164.02 | 557.76 | 1.3 |
| m29 | N. Dolores | 71 | 5.8 | 204.02 | 840.75 | Agrícola | 234.38 | 167.23 | 587.04 | 1.7 |
| m30 | N. Dolores | 38 | 2.9 | 215.79 | 1105.5 | Agrícola | 257.82 | 176.88 | 924.96 | 0.8 |
| m31 | N. Dolores | 79 | 7.2 | 192.25 | 560.25 | Agrícola | 222.66 | 157.58 | 300 | 2.2 |
| m32 | Limonés | 60 | 5.6 | 257.82 | 425.25 | Potable | 257.82 | | 79.96 | 10.4 |
| m33 | Limonés | 62 | 5.7 | 257.82 | 378.75 | Potable | 257.82 | | 43.39 | 6.8 |
| m34 | La Boca | 25 | 2 | 281.26 | 726 | Potable | 281.26 | | 300 | 9.6 |
| m35 | R. Monjas | 14 | 1.1 | 210.94 | 855 | Potable | 210.94 | | 312.5 | 6.1 |
| m36 | B. Arriba | 80 | 6.9 | 234.38 | 1259.25 | Potable | 234.38 | | 612.48 | 10.4 |
| m37 | La Cruz | 24 | 2 | 145.17 | 1830 | Agrop. | 175.68 | 118.99 | 1800 | 1.6 |
| m38 | Matehuala | 29 | 2.7 | 184.41 | 1890 | Servicios | 199.1 | 151.15 | 1750 | 9.3 |
| m39 | Matehuala | 27 | 2.2 | 227.56 | 3772.5 | Pecuario | 222.52 | 186.53 | 2850 | 15.8 |
| m40 | Matehuala | 15 | 1.3 | 235.41 | 2085 | Servicios | 327.93 | 192.96 | 1750 | 7 |
| m41 | Matehuala | 8 | 0.6 | 231.49 | 2047.5 | Servicios | 257.66 | 189.74 | 2000 | 4.6 |
| m42 | Pocitos | 35 | 3.3 | 345.27 | 751.5 | Potable | 374.78 | 283.01 | 285 | 3.4 |
| m43 | Sr.J. Vanegas | 58 | 4.5 | 235.41 | 598.5 | Pecuario | 257.66 | 192.96 | 290 | 2 |
| m44 | Matehuala | 49 | 4.3 | 219.72 | 1815 | Pecuario | 257.66 | 180.1 | 1680 | 9.2 |
| m45 | C.Blanco | 43 | 3.7 | 74.55 | 2025 | Potable | 117.19 | 61.1 | 1750 | 6.5 |
| m46 | O. Agua | 22 | 2 | 274.65 | 1890 | Agrícola | 292.98 | 225.12 | 1950 | 1.2 |
| m47 | P. Blanca | 67 | 5.9 | 223.64 | 2227.5 | Agrícola | 257.66 | 183.31 | 1650 | 18.4 |
| m48 | Pastoriza | 25 | 2.1 | 180.48 | 281.25 | Potable | 210.94 | 147.94 | 50 | 2.4 |
| m49 | St. Lucía | 20 | 1.7 | 176.56 | 1822.5 | Agrícola | 210.94 | 144.72 | 1800 | 4.1 |
| m50 | Vanegas | 73 | 6.9 | 235.41 | 566.25 | Agrícola | 269.54 | 192.96 | 312.5 | 2.7 |
| m51 | San Isidro | 21 | 1.2 | 258.95 | 1051.5 | Agrícola | 246.1 | 212.26 | 800 | 1 |
| m52 | R. Nuevo | 63 | 5.6 | 125.55 | 2032.5 | Construcción | 128.91 | 102.91 | 2150 | 3.3 |
| m53 | Matehuala | 2 | 0.1 | 302.11 | 1575 | Agrop. | 292.98 | 247.63 | 1800 | 3 |
| m54 | C. Blanco | 68 | 6.3 | 211.87 | 1800 | Agrop. | 246.1 | 173.66 | 1850 | 6 |
| m55 | Matehuala | 38 | 3.2 | 145.17 | 3112.5 | Agrop. | 187.5 | 118.99 | 2750 | 27.6 |
| m56 | Matehuala | 54 | 4.7 | 180.48 | 4110 | Agrícola | 210.94 | 147.94 | 2800 | 43 |
| m57 | Sarabia | 48 | 4.2 | 94.16 | 2400 | Agrícola | 117.19 | 77.18 | 2150 | 10.2 |
| m58 | E. de Abajo | 39 | 3.3 | 125.55 | 1807.5 | Agrícola | 164.07 | 102.91 | 1750 | 15.5 |
| m59 | Cedral | | | 210.81 | 0 | Potable | 210.81 | | 350 | 6.5 |
| m60 | Adjuntas | 70 | 7.4 | 231.49 | 332.25 | Potable | | 269.54 | 7.56 | 7.08 |
| m61 | Jordán | | | 284.46 | 277.5 | Potable | | 281.26 | 1.914 | 8.87 |
| m62 | Alberca | | | 274.65 | 363 | Potable | | 316.42 | 5.74 | 10.62 |

| Muestra | Aniones (mg/l) | | Cationes (mg/l) | | | | Elementos Traza (ppb) | | | | | | | |
|---------|-----------------|------|-----------------|-----|-----|----|-----------------------|-------|-------|----------|------|------|------|------|
| | PO ₄ | F | Na | K | Ca | Mg | Li | B | Al | Si | Sc | Ti | V | Mn |
| m1 | 0.14 | 1.16 | 13 | 2.9 | 389 | 29 | 20.50 | 68.59 | 7.06 | 10200.00 | 2.58 | 1.47 | 1.90 | 1.18 |
| m2 | 0.1 | 1.26 | 12 | 2.9 | 418 | 29 | 23.39 | 79.04 | 22.03 | 10950.00 | 2.98 | 2.12 | 1.53 | 9.15 |

| Muestra | Aniones (mg/l) | | Cationes (mg/l) | | | | Elementos Traza (ppb) | | | | | | | |
|---------|-----------------|------|-----------------|------|-----|----|-----------------------|---------|-------|----------|------|------|-------|--------|
| | PO ₄ | F | Na | K | Ca | Mg | Li | B | Al | Si | Sc | Ti | V | Mn |
| m3 | 0.08 | 1.49 | 18 | 5.4 | 433 | 35 | 49.40 | 101.94 | 25.16 | 13340.00 | 3.69 | 2.53 | 2.59 | 4.35 |
| m4 | 0.06 | 1.48 | 15 | 4.1 | 389 | 29 | 38.08 | 83.53 | 12.72 | 16600.00 | 4.16 | 2.53 | 4.84 | 2.11 |
| m5 | 0.23 | 1.48 | 17 | 3.2 | 377 | 26 | 22.19 | 62.30 | 31.58 | 12880.00 | 3.29 | 2.35 | 2.00 | 3.24 |
| m6 | 0.18 | 1.27 | 18 | 3.1 | 374 | 30 | 18.21 | 55.34 | 17.73 | 10580.00 | 2.87 | 2.14 | 1.88 | 2.26 |
| m7 | 0.13 | 1.33 | 630 | 9.1 | 490 | 57 | 174.95 | 1344.79 | 55.63 | 8050.00 | < | 2.89 | 1.46 | 15.04 |
| m8 | 0.28 | 1.09 | 14 | 2.9 | 373 | 28 | 17.22 | 65.94 | < | 10840.00 | 2.94 | 1.51 | 1.98 | 1.01 |
| m9 | 0.26 | 1.17 | 20 | 3.3 | 411 | 30 | 24.66 | 93.94 | 6.25 | 10020.00 | 2.69 | 1.57 | 1.62 | 2.56 |
| m10 | 0.14 | 1.05 | 14 | 2.9 | 350 | 24 | 19.46 | 65.68 | 6.72 | 10310.00 | 2.75 | 1.62 | 1.85 | 1.08 |
| m11 | 0.06 | 1.07 | 13 | 2.9 | 370 | 28 | 18.13 | 62.52 | < | 10020.00 | 2.64 | 1.53 | 1.80 | 1.25 |
| m12 | 0.11 | 0.05 | 20 | 4.3 | 178 | 16 | 19.63 | 52.64 | < | 23100.00 | 6.66 | 3.43 | 3.60 | 0.79 |
| m13 | 0.12 | 0.48 | 22 | 5.5 | 179 | 16 | 26.55 | 59.32 | 4.31 | 24800.00 | 7.55 | 3.93 | 5.35 | 0.76 |
| m14 | 0.18 | 0.44 | 20 | 5.7 | 184 | 16 | 21.10 | 55.78 | 5.06 | 27800.00 | 8.48 | 4.41 | 4.00 | 1.62 |
| m15 | 0.15 | 0.54 | 28 | 3.1 | 173 | 17 | 16.99 | 76.27 | < | 11400.00 | 3.54 | 1.76 | 1.69 | 0.53 |
| m16 | 0.04 | 0.56 | 17 | 2.3 | 241 | 21 | 9.76 | 38.80 | < | 7290.00 | 2.09 | 1.08 | 0.85 | 0.89 |
| m17 | 0.05 | 1.51 | 25 | 4.1 | 505 | 37 | 36.79 | 114.07 | < | 9460.00 | 2.59 | 1.45 | 1.50 | 2.65 |
| m18 | 0.16 | 1.41 | 290 | 30.0 | 674 | 54 | 227.56 | 763.95 | 11.30 | 14960.00 | < | 2.22 | 1.95 | 157.66 |
| m19 | 0.08 | 1.42 | 13 | 3.1 | 396 | 32 | 15.44 | 63.02 | 9.60 | 8720.00 | 2.42 | 1.39 | 1.41 | 5.13 |
| m20 | 0.11 | 1.64 | 17 | 3.4 | 435 | 35 | 21.16 | 82.34 | 4.90 | 7090.00 | < | 1.22 | 1.36 | 1.68 |
| m21 | 0.88 | 1.70 | 38 | 5.7 | 693 | 34 | 40.02 | 97.96 | < | 25133.33 | 6.57 | 3.48 | 0.23 | 42.84 |
| m22 | 0.21 | 1.60 | 43 | 6.9 | 742 | 40 | 48.42 | 119.44 | < | 25466.67 | 6.65 | 3.34 | 0.41 | 43.18 |
| m23 | 0.33 | 0.63 | 12 | 3.1 | 353 | 28 | 22.11 | 61.20 | < | 26200.00 | 7.02 | 3.53 | 0.76 | 14.97 |
| m24 | 0.05 | 0.58 | 15 | 2.3 | 231 | 18 | 9.97 | 42.16 | < | 6871.09 | 1.84 | 0.99 | 0.79 | 0.66 |
| m25 | 0.35 | 0.56 | 25 | 3.9 | 164 | 15 | 16.77 | 69.53 | < | 20100.00 | 5.73 | 3.02 | 3.14 | 0.14 |
| m26 | 0.19 | 0.53 | 47 | 5.4 | 178 | 17 | 31.57 | 123.24 | 3.05 | 30600.00 | 8.80 | 4.58 | 6.70 | 0.30 |
| m27 | 0.1 | 0.65 | 42 | 6.3 | 180 | 18 | 54.34 | 128.60 | < | 28000.00 | 8.19 | 4.08 | 10.71 | 0.16 |
| m28 | 0.11 | 0.63 | 35 | 6.8 | 265 | 19 | 26.44 | 119.32 | 4.01 | 15716.66 | 4.55 | 2.43 | 4.84 | 0.82 |
| m29 | 0.13 | 0.91 | 24 | 3.9 | 290 | 21 | 25.44 | 141.88 | < | 11600.00 | 3.22 | 1.72 | 1.93 | 0.56 |
| m30 | 0.16 | 1.26 | 14 | 3.8 | 462 | 27 | 19.66 | 79.54 | < | 14720.00 | 3.85 | 1.96 | 1.63 | 2.54 |
| m31 | 0.09 | 0.72 | 11 | 2.8 | 187 | 21 | 21.31 | 42.60 | 2.10 | 28700.00 | 8.17 | 4.14 | 3.43 | 1.16 |
| m32 | 0.28 | 0.28 | 18 | 1.8 | 127 | 11 | 16.21 | 61.26 | < | 11300.00 | 3.57 | 1.78 | 4.64 | 0.16 |
| m33 | 0.21 | 0.23 | 12 | 1.4 | 119 | 8 | 12.06 | 40.43 | < | 11900.00 | 3.51 | 1.78 | 3.18 | 1.88 |
| m34 | 0.53 | 0.42 | 82 | 3.3 | 158 | 23 | 29.95 | 281.20 | < | 9813.80 | 2.53 | 1.32 | 0.24 | 0.94 |
| m35 | 0.49 | 0.97 | 171 | 4.6 | 128 | 18 | 58.44 | 426.02 | 9.34 | 10640.00 | 2.75 | 1.77 | 4.97 | 2.22 |
| m36 | 0.09 | 0.58 | 192 | 4.9 | 236 | 49 | 70.69 | 929.34 | 16.44 | 9566.67 | < | 1.89 | 0.87 | 2.86 |
| m37 | 0.62 | 1.65 | 98.0 | 11 | 670 | 65 | 102.95 | 344.49 | 12.36 | 19933.33 | 5.00 | 3.38 | 2.98 | 5.73 |
| m38 | 0.64 | 1.64 | 73.0 | 9 | 683 | 46 | 56.94 | 298.45 | 10.61 | 22466.67 | 5.83 | 3.28 | 13.55 | 2.03 |
| m39 | 0.57 | 1.54 | 814.0 | 11 | 713 | 79 | 133.58 | 3003.50 | 53.78 | 16931.20 | < | 3.52 | 4.59 | 10.56 |
| m40 | 6.5 | 1.57 | 176.0 | 7 | 719 | 49 | 93.71 | 895.52 | 0.77 | 22200.00 | 5.37 | 2.89 | 15.15 | 11.42 |
| m41 | 12.5 | 1.6 | 173.0 | 7 | 707 | 42 | 79.20 | 653.09 | 10.91 | 21520.00 | 5.40 | 3.26 | 23.01 | 8.46 |
| m42 | 0.45 | 1.41 | 135.0 | 3 | 141 | 16 | 45.02 | 676.36 | 4.69 | 12266.62 | 3.12 | 1.69 | 6.86 | 25.36 |
| m43 | 0.97 | 0.57 | 13.0 | 2 | 191 | 18 | 7.91 | 42.39 | < | 6480.00 | 1.71 | 0.92 | 0.40 | 0.37 |
| m44 | 1.21 | 1.43 | 64.0 | 10 | 720 | 38 | 38.51 | 224.41 | < | 19433.33 | 4.95 | 2.77 | 5.40 | 1.61 |
| m45 | 0.44 | 1.59 | 71.0 | 19 | 687 | 42 | 38.54 | 144.70 | 6.70 | 22866.66 | 5.71 | 3.04 | 13.64 | 5.47 |

