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.

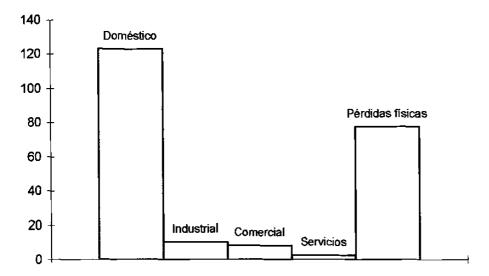


Figura 1. Distribución de las extracciones de agua subterránea entre los diversos sectores (extracción en litros por segundo, SAPSAM, 1999).

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
Mm³/año	Mm³/año	Mm³/año	Mm³/año	Mm³/año	Mm³/año	Mm³/año
34.0	54.0	-20.0	40.0	12.0	1.60	0.40

SAPSAM, 1999

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.

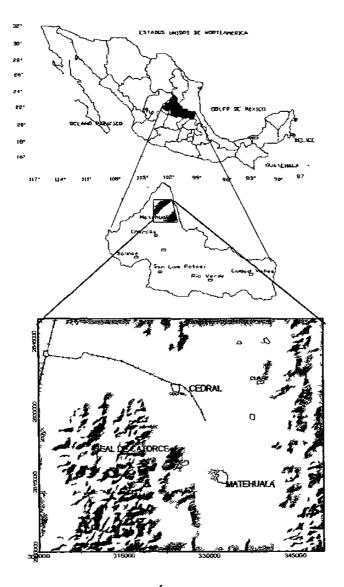


Figura 2. Área de estudio.

2.2. VÍAS DE COMUNICACIÓN

Las vías principales de comunicación son la carretera federal N° 57 México-Piedras Negras, tramos San Luis Potosí-Saltillo y dos estatales, una que comunica a la carretera Zacatecas-Saltillo 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.

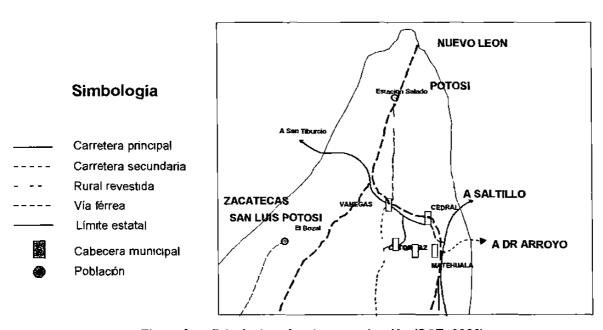


Figura 3. Principales vías de comunicación (SCT, 2003)

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).

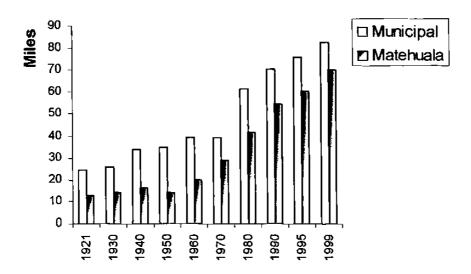


Figura 4. Crecimiento de la población en el municipio y ciudad de Matehuala (SAPSAM, 1999).

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).

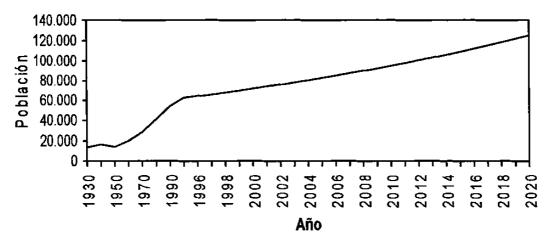


Figura 5. Proyección del crecimiento de la población de la ciudad de Matehuala para el 2020 (SAPSAM, 1999)

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.

i abia Z.	Clasificación de aridez (UNEP, 1999).			
	Índice	Variabilidad	de	Iluvia
Clima	EVP P*	en % del pro	med	io

Clima	EVP P*	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).

 $BS_0kw(x')$ 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.

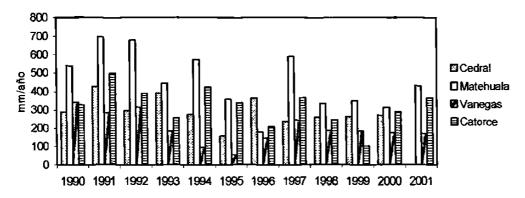


Figura 6. Precipitación media anual para las estaciones climatológicas de Vanegas, Cedral, Matehuala, y Maroma-Catorce de 1990 a 2001 (CNA).

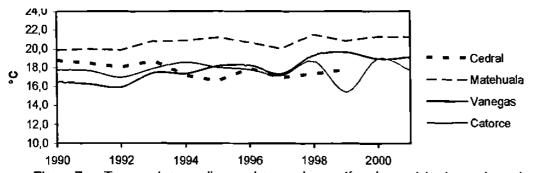


Figura 7. Temperatura media anual en grados centígrados registradas en las estaciones climatológicas de Vanegas, Cedral, Matehuala y Maroma-Catorce de 1990 a 2001 (CNA).

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 carnerosana*), Candelilla (*Eupharbia antisyphilitica*) y Palma China (*Yucca filifera*) ocotillo, mezquite y variedades diversas de cactáceas (Rzedowski, 1955)

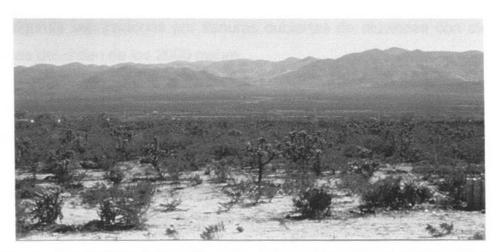


Figura 8. Paisaje típico de la región que muestra las variedades de plantas existentes, como fondo la Sierra Azul.

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.



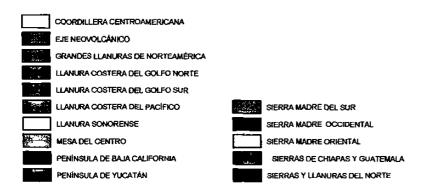


Figura 9. Fisiográficas de México (tomado de INEGI, 2004).

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).

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).