| Muestra | Aniones (mg/l) | | Cationes (mg/l) | | | | Elementos Traza (ppb) | | | | | | | |
|---------|-----------------|------|-----------------|------|------|-----|-----------------------|---------|-------|----------|------|------|-------|--------|
| | PO ₄ | F | Na | K | Ca | Mg | Li | B | Al | Si | Sc | Ti | V | Mn |
| m46 | 0.73 | 1.83 | 65.0 | 17 | 710 | 59 | 46.37 | 381.32 | 12.43 | 26066.66 | 6.45 | 3.60 | 5.18 | 28.93 |
| m47 | 0.11 | 0.84 | 446.0 | 6 | 362 | 64 | 100.70 | 928.13 | < | 7233.33 | < | 1.42 | 0.46 | 2.28 |
| m48 | 0.31 | 0.3 | 23.0 | 5 | 75 | 8 | 22.17 | 91.95 | < | 25900.00 | 6.81 | 3.52 | 5.17 | 3.18 |
| m49 | 1.03 | 1.46 | 71.0 | 15 | 708 | 37 | 45.35 | 224.35 | < | 21766.66 | 5.63 | 3.36 | 7.18 | 27.56 |
| m50 | 0.16 | 0.54 | 14.0 | 2 | 185 | 14 | 9.74 | 34.47 | < | 7825.00 | 2.09 | 1.09 | 0.97 | 6.35 |
| m51 | 0.23 | 0.72 | 52.0 | 6 | 333 | 30 | 34.20 | 213.50 | < | 27600.00 | 7.52 | 3.90 | 7.92 | 0.76 |
| m52 | 0.2 | 1.6 | 65.0 | 12 | 787 | 52 | 52.00 | -0.10 | 40.00 | 26200.00 | 8.00 | 4.80 | 7.32 | 35.60 |
| m53 | 1.04 | 1.4 | 93.0 | 9 | 714 | 31 | 39.75 | 200.66 | 8.88 | 21566.67 | 5.45 | 3.14 | 14.98 | 117.54 |
| m54 | 4.1 | 1.57 | 75.0 | 9 | 696 | 48 | 62.61 | 367.65 | 11.40 | 34662.00 | 8.43 | 4.82 | 13.15 | 23.17 |
| m55 | 0.07 | 1.56 | 568.0 | 13 | 702 | 103 | 135.94 | 1314.21 | 14.12 | 7938.00 | < | 1.63 | 1.23 | 5.63 |
| m56 | 0.17 | 1.62 | 836.0 | 13 | 705 | 111 | 131.35 | 1568.04 | 24.20 | 11470.00 | < | 3.22 | 2.19 | 4.64 |
| m57 | 0.34 | 1.71 | 226.0 | 12 | 700 | 74 | 48.54 | 311.32 | 12.29 | 33200.00 | 9.05 | 5.02 | 14.18 | 13.75 |
| m58 | 0.33 | 1.48 | 48.0 | 19 | 720 | 30 | 31.56 | 121.47 | < | 24766.64 | 6.37 | 3.30 | 8.33 | 1.82 |
| m59 | 0.1 | 0.48 | 14.0 | 2.86 | 202 | 17 | 10.00 | 31.00 | < | 9670.00 | 3.00 | 1.40 | 1.12 | 21.10 |
| m60 | 1.6 | 5.00 | 0.009 | 5.0 | 2.09 | 107 | 5.00 | 31.00 | < | 6360.00 | 2.00 | 0.90 | 0.16 | 47.30 |
| m61 | 2 | 3.00 | 0.003 | 2.0 | 0.51 | 91 | -1.00 | 9.00 | 3.00 | 3900.00 | < | 0.60 | 0.37 | 0.40 |
| m62 | 2.4 | 4.00 | 0.01 | 2.0 | 0.68 | 123 | -1.00 | 10.00 | 3.00 | 4280.00 | < | 0.60 | 0.38 | 0.20 |

| Muestra | Elementos Traza (ppb) | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------------|------|-------|-------|------|------|------|---------|-------|----------|------|-------|------|--|
| | Fe | Ni | Cu | Zn | Ge | As | Se | Br | Rb | Sr | Y | Mo | Sb | |
| m1 | 508.10 | 1.02 | 1.60 | 14.56 | 0.24 | 2.16 | 4.28 | 115.53 | 4.38 | 7240.00 | 0.07 | 4.17 | 0.39 | |
| m2 | 634.54 | 1.08 | 1.75 | 39.23 | 0.25 | 3.71 | 2.21 | 107.50 | 4.49 | 8275.00 | 0.09 | 4.27 | 0.19 | |
| m3 | 691.39 | 1.00 | 2.09 | 18.66 | 0.30 | 3.22 | 0.70 | 90.30 | 5.27 | 8540.00 | 0.10 | 4.44 | 0.21 | |
| m4 | 537.92 | 2.19 | 1.18 | 5.82 | 0.35 | 2.41 | 7.88 | 97.48 | 5.49 | 10360.00 | 0.08 | 5.87 | 0.87 | |
| m5 | 488.12 | < | 1.79 | 5.22 | 0.27 | 2.10 | 2.85 | 141.71 | 4.38 | 8420.00 | 0.10 | 3.67 | 0.29 | |
| m6 | 460.75 | 2.60 | 6.49 | 5.82 | 0.23 | 1.83 | 3.19 | 212.10 | 3.89 | 6580.00 | 0.08 | 5.06 | 0.32 | |
| m7 | 709.27 | 4.43 | 13.58 | 33.16 | 0.30 | 0.80 | 1.76 | 4990.64 | 9.99 | 12350.00 | 0.22 | 11.14 | 0.10 | |
| m8 | 464.17 | < | 1.35 | 2.66 | 0.22 | 2.08 | 3.26 | 228.84 | 3.85 | 6240.00 | 0.05 | 3.71 | 0.30 | |
| m9 | 546.10 | < | 1.12 | 1.86 | 0.24 | 1.95 | 3.51 | 147.46 | 4.86 | 7500.00 | 0.06 | 4.51 | 0.21 | |
| m10 | 426.16 | < | 2.22 | 32.32 | 0.20 | 2.04 | 1.72 | 126.32 | 4.08 | 6310.00 | 0.06 | 3.92 | 0.30 | |
| m11 | 453.04 | < | 1.05 | 3.26 | 0.18 | 1.86 | 1.29 | 109.45 | 4.12 | 6480.00 | 0.06 | 3.72 | 0.30 | |
| m12 | 219.70 | < | 0.49 | 7.59 | 0.19 | 2.28 | 1.39 | 159.31 | 6.55 | 3050.00 | 0.03 | 4.22 | 0.28 | |
| m13 | 234.49 | < | 0.90 | 12.49 | 0.28 | 3.40 | 1.47 | 102.56 | 9.19 | 3490.00 | 0.03 | 4.26 | 0.14 | |
| m14 | 229.34 | 0.37 | 2.01 | 13.92 | 0.27 | 2.68 | 1.29 | 88.17 | 12.65 | 3190.00 | 0.04 | 3.63 | 0.14 | |
| m15 | 220.66 | < | 1.16 | 3.23 | 0.12 | 1.06 | 0.61 | 103.10 | 6.83 | 2800.00 | 0.03 | 4.28 | 0.07 | |
| m16 | 308.90 | < | 1.26 | 20.18 | 0.09 | 0.85 | 3.74 | 286.04 | 2.84 | 3260.00 | 0.03 | 2.33 | 0.78 | |
| m17 | 645.22 | < | 1.40 | 4.01 | 0.24 | 1.74 | 0.72 | 174.97 | 6.05 | 10420.00 | 0.08 | 5.46 | 0.12 | |
| m18 | 756.26 | 3.08 | 4.91 | 5.75 | 0.80 | 0.91 | < | 829.56 | 34.78 | 11600.00 | 0.11 | 29.87 | 0.07 | |
| m19 | 624.14 | 0.65 | 1.44 | 29.45 | 0.24 | 1.43 | 1.94 | 97.12 | 4.81 | 7880.00 | 0.07 | 4.41 | 0.16 | |
| m20 | 561.39 | 0.67 | 1.53 | 73.24 | 0.23 | 1.73 | 0.91 | 116.90 | 4.92 | 7930.00 | 0.07 | 4.86 | 0.16 | |
| m21 | 948.89 | < | 1.46 | 5.63 | 0.32 | 7.04 | < | 345.54 | 4.58 | 15566.67 | 0.15 | 21.54 | 0.50 | |
| m22 | 1034.98 | 1.11 | 1.25 | 4.26 | 0.31 | 7.00 | < | 482.92 | 4.87 | 15533.33 | 0.13 | 26.15 | 0.36 | |

| Elementos Traza (ppb) | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------|------|-------|--------|------|----------|-------|---------|------|----------|------|--------|-------|
| Muestra | Fe | Ni | Cu | Zn | Ge | As | Se | Br | Rb | Sr | Y | Mo | Sb |
| m23 | 624.07 | < | 0.70 | 1.61 | 0.25 | 1.87 | 0.55 | 73.70 | 3.71 | 19240.00 | 0.13 | 3.42 | 0.29 |
| m24 | 268.56 | < | 0.68 | 21.68 | 0.08 | 0.88 | 3.56 | 244.62 | 2.67 | 3056.99 | 0.04 | 2.30 | 0.80 |
| m25 | 188.61 | < | 1.18 | -0.50 | 0.19 | 2.68 | 1.23 | 66.12 | 4.96 | 2670.00 | 0.02 | 3.90 | 0.14 |
| m26 | 215.27 | < | 1.22 | -0.50 | 0.27 | 4.66 | 1.44 | 89.57 | 5.52 | 3570.00 | 0.03 | 4.81 | 0.12 |
| m27 | 204.26 | < | 1.16 | -0.50 | 0.22 | 6.21 | 1.06 | 114.21 | 7.20 | 5750.00 | 0.04 | 7.86 | 0.12 |
| m28 | 224.84 | < | 1.21 | 2.32 | 0.20 | 2.05 | 1.07 | 70.03 | 4.88 | 3700.00 | 0.04 | 3.30 | 0.07 |
| m29 | 361.81 | < | 0.95 | 2.81 | 0.19 | 1.79 | 1.42 | 158.83 | 5.07 | 5100.00 | 0.05 | 5.28 | 0.31 |
| m30 | 556.46 | < | 0.82 | 4.57 | 0.31 | 2.09 | 0.90 | 70.71 | 8.84 | 7490.00 | 0.09 | 4.72 | 0.08 |
| m31 | 233.34 | < | 0.57 | 4.34 | 0.10 | 3.18 | 1.19 | 118.03 | 3.20 | 3550.00 | 0.03 | 4.05 | 0.90 |
| m32 | 157.14 | < | 0.59 | 5.19 | 0.04 | 1.38 | 2.84 | 516.04 | 0.76 | 1220.00 | 0.01 | 1.86 | 0.10 |
| m33 | 157.26 | < | 0.59 | 111.35 | 0.05 | 0.50 | 3.17 | 437.87 | 0.41 | 797.32 | 0.02 | 2.50 | 0.07 |
| m34 | 191.22 | < | 1.58 | 2.55 | 0.15 | 0.26 | 11.28 | 674.14 | 1.91 | 4271.22 | 0.04 | 4.42 | 0.08 |
| m35 | 163.75 | < | 3.28 | 12.58 | 0.28 | 2.03 | 2.07 | 1450.71 | 4.73 | 3800.00 | 0.05 | 10.31 | 0.03 |
| m36 | 330.66 | < | 3.19 | 10.60 | 0.17 | 0.45 | 6.18 | 2021.02 | 3.41 | 6900.00 | 0.10 | 3.76 | 0.06 |
| m37 | 893.26 | 1.05 | 2.90 | 29.51 | 0.36 | 4.93 | 5.11 | 678.52 | 9.01 | 13200.00 | 0.14 | 10.24 | 0.22 |
| m38 | 808.55 | < | 2.04 | 7.88 | 0.19 | 65.99 | 5.07 | 835.58 | 4.08 | 13966.67 | 0.14 | 12.83 | 0.39 |
| m39 | 722.38 | 4.96 | 14.50 | 56.26 | 0.23 | 10.08 | 10.94 | 4798.37 | 4.89 | 10485.80 | 0.21 | 13.95 | 0.21 |
| m40 | 741.92 | 2.06 | 4.24 | 2.74 | 0.28 | 13160.00 | 6.84 | 853.03 | 3.90 | 12580.00 | 0.13 | 69.09 | 0.43 |
| m41 | 803.87 | 4.04 | 4.79 | 9.81 | 0.29 | 9480.00 | 3.92 | 573.01 | 4.22 | 12560.00 | 0.14 | 51.13 | 0.44 |
| m42 | 145.92 | < | 2.89 | 1.78 | 0.07 | 7.87 | 2.08 | 488.33 | 2.30 | 3499.99 | 0.05 | 22.44 | 0.06 |
| m43 | 225.33 | 0.60 | 0.33 | 7.70 | 0.07 | 2.46 | 3.30 | 167.72 | 3.45 | 2730.00 | 0.02 | 2.52 | 1.84 |
| m44 | 872.82 | 1.23 | 2.23 | 6.66 | 0.19 | 833.80 | 5.00 | 606.87 | 5.05 | 12633.33 | 0.11 | 21.54 | 0.59 |
| m45 | 895.70 | < | 1.95 | 281.30 | 0.12 | 18.79 | 3.24 | 1340.29 | 5.51 | 12633.33 | 0.11 | 19.20 | 0.52 |
| m46 | 912.64 | 2.21 | 2.99 | 58.48 | 0.18 | 391.28 | 0.71 | 505.50 | 9.37 | 15833.33 | 0.15 | 126.56 | 6.68 |
| m47 | 403.54 | 4.16 | 6.15 | 4.99 | 0.14 | 1.58 | 12.07 | 2864.92 | 4.50 | 14266.67 | 0.14 | 4.87 | 0.04 |
| m48 | 262.40 | < | 1.14 | 255.11 | 0.11 | 10.74 | 1.00 | 103.03 | 3.34 | 1030.00 | 0.01 | 2.49 | 0.20 |
| m49 | 873.85 | 1.22 | 2.34 | 40.51 | 0.23 | 581.69 | 2.65 | 662.56 | 6.25 | 13133.33 | 0.13 | 13.60 | 1.66 |
| m50 | 238.81 | < | 0.69 | 7.92 | 0.09 | 0.61 | 1.43 | 155.26 | 3.23 | 2470.00 | 0.02 | 2.64 | 0.10 |
| m51 | 372.51 | < | 1.13 | 4.29 | 0.39 | 4.85 | 1.17 | 88.45 | 6.67 | 6280.00 | 0.06 | 4.08 | 0.09 |
| m52 | 1556.00 | 2.80 | 5.20 | 11.20 | 0.32 | 54.40 | 2.00 | 812.00 | 5.60 | 20560.00 | 0.22 | 15.20 | 2.64 |
| m53 | 1033.30 | 9.13 | 3.43 | 5.60 | 0.30 | 849.40 | 0.67 | 631.41 | 5.40 | 11766.67 | 0.15 | 17.02 | 0.52 |
| m54 | 1352.83 | 4.76 | 4.63 | 6.02 | 0.43 | 8162.00 | 9.98 | 926.81 | 7.74 | 20511.00 | 0.20 | 35.60 | 1.23 |
| m55 | 955.06 | 5.42 | 8.50 | 5.23 | 0.23 | 8.36 | 15.13 | 4337.01 | 6.86 | 13171.20 | 0.18 | 16.21 | -0.06 |
| m56 | 1105.36 | 8.52 | 10.34 | 21.35 | 0.30 | 4.83 | 18.79 | 7034.87 | 5.36 | 12728.00 | 0.20 | 14.90 | -0.07 |
| m57 | 1148.30 | 1.90 | 3.90 | 670.86 | 0.09 | 16.85 | 1.31 | 1553.76 | 3.88 | 11550.00 | 0.09 | 26.72 | 0.39 |
| m58 | 985.41 | < | 1.22 | 6.32 | 0.22 | 18.37 | 1.83 | 735.09 | 5.88 | 12333.32 | 0.11 | 7.45 | 0.55 |
| m59 | 556.21 | 1.30 | 0.50 | 18.10 | 0.10 | 0.80 | 2.20 | 365.00 | 3.70 | 3060.00 | 0.02 | 2.50 | 0.31 |
| m60 | 218.03 | 0.90 | 0.90 | 32.90 | 0.00 | 8.56 | 1.50 | 27.00 | 1.03 | 953.00 | 0.03 | 1.20 | 2.09 |
| m61 | 150.01 | < | 0.30 | 1.00 | < | 1.35 | 0.20 | 26.00 | 0.49 | 249.00 | 0.01 | 0.20 | 0.34 |
| m62 | 183.28 | < | -0.20 | 2.10 | < | 1.99 | 0.60 | 26.00 | 0.27 | 614.00 | 0.04 | 0.50 | 2.33 |

Apéndice 2. Parámetros físicos y químicos del segundo muestreo.

| Parámetros de Campo | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------|---------|-------|-----------|--------|------------|-------|-------|------|---------|--------|---------------|
| muestra | X | Y | Censo | Tipo | Prof.m | Fecha | N.E | T(°C) | pH | Eh (mV) | Eh | EC μ S/cm |
| m1 | 325159 | 2636036 | 25 | pozo | 100 | 03/11/2003 | 72 | 23.3 | 6.72 | 425 | 625.15 | 1471 |
| m2 | 325632 | 2635420 | 19 | pozo | 90 | 03/11/2003 | | 23.5 | 6.72 | 414 | 613.96 | 1520 |
| m3 | 324996 | 2635198 | 17 | pozo | 90 | 03/11/2003 | 61 | 23.3 | 7.27 | 367 | 567.15 | 1648 |
| m4 | 324783 | 2634774 | 13 | pozo | 80 | 04/11/2003 | | 22.1 | 7.04 | 358 | 559.26 | 1343 |
| m5 | 325035 | 2634941 | 16 | pozo | 80 | 03/11/2003 | | 22.5 | 6.81 | 416 | 616.89 | 1506 |
| m6 | 324756 | 2635002 | 15 | pozo | 58 | 03/11/2003 | | 20.8 | 6.85 | 434 | 636.47 | 1533 |
| m7 | 326357 | 2640506 | 27 | pozo | 150 | 05/11/2003 | | 23.7 | 7.05 | 353 | 552.78 | 4530 |
| m8 | 324550 | 2632422 | 26 | pozo | 60 | 04/11/2003 | | 21.1 | 6.68 | 390 | 592.19 | 1497 |
| m9 | 323728 | 2637201 | 1 | pozo | 160 | 30/10/2003 | | 23.4 | 6.73 | 335 | 535.06 | 1628 |
| m10 | 322887 | 2637487 | 2 | pozo | 150 | 03/11/2003 | 73 | 24.1 | 6.77 | 447 | 646.41 | 1433 |
| m11 | 322777 | 2637691 | 3 | pozo | 100 | 03/11/2003 | 78 | 23.7 | 6.78 | 420 | 619.78 | 1418 |
| m12 | 316881 | 2642412 | 45 | pozo | 200 | 05/11/2003 | | 23.5 | 7.04 | 373 | 572.96 | 842 |
| m13 | 316570 | 2643275 | 44 | pozo | | 05/11/2003 | | 23.7 | 7.01 | 368 | 567.78 | 841 |
| m14 | 316106 | 2643053 | 46 | pozo | 150 | 05/11/2003 | | 22 | 7.07 | 313 | 514.36 | 744 |
| m15 | 314646 | 2641944 | 52 | pozo | 120 | 09/11/2003 | | 22.7 | 7.06 | 353 | 553.71 | 850 |
| m16 | 312054 | 2643061 | 49 | pozo | 67 | 08/11/2003 | | 21.1 | 6.82 | 387 | 589.19 | 1012 |
| m17 | 324727 | 2637266 | 10 | pozo | | 04/11/2003 | | 22.5 | 6.81 | 321 | 521.89 | 1935 |
| m20 | 323389 | 2637109 | 5 | pozo | 90 | 03/11/2003 | | 23.4 | 6.72 | 4.22 | 204.28 | 1770 |
| m21 | 323183 | 2634260 | 33 | pozo | 180 | 04/11/2003 | | 20.7 | 6.77 | 13 | 215.56 | 2740 |
| m22 | 323492 | 2633973 | 34 | pozo | | 04/11/2003 | 61.53 | 21.3 | 6.7 | 110 | 312.01 | 2700 |
| m24 | 311886 | 2642922 | 48 | pozo | 78 | 09/11/2003 | 56.94 | 22.5 | 6.95 | 333 | 533.89 | 1010 |
| m25 | 317815 | 2641304 | 41 | pozo | 150 | 05/11/2003 | | 22.3 | 7.15 | 362 | 563.08 | 792 |
| m26 | 318240 | 2642053 | 42 | pozo | 150 | 05/11/2003 | | 23.9 | 7.12 | 346 | 545.59 | 946 |
| m27 | 316465 | 2642588 | 53 | pozo | 150 | 08/11/2003 | | 26.1 | 6.98 | 347 | 544.55 | 948 |
| m28 | 319501 | 2640664 | 39 | pozo | 150 | 05/11/2003 | 53.45 | 25 | 6.85 | 350 | 548.57 | 1250 |
| m30 | 320459 | 2643142 | 61 | pozo | 155 | 08/11/2003 | | 29.1 | 6.83 | 379 | 573.76 | 1767 |
| m31 | 321340 | 2638960 | 58 | pozo | | 08/11/2003 | | 21 | 7.09 | 384 | 586.28 | 890 |
| m32 | 320837 | 2618482 | 70 | manantial | 0 | 06/11/2003 | | 19.1 | 7.45 | 321 | 525.05 | 620 |
| m33 | 321144 | 2617641 | 71 | pozo | | 06/11/2003 | | 19.6 | 7.02 | 355 | 558.58 | 563 |
| m34 | 323882 | 2616903 | 72 | pozo | | 06/11/2003 | | 25 | 7.03 | 329 | 527.57 | 1055 |
| m35 | 323074 | 2629392 | 74 | pozo | | 06/11/2003 | | 22.6 | 7.14 | 362 | 562.80 | 1360 |
| m36 | 322937 | 2626181 | 75 | pozo | | 06/11/2003 | | 22.8 | 6.92 | 363 | 563.61 | 1980 |
| m37 | 328488 | 2630175 | 32 | pozo | 100 | 02/11/2003 | | 22 | 6.77 | | | 3090 |
| m38 | 332534 | 2619013 | 78 | noria | 10 | 02/11/03 | | 19.1 | 6.78 | 262 | 466.05 | 3160 |
| m39 | 333040 | 2614892 | 89 | pozo | 120 | 01/11/2003 | 19.80 | 22.3 | 6.99 | 69 | 270.08 | 5570 |
| m40 | 333150 | 2617271 | 84 | pozo | | 02/11/2003 | | 21.4 | 6.52 | 175 | 376.91 | 3310 |
| m41 | 333157 | 2617300 | 85 | pozo | | 02/11/2003 | | 21.8 | 6.56 | 243 | 444.54 | 3120 |
| m43 | 310809 | 2637879 | 22 | manantial | 0 | 09/11/2003 | | 27.4 | 6.8 | 410 | 606.34 | 928 |
| m44 | 334873 | 2617486 | 93 | pozo | 38 | 06/11/2003 | | 21.3 | 6.58 | 368 | 570.01 | 2930 |
| m45 | 339004 | 2616786 | 86 | pozo | 120 | 01/11/2003 | 19.80 | 22.7 | 7.18 | 61 | 261.71 | 3000 |

Parámetros de Campo

| Muestra | X | Y | Censo | Tipo | Prof.m | Fecha | N.E | T(°C) | pH | Eh (mV) | Eh | EC μ S/cm |
|---------|--------|---------|-------|-----------|--------|------------|------|-------|------|---------|--------|---------------|
| m46 | 332402 | 2619918 | 100 | pozo | 9 | 06/11/2003 | 5.50 | 18 | 6.94 | 326 | 531.07 | 2830 |
| m47 | 332507 | 2606963 | 87 | pozo | | 31/10/2003 | | 21.9 | 7.28 | 85 | 286.45 | 3720 |
| m49 | 337184 | 2604582 | 92 | pozo | | 09/11/2003 | 10 | 22.7 | 6.87 | 358 | 558.71 | 2950 |
| m50 | 314179 | 2641891 | 51 | pozo | 184 | 08/11/2003 | | 21 | 6.86 | 388 | 590.28 | 889 |
| m51 | 318933 | 2642139 | 40 | pozo | 150 | 05/11/2003 | | 23.6 | 6.85 | 345 | 544.87 | 1663 |
| m52 | 334528 | 2621094 | 104 | tajo | 0 | 02/11/2003 | 0 | 26.9 | 9.47 | | 196.81 | 2300 |
| m53 | 333925 | 2616341 | 105 | noria | 10 | 02/11/2003 | 4 | 21.9 | 6.67 | 312 | 513.45 | 3100 |
| m54 | 336327 | 2618895 | 106 | galería | | 02/11/2003 | 0 | 20.8 | 7.44 | 79 | 281.47 | 2790 |
| m56 | 332515 | 2613838 | 107 | pozo | | 31/10/2003 | 51 | 22.8 | 6.84 | 103 | 303.61 | 5870 |
| m57 | 335197 | 2607104 | 102 | pozo | 24 | 31/10/2003 | 21 | 29.1 | 7.21 | 140 | 334.76 | 3380 |
| m58 | 336868 | 2603699 | 88 | pozo | 12 | 31/10/2003 | 13 | 22 | 6.95 | 103 | 304.36 | 2780 |
| m63 | 332836 | 2619479 | 108 | noria | | 02/11/2003 | 6.86 | 20.2 | 7.03 | 103 | 306.03 | 2780 |
| m64 | 316465 | 2642588 | 43 | pozo | | | | 22.7 | 7.02 | 373 | 573.71 | 845 |
| m65 | 331956 | 2620152 | 116 | manantial | 0 | 06/11/2003 | 0 | 20.4 | 7.28 | 357 | 559.84 | 3060 |
| m66 | 332559 | 2618507 | 101 | noria | 20 | 06/11/2003 | | 21 | 6.7 | 366 | 568.28 | 3270 |
| m67 | 321039 | 2640412 | 117 | pozo | | 08/11/2003 | | 22.7 | 6.92 | 380 | 580.71 | 901 |

Parámetros de Campo

Aniones (mg/l)

| Muestra | O.D(%) | O mg/l | HCO ₃ | STD | Localidad | Uso | HCO ₃ | alc. | Cl | SO ₄ | N-NO ₃ |
|---------|--------|--------|------------------|---------|------------|----------|------------------|--------|--------|-----------------|-------------------|
| m1 | 11 | 0.9 | 248.48 | 1103.25 | Cedral | Agrícola | 230.336 | 203.68 | 13.54 | 749.76 | 1.694 |
| m2 | 17 | 1.4 | 274.62 | 1140 | Cedral | Agrícola | 252.296 | 225.12 | 15.24 | 685.92 | 1.288 |
| m3 | 60 | 5 | 202.06 | 1236 | Cedral | Agrícola | 241.316 | 165.62 | 16.66 | 720 | 5.796 |
| m4 | 35 | 3 | 196.18 | 1007.25 | Cedral | Agrícola | 197.457 | 160.8 | 15.24 | 709.92 | 1.4 |
| m5 | 37 | 3.3 | 212.52 | 1129.5 | Cedral | Agrícola | 219.356 | 174.2 | 18.61 | 774.72 | 3.99 |
| m6 | 69 | 6.2 | 287.72 | 1149.75 | Cedral | Agrícola | 252.296 | 235.84 | 30.48 | 662.4 | 6.79 |
| m7 | 1 | 0 | 202.72 | 3397.5 | C.Flores | Agrícola | 175.497 | 166.16 | 365.87 | 1583.04 | 16.8 |
| m8 | 44 | 3.9 | 248.49 | 1122.75 | Cedral | Agrícola | 263.276 | 203.68 | 27.08 | 687.36 | 5.39 |
| m9 | 48 | 4 | 219.72 | 1221 | Cedral | Potable | 237.29 | 180.1 | 24.39 | 749.76 | 2.492 |
| m10 | 43 | 3.6 | 222.33 | 1074.75 | Cedral | Potable | 219.356 | 182.24 | 13.54 | 739.68 | 2.296 |
| m11 | 39 | 3.2 | 299.17 | 1063.5 | Cedral | Potable | 241.316 | 245.22 | 11.84 | 660 | 2.394 |
| m12 | 40 | 3.4 | 235.41 | 631.5 | N.S. Pedro | Potable | 219.356 | 192.96 | 15.24 | 254.88 | 2.8 |
| m13 | 33 | 2.8 | 244.57 | 630.75 | N.S. Pedro | Potable | 230.336 | 200.46 | 13.54 | 284.64 | 1.988 |
| m14 | 32 | 2.9 | 241.95 | 558 | N.S. Pedro | Potable | 263.276 | 198.32 | 13.54 | 177.12 | 2.394 |
| m15 | 32 | 2.8 | 235.41 | 637.5 | Vanegas | Potable | 230.336 | 192.96 | 11.84 | 231.84 | 1.596 |
| m16 | 69 | 6.3 | 264.84 | 759 | Vanegas | Potable | 263.276 | 217.08 | 20.31 | 349.92 | 3.094 |
| m17 | 47 | 4 | 280.53 | 1451.25 | Cedral | Agrícola | 2199.356 | 229.94 | 20.20 | 1039.68 | 1.4 |
| m20 | 35 | 3 | 322.06 | 1327.5 | Cedral | Agrícola | 241.316 | 263.98 | 15.24 | 924.96 | 1.498 |
| m21 | 1 | 0 | 202.72 | 2055 | Cedral | Agrícola | 208.376 | 166.16 | 38.92 | 1749.6 | 1.694 |
| m22 | 44 | 3.9 | 201.41 | 2025 | Cedral | Agrícola | 219.356 | 165.09 | 43.96 | 1535.52 | 1.498 |
| m24 | 36 | 3.1 | 255.03 | 757.5 | Vanegas | Potable | 263.276 | 209.04 | 22.01 | 278.88 | 3.192 |
| m25 | 69 | 6 | 209.25 | 594 | San Isidro | Potable | 230.336 | 171.52 | 13.54 | 244.8 | 1.596 |
| m26 | 14 | 1.4 | 232.14 | 709.5 | San Isidro | Potable | 230.336 | 190.28 | 13.54 | 217.44 | 1.596 |

| Muestra | Parámetros de Campo | | | | | | Aniones (mg/l) | | | | |
|---------|---------------------|--------|------------------|---------|-------------|-----------|------------------|--------|--------|-----------------|-------------------|
| | O.D(%) | O mg/l | HCO ₃ | STD | Localidad | Uso | HCO ₃ | alc. | Cl | SO ₄ | N-NO ₃ |
| m27 | 64 | 5.2 | 235.41 | 711 | Vanegas | Agrícola | 219.356 | 192.96 | 13.53 | 339.84 | 2.198 |
| m28 | 15 | 1.2 | 208.6 | 937.5 | N. Dolores | Potable | 219.356 | 170.98 | 13.54 | 600 | 2.59 |
| m30 | 45 | 3.5 | 307.34 | 1325.25 | N. Dolores | Agrícola | 296.115 | 251.92 | 13.54 | 741.12 | 1.792 |
| m31 | 69 | 6.2 | 202.72 | 667.5 | N. Dolores | Agrícola | 208.376 | 166.16 | 16.91 | 289.92 | 1.694 |
| m32 | 63 | | 241.95 | 465 | Limonas | Potable | 213.256 | 198.32 | 37.26 | 120 | 7.7 |
| m33 | 61 | 5.7 | 235.41 | 422.25 | Limonas | Potable | 248.575 | 192.96 | 30.48 | 36.96 | 4.592 |
| m34 | 12 | 1 | 255.03 | 791.25 | La Boca | Potable | 285.175 | 209.04 | 38.92 | 254.88 | 7.994 |
| m35 | 15 | 1.2 | 183.1 | 1020 | R. Monjas | Potable | 186.477 | 150.08 | 111.67 | 309.6 | 5.194 |
| m36 | 44 | 3.8 | 215.79 | 1485 | B.de Arriba | Potable | 252.296 | 176.88 | 160.60 | 499.68 | 11.298 |
| m37 | 34 | 3 | 205.98 | 2317.5 | La Cruz | Agrop. | 208.376 | 164.84 | 74.45 | 1749.6 | 2.59 |
| m38 | 21 | 1.9 | 202.72 | 2370 | Matehuala | Servicios | 197.457 | 166.16 | 121.95 | 1617.6 | 8.792 |
| m39 | 38 | 3.5 | 264.84 | 4177.5 | Matehuala | Pecuario | 270.23 | 217.08 | 503.43 | 2199.84 | 33.32 |
| m40 | 11 | 0.9 | 272.36 | 2482.5 | Matehuala | Servicios | 252.296 | 223.24 | 125.14 | 1874.4 | 7.294 |
| m41 | 7 | 0.5 | 264.84 | 2340 | Matehuala | Servicios | 274.256 | 217.08 | 123.37 | 1791.36 | 5.894 |
| m43 | 40 | 3.1 | 252.41 | 696 | S.JVanegas | Pecuario | 252.296 | 206.9 | 15.24 | 234.72 | 1.988 |
| m44 | 27 | 2.3 | 320.42 | 2197.5 | Matehuala | Pecuario | 241.316 | 262.64 | 72.67 | 1728 | 9.8 |
| m45 | 49 | 4.1 | 113.78 | 2250 | C. Blanco | Potable | 118.34 | 93.26 | 143.23 | 1649.76 | 8.694 |
| m46 | 21 | 2 | 262.88 | 2122.5 | O. Agua | Agrícola | 285.175 | 215.47 | 35.45 | 1698.72 | 1.596 |
| m47 | 26 | 2.3 | 248.49 | 2790 | P. Blanca | Agrícola | 226.92 | 203.68 | 259.16 | 1131.84 | 27.44 |
| m49 | 32 | 2.2 | 153.67 | 2212.5 | St. Lucia | Agrícola | 142.557 | 125.96 | 82.96 | 1785.6 | 6.09 |
| m50 | 50 | 4.2 | 240.64 | 666.75 | Vanegas | Agrícola | 252.296 | 197.25 | 13.54 | 294.72 | 2.1 |
| m51 | 13 | 1 | 227.56 | 1247.25 | San Isidro | Agrícola | 241.316 | 186.53 | 13.54 | 504 | 1.4 |
| m52 | 68 | 5.3 | 65.39 | 1725 | R. Nuevo | Const. | 109.678 | 53.6 | 28.78 | 1457.76 | 2.198 |
| m53 | 1 | 0 | 247.18 | 2325 | Matehuala | Agrop. | 263.276 | 202.61 | 103.16 | 1416 | |
| m54 | 73 | 6.7 | 205.98 | 2092.5 | C. Blanco | Agrop. | 215.94 | 164.84 | 60.97 | 1649.76 | 6.188 |
| m56 | 34 | 3 | 211.87 | 4402.5 | Matehuala | Agrícola | 194.59 | 173.66 | 536.40 | 2599.68 | 46.48 |
| m57 | 35 | 2.8 | 107.9 | 2535 | Sarabia | Agrícola | 118.34 | 88.44 | 182.93 | 1393.92 | 10.892 |
| m58 | 34 | 3 | 140.59 | 2085 | E. Abajo | Agrícola | 151.28 | 115.24 | 83.66 | 1624.8 | 15.694 |
| m63 | 14 | 1.1 | 172.63 | 2085 | O. Agua | Agrop. | 197.457 | 141.5 | 91.46 | 1791.36 | 5.194 |
| m64 | 42 | 3.6 | 217.1 | 633.75 | San Isidro | Potable | 219.356 | 177.95 | 13.54 | 289.92 | 2.59 |
| m65 | 54 | 4 | 186.37 | 2295 | O. Agua | Pecuario | 219.356 | 152.76 | 98.20 | 1695.84 | 4.788 |
| m66 | 11 | 0.9 | 245.22 | 2452.5 | Matehuala | Agrícola | 208.376 | 210 | 148.9 | 1456.8 | 15.96 |
| m67 | 37 | 3.1 | 281.19 | 675.75 | N. Dolores | Agrícola | 230.336 | 230.48 | 13.54 | 309.6 | 1.19 |

Cationes (mg/l)

| Muestra | F | Na | K | Ca | Mg | F | Na | K | Ca | Mg | |
|---------|-------|--------|------|-------|-------|-----|-------|--------|------|-------|-------|
| m1 | 1.178 | 8.993 | 0.05 | 310 | 27.59 | m12 | 0.475 | 15.985 | 3.59 | 163.2 | 15.88 |
| m2 | 1.33 | 7.981 | 2.07 | 342.6 | 24.19 | m13 | 0.475 | 15.985 | 4.77 | 163.2 | 15.43 |
| m3 | 1.558 | 14.996 | 7.27 | 350.8 | 36.79 | m14 | 0.475 | 11.983 | 3.16 | 155 | 15.31 |
| m4 | 1.387 | 9.982 | 2.58 | 293.6 | 23.82 | m15 | 0.57 | 23 | 2.69 | 130.4 | 13.69 |
| m5 | 1.444 | 13.984 | 2.26 | 318.2 | 24.59 | m16 | 0.057 | 12.995 | 2.18 | 187.6 | 15.92 |

Cationes (mg/l)

| Muestra | F | Na | K | Ca | Mg | Muestra | F | Na | K | Ca | Mg |
|---------|--------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|--------|
| m6 | 1.292 | 14.996 | 2.18 | 326.4 | 25.58 | m17 | 1.729 | 21.988 | 3.08 | 440.6 | 35.73 |
| m7 | 1.254 | 553.97 | 8.36 | 416 | 60.29 | m20 | 1.444 | 12.995 | 2.58 | 391.6 | 33.42 |
| m8 | 1.14 | 10.994 | 2.18 | 301.8 | 28.08 | m21 | 1.634 | 28.98 | 4.77 | 669 | 35.13 |
| m9 | 1.235 | 14.996 | 2.77 | 368 | 27.10 | m22 | 1.729 | 34.983 | 5.78 | 677.2 | 39.75 |
| m10 | 1.064 | 8.993 | 2.18 | 318.2 | 24.31 | m24 | 0.627 | 11.983 | 2.58 | 187.6 | 18.11 |
| m11 | 1.0982 | 9.982 | 2.18 | 301.8 | 23.49 | m25 | 0.418 | 18.998 | 2.89 | 138 | 12.27 |
| m26 | 0.475 | 35.995 | 4.26 | 126.8 | 16.89 | m45 | 1.368 | 72.91 | 21.55 | 628.4 | 41.33 |
| m27 | 0.645 | 33.994 | 5.78 | 163.2 | 18.59 | m46 | 1.824 | 33.994 | 13.37 | 701.6 | 41.93 |
| m28 | 0.608 | 28.98 | 6.09 | 252.8 | 19.69 | m47 | 0.95 | 348.91 | 8.094 | 291 | 111.34 |
| m30 | 1.387 | 9.982 | 3.16 | 383.4 | 25.77 | m49 | 1.691 | 82.984 | 15.56 | 652.8 | 36.58 |
| m31 | 0.817 | 7.981 | 2.38 | 187.6 | 16.28 | m50 | < | 8.993 | 1.798 | 163.2 | 15.68 |
| m32 | 0.342 | 14.03 | 1.48 | 116 | 6.19 | m51 | 0.456 | 32.982 | 5.669 | 240 | 29.05 |
| m33 | 0.361 | 9.982 | 1.19 | 89.6 | 8.49 | m52 | 1.026 | 19.987 | 10.08 | 571.2 | 22.09 |
| m34 | 0.209 | 72.91 | 2.69 | 146.8 | 19.26 | m53 | 1.254 | 105.984 | 9.188 | 669 | 28.20 |
| m35 | 1.026 | 162.97 | 4.06 | 114.24 | 11.09 | m54 | 1.254 | 61.87 | 9.97 | 612.2 | 37.19 |
| m36 | 0.703 | 178.94 | 4.57 | 212 | 40.96 | m56 | 1.748 | 806.84 | 14.58 | 604 | 105.02 |
| m37 | 1.558 | 125.99 | 10.59 | 628.2 | 47.68 | m57 | 1.71 | 207 | 13.56 | 528 | 62.23 |
| m38 | 1.71 | 93.978 | 11.76 | 660.8 | 46.19 | m58 | 1.444 | 54.97 | 22.99 | 669.2 | 26.59 |
| m39 | 1.653 | 767.97 | 12.98 | 620.4 | 83.26 | m63 | 1.767 | 93.978 | 22.09 | 620 | 68.55 |
| m40 | 1.71 | 170.89 | 6.764 | 669 | 47.28 | m64 | 0.456 | 13.984 | 3.08 | 163.2 | 15.19 |
| m41 | 1.577 | 156.86 | 7.468 | 644.6 | 38.49 | m65 | 1.615 | 80.983 | 6.68 | 677.2 | 49.59 |
| m43 | 0.684 | 9.982 | 2.072 | 163.2 | 17.01 | m66 | 1.539 | 107.87 | 9.57 | 693.6 | 43.27 |
| m44 | 1.52 | 53.981 | 11.37 | 726.2 | 30.99 | m67 | 0.57 | 9.982 | 2.46 | 187.6 | 16.41 |

Elementos Traza (ppb)

| Muestra | Sr | Li | Ti | Va | Mn | Fe | Zn | Ge | As | Se | Br | Rb | |
|---------|---------|-----|-----|----|----|----|-------|----|-----|------|----|-------|------|
| m1 | 1880.00 | m1 | < | 3 | < | 4 | 456 | 20 | 3.3 | < | | 3.10 | |
| m2 | 1680.00 | m2 | < | < | < | 6 | 383 | 51 | 0.2 | 3.6 | < | 86 | 3.07 |
| m3 | 3275.00 | m5 | < | < | < | < | 347 | 29 | 0.2 | 2.2 | < | 76 | 3.27 |
| m4 | 2460.00 | m6 | < | < | < | < | 382 | 34 | 0.3 | 2.1 | < | 147 | 3.23 |
| m5 | 3440.00 | m7 | 157 | < | < | < | 0 | 57 | 0.0 | 0.0 | < | 245 | 8.53 |
| m6 | 2960.00 | m8 | < | < | < | < | 456 | 68 | 0.2 | 8.9 | < | 4,680 | 3.30 |
| m7 | 9865.68 | m9 | 19 | 2 | 2 | < | 628 | 11 | 0.2 | 1.6 | 3 | 212 | 4.00 |
| m8 | 2621.96 | m10 | < | < | 2 | < | 473 | < | 0.2 | 2.3 | < | 121 | 3.25 |
| m9 | 1120.00 | m12 | 20 | 4 | 4 | < | 191 | < | 0.2 | 2.4 | < | 90 | 6.16 |
| m10 | 480.00 | m14 | 31 | 8 | 5 | < | 725 | 23 | 0.2 | 2.0 | 3 | 143 | 6.48 |
| m11 | 1920.00 | m15 | 15 | 2 | 2 | < | 183 | < | 0.0 | 1.0 | < | 95 | 5.38 |
| m12 | 1580.00 | m16 | < | < | < | < | 273 | 38 | 0.1 | 0.7 | 4 | 85 | 2.37 |
| m13 | 1700.00 | m17 | 46 | < | < | < | 648 | 22 | 0.3 | 2.9 | < | 256 | 5.17 |
| m14 | 1460.00 | m21 | 52 | < | < | < | 1,869 | < | < | 16.4 | < | 164 | 4.08 |

Elementos Traza (ppb)

| Muestra | Sr | Li | Ti | Va | Mn | Fe | Zn | Ge | As | Se | Br | Rb | |
|---------|---------|-----|-----|----|----|-----|-------|-------|-----|-------|----|--------|-------|
| m15 | 1460.00 | m22 | 55 | < | < | < | 1,324 | < | < | 9.8 | < | 379 | 4.34 |
| m16 | 1490.00 | m26 | 38 | 5 | 7 | < | 166 | 8 | 0.2 | 4.9 | 3 | 468 | 4.74 |
| m17 | 2679.00 | m32 | 12 | 2 | 5 | < | 121 | < | < | 1.8 | 4 | 92 | 0.48 |
| m20 | 4050.00 | m33 | < | 1 | 4 | < | 134 | 57 | < | 0.6 | 4 | 486 | 0.28 |
| m21 | 5320.00 | m35 | 48 | < | 5 | < | < | 27 | 0.3 | 2.5 | < | 385 | 3.95 |
| m22 | 5800.00 | m36 | 66 | < | < | < | 756 | 147 | < | 14.5 | < | 1,449 | 7.31 |
| m24 | 1550.00 | m36 | 57 | < | < | < | 339 | < | < | 0.0 | 6 | 813 | 3.05 |
| m25 | 1430.00 | m38 | 63 | < | 17 | < | 815 | 127 | < | 123.2 | 11 | 2,060 | 4.24 |
| m26 | 2150.00 | m39 | 296 | < | 17 | < | 2,403 | 4,843 | < | 16.6 | < | 1,297 | 12.42 |
| m27 | 3150.00 | m40 | 123 | < | 23 | < | 998 | 210 | < | 0 | 12 | 8,434 | 5.40 |
| m28 | 2650.00 | m41 | 724 | < | 59 | < | 4,682 | 694 | 1.5 | > | 61 | 2,192 | 27.14 |
| m30 | 3825.00 | m43 | < | < | < | < | 229 | 17 | < | 1.8 | 4 | 25,850 | 3.13 |
| m31 | 1600.00 | m44 | < | < | 7 | < | 933 | 53 | < | 714 | < | 159 | 4.82 |
| m32 | 560.00 | m45 | 981 | 20 | 50 | < | 5,771 | 1,097 | 1.8 | 74.1 | 90 | 608 | 35.51 |
| m33 | 300.00 | m47 | 83 | < | < | < | 434 | 279 | < | 1.7 | 9 | 35,830 | 3.68 |
| m34 | 2282.42 | m49 | < | < | 10 | < | 819 | < | < | 57.5 | < | 2,624 | 5.00 |
| m35 | 2240.00 | m51 | 35 | 4 | 8 | < | 378 | < | 0.4 | 4.7 | < | 776 | 6.10 |
| m36 | 2440.00 | m52 | < | < | < | 59 | 708 | 35 | < | 109.8 | < | 77 | 1.89 |
| m37 | 4750.00 | m53 | 71 | 4 | 21 | 293 | 1,193 | 188 | 0.5 | 1,385 | < | 264 | 6.67 |
| m38 | 7450.00 | m54 | 393 | 11 | 24 | 41 | 2,940 | 379 | 0.8 | 4,066 | 40 | 1,285 | 16.50 |
| m39 | 9300.00 | m56 | 378 | < | 16 | 88 | 3,136 | 6,140 | < | 7.5 | < | 14,632 | 13.01 |
| m40 | 4700.00 | m57 | 432 | 20 | 36 | 162 | 6,650 | > | 0.6 | 29.7 | 12 | 10,500 | 18.69 |
| m41 | 6250.00 | m58 | 46 | 5 | 10 | 9 | 843 | 41 | < | 18.7 | < | 8,350 | 5.94 |
| m43 | 1250.00 | m63 | < | < | 9 | 33 | 1,255 | 5,850 | < | 66.4 | < | 728 | 9.06 |
| m44 | 6450.00 | m64 | < | 3 | 3 | 27 | 176 | 52 | 0.2 | 2.1 | < | 1,480 | 6.43 |
| m45 | 2733.06 | m65 | < | < | 7 | 14 | 943 | 98 | < | 35.8 | < | 128 | 3.80 |
| m46 | 8450.00 | | | | | | | | | | | | |
| m47 | 3320.00 | | | | | | | | | | | | |
| m49 | 7900.00 | | | | | | | | | | | | |
| m50 | 1230.00 | | | | | | | | | | | | |
| m51 | 3525.00 | | | | | | | | | | | | |
| m52 | 4732.86 | | | | | | | | | | | | |
| m53 | 2099.79 | | | | | | | | | | | | |
| m54 | 3699.63 | | | | | | | | | | | | |
| m56 | 8900.00 | | | | | | | | | | | | |
| m57 | 4400.00 | | | | | | | | | | | | |
| m58 | 3240.00 | | | | | | | | | | | | |
| m63 | 4500 | | | | | | | | | | | | |
| m64 | 1540 | | | | | | | | | | | | |
| m65 | 6900 | | | | | | | | | | | | |
| m66 | 7850 | | | | | | | | | | | | |
| m67 | 1580 | | | | | | | | | | | | |

Elementos Traza (ppb)

| Muestra | Mo | I | Cs | Ba | Re | Tl | Pb | U |
|---------|-----|-------|------|-----|------|------|-----|--------|
| m1 | 3 | 29 | 1.80 | 15 | 0.08 | 0.09 | 0.4 | 3.36 |
| m2 | 3 | 108 | 1.81 | 15 | 0.03 | 0.11 | < | 3.34 |
| m5 | 3 | 61 | 2.13 | 16 | 0.11 | 0.11 | < | 4.98 |
| m6 | 3 | 30 | 1.92 | 17 | 0.21 | 0.13 | < | 7.18 |
| m7 | 8 | 195 | 4.40 | 15 | 0.17 | 0.00 | 0.8 | 4.58 |
| m8 | < | 52 | 1.50 | 17 | 0.11 | 0.11 | < | 4.65 |
| m9 | 3 | 26 | 2.39 | 18 | 0.08 | 0.12 | 0.1 | 3.44 |
| m10 | 3 | 87 | 1.49 | 19 | 0.04 | 0.10 | 0.5 | 3.27 |
| m12 | 3 | 19 | 0.30 | 28 | 0.05 | 0.00 | < | 3.60 |
| m14 | 2 | 32 | 0.28 | 35 | 0.04 | 0.00 | 0.4 | 4.17 |
| m15 | 3 | 14 | 0.35 | 24 | 0.03 | 0.02 | < | 2.51 |
| m16 | 2 | < | 1.57 | 32 | 0.15 | 0.09 | 0.5 | 2.41 |
| m17 | 4 | < | 4.00 | 15 | 0.03 | 0.14 | < | 3.61 |
| m21 | 22 | 125 | 0.70 | 10 | 0.28 | 0.00 | < | 3.21 |
| m22 | 18 | 91 | 0.64 | 9 | 0.28 | 0.00 | < | 3.60 |
| m26 | 3 | 25 | 0.09 | 29 | 0.04 | 0.00 | < | 6.98 |
| m32 | 1 | 27 | 0.06 | 107 | 0.04 | 0.00 | < | 1.16 |
| m33 | 2 | 20 | 0.02 | 127 | 0.04 | 0.00 | < | 1.03 |
| m35 | 8 | 97 | 2.69 | 31 | 0.07 | 0.15 | 7.1 | 3.53 |
| m36 | 6 | 157 | 0.62 | 11 | 0.09 | 0.00 | < | 4.19 |
| m36 | 3 | 93 | 0.55 | 31 | 0.18 | 0.00 | < | 3.71 |
| m38 | 11 | 55 | 0.15 | 12 | 0.23 | 0.00 | 0.6 | 11.76 |
| m39 | 49 | 1,991 | 0.22 | 19 | 0.70 | 0.00 | 5.4 | 40.09 |
| m40 | 66 | 1,490 | 0.34 | 11 | 0.70 | 0.09 | < | 22.93 |
| m41 | 106 | 2,151 | 0.72 | 33 | 2.05 | 0.23 | < | 151.65 |
| m43 | 2 | < | 3.07 | 37 | 0.12 | 0.16 | < | 2.20 |
| m44 | 13 | 55 | 0.16 | 15 | 0.23 | 0.00 | 7.6 | 3.13 |
| m45 | 95 | 3,025 | 0.55 | 39 | 2.58 | 0.18 | < | 197.51 |
| m47 | < | 144 | 0.38 | 12 | 0.14 | 0.00 | < | 4.66 |
| m49 | 10 | 54 | 0.29 | 13 | 0.00 | 0.00 | < | 3.50 |
| m51 | < | 44 | 0.10 | 29 | 0.03 | 0.00 | < | 10.63 |
| m52 | < | 104 | 0.06 | 45 | 0.00 | 0.00 | < | 1.51 |
| m53 | 23 | 995 | 0.48 | 21 | 0.22 | 0.27 | < | 23.07 |
| m54 | 48 | 1,528 | 0.27 | 36 | 1.04 | 0.12 | 2.8 | 84.30 |
| m56 | 60 | 746 | 0.17 | 22 | 0.67 | 0.00 | < | 16.14 |
| m57 | 118 | 705 | 0.29 | 27 | 0.80 | 0.11 | < | 9.23 |
| m58 | 6 | 72 | 0.25 | 8 | 0.08 | 0.00 | 1.8 | 3.65 |
| m63 | 18 | 351 | 0.27 | 13 | 0.20 | 0.05 | < | 9.40 |
| m64 | 2 | 21 | 0.04 | 26 | 0.07 | 0.00 | 1.2 | 3.55 |
| m65 | 10 | 105 | 0.07 | 32 | 0.13 | 0.00 | 0.8 | 8.05 |

<menor al límite de detección

8. BIBLIOGRAFÍA.

Alaerts, G. J. y Khouri, N., 2004, Arsenic contamination of groundwater: Mitigation strategies and policies, *Hydrogeology Journal*, 12, 103-114.

Alberta Health and Wellness, 2000. Arsenic in groundwater from domestic wells in three areas of northern Alberta: Alberta Health and Wellness_Health Surveillance, 35 p.

Anawar, H. M., Yoshioka, T., Safiullah, S., Kato, K., Akai, J., Komaki, K., Terao, H., 2003. Geochemical occurrence of arsenic in groundwater of Bangladesh: sources and mobilization processes. *J Geochem. Exploration* 77 (2/3): 109-131.

Andreae, M.O. (1986), chemical species in sea water and marine particulates, in Bernhard, M., Brinckmann, F.E., and Sadler, P.J. (eds): The importance of chemical speciation in environmental processes, pp 301-335. Springer, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokio.

Appelo, C.A.J. y Postma, D., 1996. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Edit. Balkema, 536 p.

Armienta, M.A., Zamora, V y Juárez F., 1987, *Manual para el Análisis Químico de Aguas Naturales, en el Campo y en el Laboratorio*, Instituto de Geofísica, UNAM. 86p

Armienta, M.A., Rodríguez, R., Aguayo, A., Ceniceros, N., Villaseñor, G y Cruz, O., 1997. Arsenic contamination of groundwater at Zimapán, Mexico, *Hidrogeology Journal*, v. 5, no. 2.

Atkinson, T. C., 1983. Growth mechanism of speleothems in Castleguard cave, Columbia ice fields, Alberta, Canadá. *Arct. Alpine Resources*. 15, 523-536.

Ayotte, J.D., Nielsen, M. G., Robinson, G.R.J., y Moore, R.B., 1999 Relation of Arsenic, iron and manganese in ground water in aquifer type, bedrock, lithochemistry and land use in the New England coastal basin: U.S. Geological Survey Water – Resources Investigations Report 99-4162, 60p

Azcue, J. M. and Nriagu, J. O., 1994. Arsenic, historical perspectives: en Nriagu, J.O., ed., *Arsenic in the environment part I: Cycling and Characterization: Advances in Environmental Science & Technology*: New York, John Wiley and Sons, 430 p.

Back, W., Hanshaw, B.B., 1970. Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsula of Florida and Yucatan. *J. Hidrol.* 10, 330-368.

Bacon, R. W., 1978 *Geology of northern Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México* (M.S. Thesis): Arlington, University of Texas, 109 p.

Barboza-Gudiño, J. R., 1993. *Geología de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México*. En: C. Pola S., J. A. Ramírez F., M. A. Rancel R y Navarro L. (Eds.) *Actas Fac. Ciencias de la Tierra UANL*, Linares, 8, p 9-18.

Bernhard, M., Brinckmann, F.E., and Sadler, P.J., (eds) (1986), *The importance of chemical speciation in environmental processes*, Springer, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokio.

Burckhardt, C., 1906. La Faune Jurassique de Mazapil avec un appendice sur les fossiles du Cretacique Inferieur. Inst. Geol. México, Bol 23

Burckhardt, C., 1921. Faunas Jurásicas de San Simón, Zacatecas y Faunas Cretácicas de Zumpango del Río, Guerrero, Int. Geol. México, Bol. 33.

Burkel, R. S., and Stoll, R. C., 1999, Naturally occurring arsenic in sandstone aquifer water supply wells of northeastern Wisconsin: Ground Water Monitoring and Remediation, v. 19, no. 2, p. 114-121.

Burow, M. and Stoeppler, M., 1987. Ingestion/excretion experiments for arsenic in fish en Brätter, P. and Scrammel, P.(eds): trace elements, analytical chemistry in medicine and biology, vol. 4.

Castro, J.: 1995, "Umweltauswirkungen des Bergbaus im semiariden Gebiet von Santa María de la Paz, Mexiko", Tesis Doctoral, Instituts für Petrographie und Geochemie, Universität Karlsruhe, 155 pp.

Castro-Larragoitia, J., Kramar, Utz, Puchlet, Harald., 1997. 200 years mining activities at La Paz/San Luis Potosí/Mexico-Consequences for environment and geochemical exploration.- *Journal of Geochemical Exploration*, 58 (1997) 81-91 .

Cebrian, M. E., Albores, A., García-Vargas, G. and Del Razo, L. M., 1994. Chronic Arsenic poisoning in humans: The case of Mexico: en Nriagu J. O. ed., *Arsenic in the Environment, part II: Human Health and Ecosystems Effects: Advances in the Environmental Science & Technology*: New York, John Wiley and Sons, p. 93- 107.

Chau, Y.K., (1986a), Analytical aspects of organometallic species determination in Fresh water Systems, in : Bernhard, M., Brinckmann, F.E., and Sadler, P.J. (eds.):_The importance of chemical "speciation" in environmental processes, pp. 149-167. Springer, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokio.

Chau, Y.K., (1986b), Occurrence and speciation of organometallic compounds in fresh water systems. *Sci. Total environment*. 49, 305-323

Chen S. L.; Dzung, S. R.; Yang, M.H.; Chlu, K. H.; Shieh, G. M. and Wal, C. M., 1994. Arsenic species in groundwater of the blackfoot disease area, Taiwan, *Environmental Science & Technology*, v. 28, p. 877-881.

Cherry, J. A., Shaikh, A. U., Tallman, D. E., y Nicholson, R. V., 1979, Arsenic species as indicator of redox conditions in groundwater. *Journal of hydrogeology*, v. 43, p. 373-392.

Chowdhury, T. R., Basu, G. K., Mandal, B. K., Biswas, B. K., Samanta, G., Chowdhury, U. K., Chanda, C. R., Lohd, D., Roy, S. L., Saha, K. C., Roy, S., Kabir, S., Quamruzzaman, y Chakraborti, D., 1999, Arsenic poisoning in the Ganges delta: brief communication, *Nature*, v. 401, p. 545-546.

Comisión Nacional del Agua, 2003a, Regiones y Cuencas Hidrológicas del Estado de San Luis Potosí
<http://www.cna.gob.mx>

Comisión Nacional del Agua, 2003, Estaciones Climatologías Vanegas, Cedral, Matehuala y Maroma-Catorce, Documento de Microsoft Excel

Craigh, P.J. (1986), Chemical species in industrial discharges and effluents in : Bernhard, M., Brinckmann, F.E., and Sadler, P.J. (eds): The importance of chemical speciation in environmental processes, pp 443-464. Springer, Berlin-Heldelberg-New York-London-Paris-Tokio.

Deike, R. G., 1991. Comparative petrology of cores from two test wells in the Eastern part of the Edwards aquifer, South-Central Texas. US. Geol. Surv. Water. Resour. Inv. Rep. 87-4266, 142 p.

Deutsch, W. J., 1997 Ground Water Geochemistry, fundamentals and applications to contamination, Lewis publishers, 221 p

Drever, I. James, 1988, The Geochemistry of Natural Waters, Prentice Hall, New Jersey, 429 pp.

Duinker, J.C., (1986), Formation and transformation of elements species in estuaries, in: Bernhard, M., Brinckmann, F.E., and Sadler, P.J. (eds): The importance of chemical speciation in environmental processes, pp 365-384. Springer, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokio.

Fendorf, S., Eick, M. J., Grossl, P., y Sparks, P. D. L., 1997, Arsenate and chromate retention mechanism on goethite. 1. Surface structure: Environmental Science & Technology, v. 31, no. 2, 315-326.

Fishbein, L., 1984. overview of analysis of carcinogenic and mutagenic metals in biological and environment samples: arsenic, beryllium, cadmium, chromium and selenium. In Merian, 1991.

Foster, A. L., 1999, Partitioning and transformation of Arsenic and Selenium in Natural and Laboratory Systems: Ph. D.: Stanford University, 225 p.

Fowler, 1977, en Merian, 1991, Metals and their compounds in the environment, VHC, Republic of German

Freeze, R., Alan y Cherry, A., John, 1979. Groundwater. Prentice Hall Inc., 604 pp.

Geohidrológica Mexicana, 1975. Servicios de Prospección y levantamientos geológicos y geofísicos, en el estado de San Luis Potosí, zona El Salado, zona Cedral-Matehuala, zona Vanegas-Estación Berrendo. Tomo II

Geohidrológica Mexicana, 1979, Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de Charco Blanco-Matehuala, San Luis Potosí.

Gómez- Anguiano, M., 2001. Cartografía Geológica del área de San Juan de Matanzas en la Porción Noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí y Correlación Estratigráfica y Geoquímica de Rocas Volcanogénica Pre-oxfordianas del Noreste de México", Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, Nuevo León, México 164 p

Hem, J.D., 1985, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water: U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 2254, 264 p.

Hidrotec, S. A., 1972. Informe del estudio geohidrológico preliminar en la zona Cedral-Vanegas, San Luis Potosí tomo II

Hingston, F. J., J. Posner, A. M., y Quirk, J. P., 1972, Anion adsorption for goethite and gibbsite: 1. The role of the proton in determining adsorption envelopes: *Journal of Soil Science*, v. 23. p. 177-192.

Höppe, M., 2002, Geologische Kartierung (1:10000) im Gebiet Ojo de Agua nordwestliche Sierra de Catorce und sedimentpetrologische Untersuchungen an Präoberjurassischen Sedimenten (Zacatecas Formation) Master Thesis, Institute für Geologie und Palaöontologie, Universidad de Clausthal.

Humphrey, W.E., 1949. Geology of the Sierra de los Muertos Area, México, *Bull. Geol. Soc. Am.* 60, p. 80-176 p.

Humphrey, W. E., Díaz, T. 1956., Jurassic and Lower Cretaceous stratigraphy and tectonics of northeastern Mexico. Manuscrito sin publicar.

Imlay, R. W., 1936. Geology of the western part of the Sierra de Parras, *Geo. Soc. Am. Bull.* 47: pp 1091-1152.

Imlay, R. W., 1938, Studies of the Mexican Geosyncline. *Bull. Geol. Soc. Sm*, V. 49, p. 1657-1662

Ingeniería de Evaluación y Prospección, S. A. 1981, Estudio geohidrológico con fines de abastecimiento a la ciudad de Matehuala, S.L.P.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2003
<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/español/estados/slp/rb.cfm>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2004
<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/español/estados/slp/fisio.cfm>

Ishinishi, N., Tsochiya, K., Vahter, M., and Fowler, B. A., 1986, Chapter 3 Arsenic, in Friberg, L., Nordberg, G. F., and Vonk, V.B. (eds): *Hand Book on the toxicology of metals*, 2nd ed., vol. II. pp. 43-83. Elsevier, Amsterdam.

Kabata-Pendias, A. y Pendias, H.: 2001, "Trace Elements in Soils and Plants", CRC Press, Florida, 331 pp.

Levander, O. A., 1977. Metabolic interrelationships between arsenic and selenium. *Environmental Health Perspect.* 19, 159-164

Labarthe-Hernández, G., Tristán-González D., y Aranda-Gómez, J. J., 1992, Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí, *Folleto Técnico*, vol. 85, 208 p., Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

López-Doncel, R., 2003, La Formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, centro-noreste de México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 26, num. 1, 2003, p. 1-19

López-Doncel, R., 2000. Karbonatfazielle Entwicklung Während der mittleren Kreide am Westlichen Rand Valles-San Luis Potosí-Plattform (Mittel-Mexiko) Dissertation, 177 p. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät University of Clausthal.

Manceau, A., 1995, The mechanism of anion adsorption on iron oxides: Evidence for the binding of arsenate tetrahedral on free $Fe(O, OH)_6$ edges: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, p. 3647-3653.

Mandal, B. K. y Suzuki, K. T., 2002. Arsenic round the world: a review. *Talanta* 58(1):201-235.

Manning, B. A. y Goldberg, S., 1997, Adsorption and stability of arsenic (III) at the clay mineral-water interface *Environmental Science & Technology*, v. 31, no.,7, p 2005-2011.

Marijanovic, P., Jaskie, M., Orlich, I., and Valcovic, V., 1983. Trace elements in sea water, in: *Proceeding Heavy Metals in the environment, Heidelberg*, vol. 1, .237-240

Manz, M. y Castro, J., 1997, The Environmental Hazard caused by smelter slags from the Santa María de la Paz mining district in México, *Environmental Pollution*, 98, 7-13.

Masscheleyn, P. H., Delaune, R. D., y Patrick, W. H., Jr., 1991, Effect of redox potential and pH on arsenic speciation and solubility in contaminated soil: *Environmental Science & Technology*, v. 25, no. 8, p. 1414-1418.

Megaw, p.: 1999, "The High- Temperature Ag-Pb-Zn-(Cu) Carbonate- Replacement Deposits of Central Mexico, British Columbia and Yukon Chamber of Mines, Vancouver, B.C., Canadá, pp. 84.

Merian, E., 1991, Metal and their compounds in the environment, VHC, Republic of German

Moran-Zenteno, G., 1994, The Geology of Mexican Republic, *Geology*, vol. no. 31, en estudios AAPG 180p

Muir, J.M., 1936. *Geology of the Tampico region, Mexico*. Tulsa, Okla., American Association of Petroleum Geologists, V. XIX, 200 p.

Murray, C. y López, A., 1996. *The global burden of disease*, vol. 1. WHO, Harvard School of Public Health, The World Bank, Geneva.

National Research Council, 1998, *Arsenic in Drinking water*: Washington D.C., National Academy Press, 310 p.

Nickson, R. T., McArthur, J. M., Ravenscroft, P., Burgess, W. G., y Ahmed, K. M., 2000, Mechanism of arsenic release to groundwater, Bangladesh and West Bengal: *Applied Geochemistry*, vol. 15, no. 4, p 403-413.

Padilla, S y Sánchez, R. J, (citado en: Gómez- Anguiano, M., 2001. Cartografía Geológica del área de San Juan de Matanzas en la Porción Noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí y Correlación Estratigráfica y Geoquímica de Rocas Volcanogénica Pre-oxfordianas del Noreste de México", Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, Nuevo León, México 164 p)

Razo Soto I., 2002, Evaluación de la Contaminación por Metales y del Riesgo en Salud en un Sitio Minero de Sulfuros Polimetálicos: Caso de Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P México, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 187 p.

Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz- Barriga, J. and Monroy, M., 2004. Arsenic and heavy metal pollution on soil, water and sediments in semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air and Soil Pollution*. 152: 129-152

Rosas, I., Belmont, R, Armienta, A. Baez, A, 1999. Arsenic concentrations in water, soil, milk and forage in Comarca Lagunera, México. *Water Air and Soil Pollution* 112:133-149.

Ross, M.A., 1979. Stratigraphy of the Tamaulipas limestone north eastern, México: M.S. Thesis, Univ. of Texas at Arlington, 96 p.

Rushton, K. 1997. Recharge from permanent water bodies. En Simmers, I. Recharge of Phreatic Aquifers in (semi-)arid areas. International Association of Hydrogeologist, A.A. Balkema Publishers, 277 p.

Rzedowsky, J., 1955. Notas sobre la Flora y Fauna del Estado de San Luis Potosí, Ciencia, Volumen XV.

Savage, K. S. Tingle, T. N., O'Day, P. A., Waychunas, G. A., and Bird, D. K., 2000, Arsenic Speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode Gold District, Tuolumne County, California : *Applied Geochemistry*, v. 5, p. 1219-1244.

Savory, J. and Wills, M.R., 1984. arsenic. Merian, E., 1991, Metal and their compounds in the environment, VHC, Republic of German

Scott, M. J., y Morgan, J. J, 1995, Reactions at oxide surfaces. 1. Oxidation of As(III) by synthetic bimesite: *Environmental science & Technology*, v. 29, no. 8, p. 1898-1905.

Secretaría de comunicaciones y transportes., 2003. mapa de carreteras
WWW. Sct.gob.mx/dirección_gral/dgp_atlas/pdf/slp.pdf

Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP).: 1992, Monografía Geológico-Minera del Estado de San Luis Potosí, Consejo de Recursos Minerales, México, 219pp.

Secretaría de medio ambiente y recursos naturales
http://infoteca.semarnat.gob.mx/Metadatos/provi_fisio

Secretaría de Programación y Presupuesto, 1979. Carta geológica 1:50000. Hoja F14-1

Secretaría de Programación y Presupuesto, 1983, Carta Estatal de Climas 1:1000000, Hoja San Luis Potosí.

Secretaría de Programación y Presupuesto, 1984a. carta hidrológica de aguas subterráneas 1: 250000. Hoja Matehuala F14-1.

Secretaría de Programación y Presupuesto, 1984b. Carta de aguas subterráneas 1:25000. Hoja Matehuala F14-1.

Secretaría de Salubridad y Asistencia, 2000a. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización.
<http://www.ssa.gob.mx>

Secretaría de Salubridad y Asistencia, 2000b. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización.
<http://www.ssa.gob.mx>.

Servicios de Agua Potable y Saneamiento de Matehuala, 1998, Fuentes Alternas de Abastecimiento para la ciudad de Matehuala, estudio técnico

Servicios de agua Potable, Saneamiento de Matehuala, 1981. Censo Cedral-Matehuala, documento interno.

Servicios de Agua Potable, Saneamiento y Alcantarillado de Matehuala, 1999, Estudio de Fuentes Alternas de Abastecimiento, reporte interno sin publicar.

Smedley, P.L. y Kinniburgh, D.G., 2002, "A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters", *Applied Geochemistry*, 17, 517-568.

Smedley, P. L., 2003. Arsenic in groundwater-South and east Asia, en Welch, H. A., y Kenneth, G. S. Arsenic in ground water, edit. Kluwer.

Smith, A. H., Arroyo, A. P., Mazumder, D. N., Kosnett, M. J., Hernández, A. L., Beeris, M., Smith, M. M., Moore, L. E., 2000, Arsenic-induced skin lesions among Atacameño people in Northern Chile despite good nutrition and centuries of exposure, *Environmental Health Perspectives* 108(7):617-20

Sposito, G., 1984, *The surface chemistry of soils*, Oxford University Press, 234 p.

Stollenwerk, 1996. Simulation of phosphate transport in sewage-contaminated groundwater, Cape Code, Massachusetts: *Applied Geochemistry*, v. 11, p 317-324.

United Nations Environment Program, 1999. Assessment of the status and trends and options for conservation and sustainable use of the terrestrial and biological diversity dryland, Mediterranean, arid, semi-arid, grassland and savannah ecosystem. United Nations convention to Combat Desertification. Convention on biological diversity.

United States Geological Survey.
<http://water.usgs.gov/software/phreeqc.html>.

Van der Hoek, W., Konradsen, F., Jehangir, W. A., 1999. Domestic use of irrigation water: health hazard or opportunity. *Water Res. Dev.* 15 (1/2):107-119.

Waychunas, G. A., Rea, B. A., Fuller, C. C., y Davis, J. A., 1993, Surface chemistry of ferrihydrite: part 1. EXAFS studies of the geometry of coprecipitated and adsorbed arsenate.: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 57, p. 2251-2269.

Welch A. H., Lico M. S. and Hughes, J. L., 1988. Arsenic in ground water of the western United States. *Ground Water*, v. 26, no. 3, p 333-347.

Welch H., Alan y Stollenwerk G., Kennet, 2001. Arsenic in ground water *Geochemistry and Occurrence*, Edit. Kluwer Academic Publishers, 475 p.

Welch, A. H., Westjohn, D. B., Helsel, D. R., y Wanty, R. B., 2000, Arsenic in groundwater of the United States: Occurrence and geochemistry: *Ground Water*, v. 38, no. 4, p. 589-604.

Williams, M.: 2001, "Arsenic in Mine Water: An International Study", *Environmental Geology*, 40, 267-278.

Wingley, T. M. L., 1973, The incongruent dissolution of dolomite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 37, 1397-1402

World Health Organization, 1995. The world Health Report 1995. bringing the gap. World Health Organization Geneva.

World Health Organization, 1996. Water supply and Sanitation Sector Monitoring Report. World Health Organization Geneva

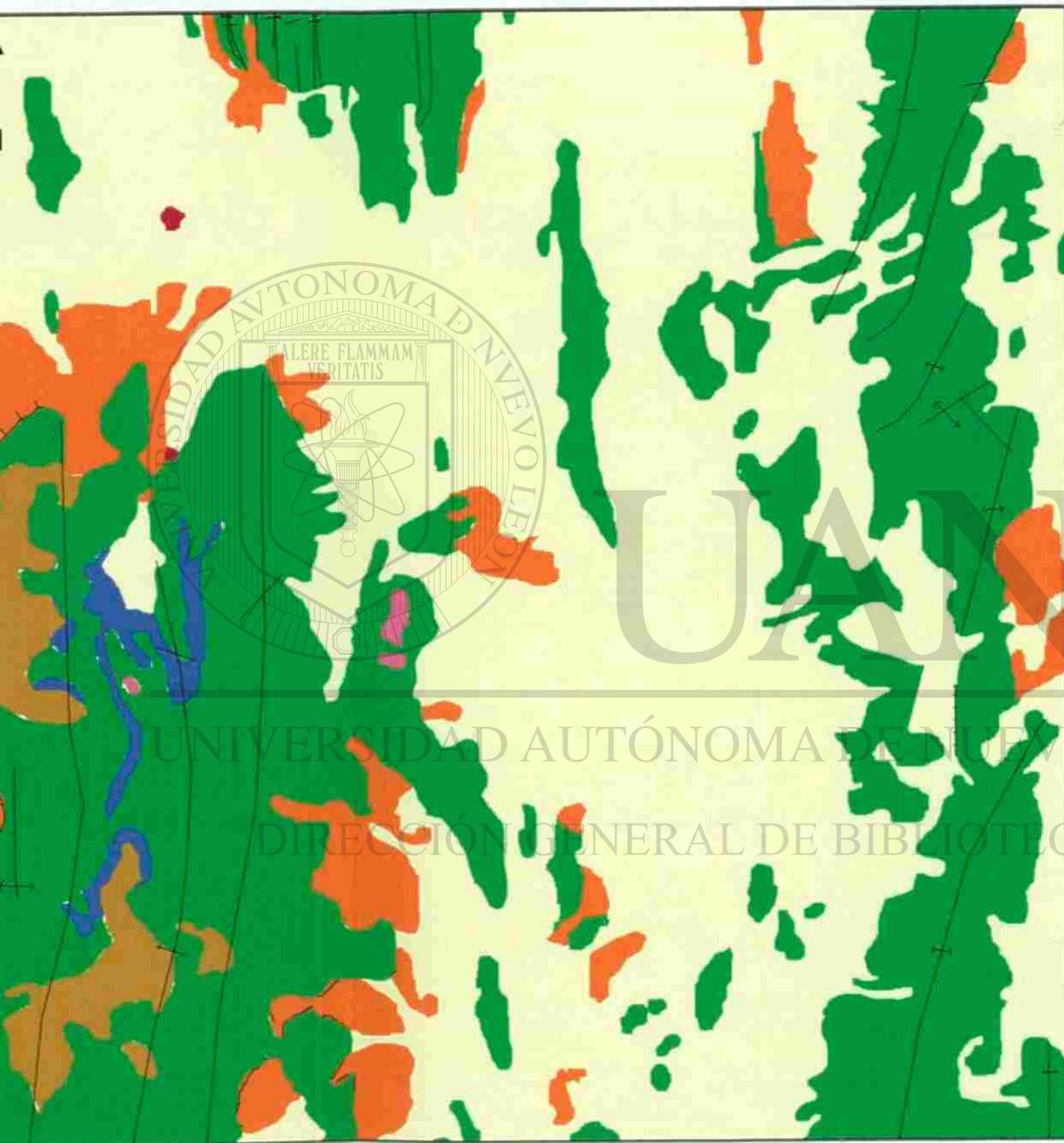
World Health Organization (WHO), 2001, Environmental Health Criteria Series No. 224: Arsenic, International Programme on Chemical Safety, pp. 174.

World Health Organization, 2002, www.who.int/inf-fs/en/fact210.html

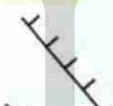
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



- Clásticos Triásicos
- Calizas y Clásticos Jurásicos
- Calizas Cretácicas
- Basaltos Cuaternarios
- Granodiorita Cuaternaria
- Conglomerados Cuaternarios

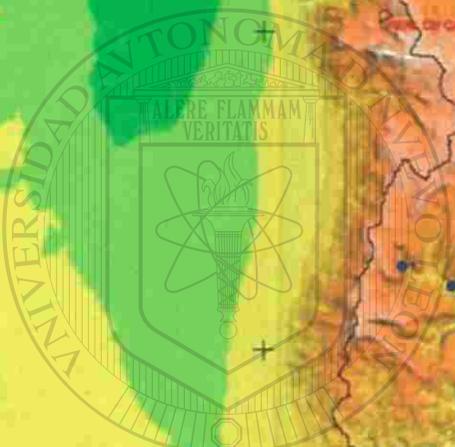
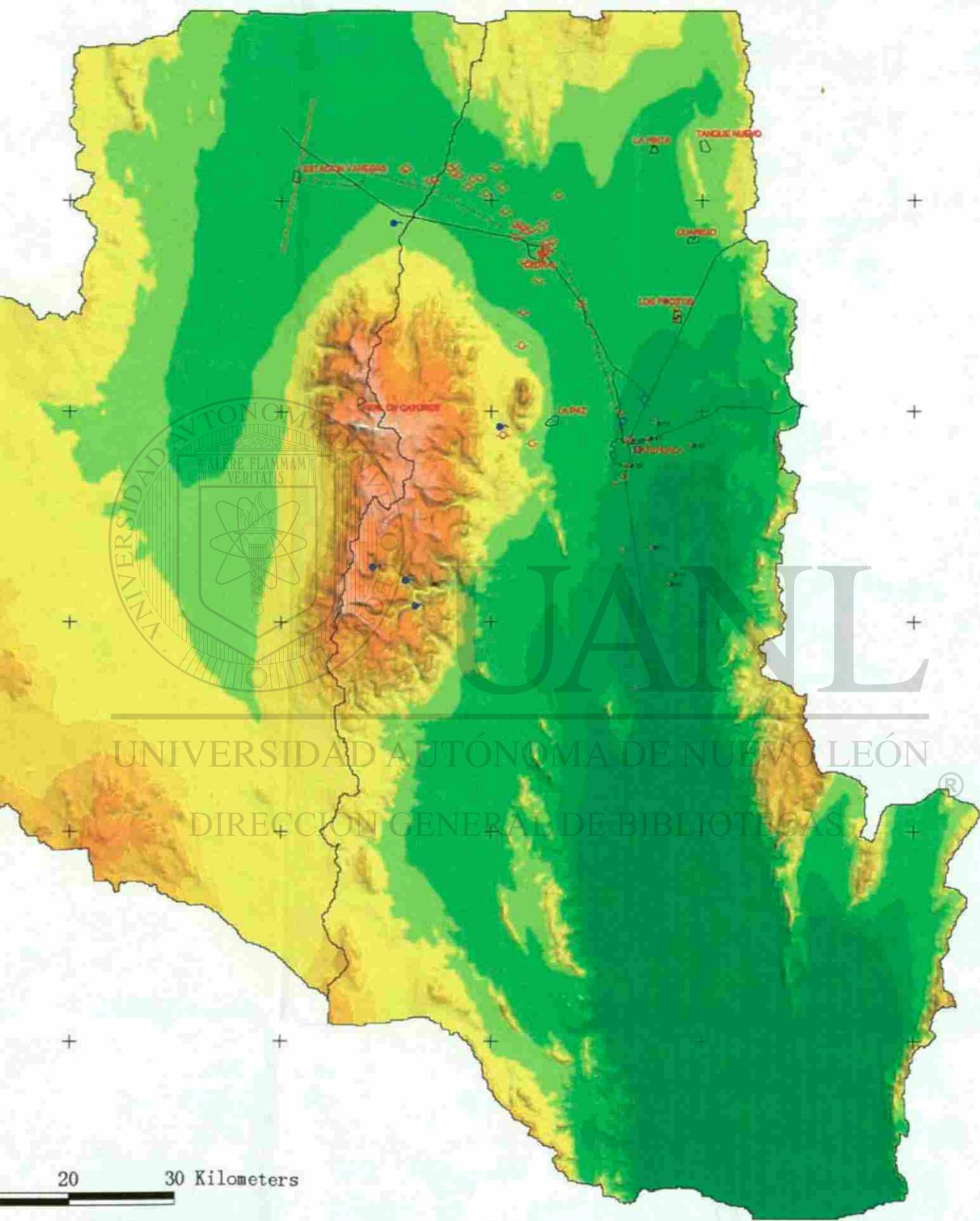
- Aluvión
-  Falla Normal
-  Fractura/falla

**Mapa Geológico
Cedral-Matehuala**

00

350000

280000 300000 320000 340000 360000

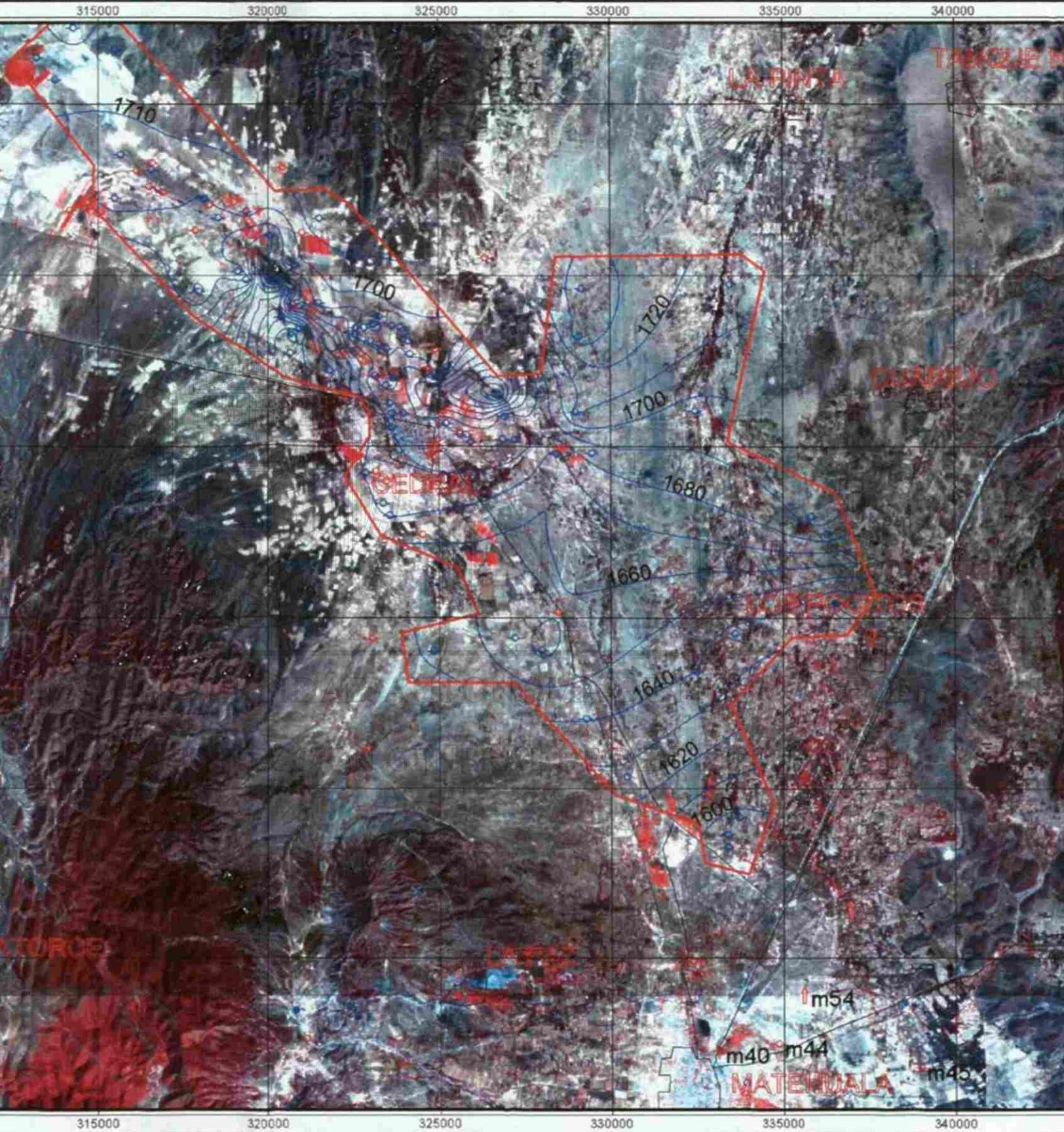


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

20 30 Kilometers

280000 300000 320000 340000 360000

Carta Piezométrica



12

18

24 Kilometers

Escala 1 : 120000

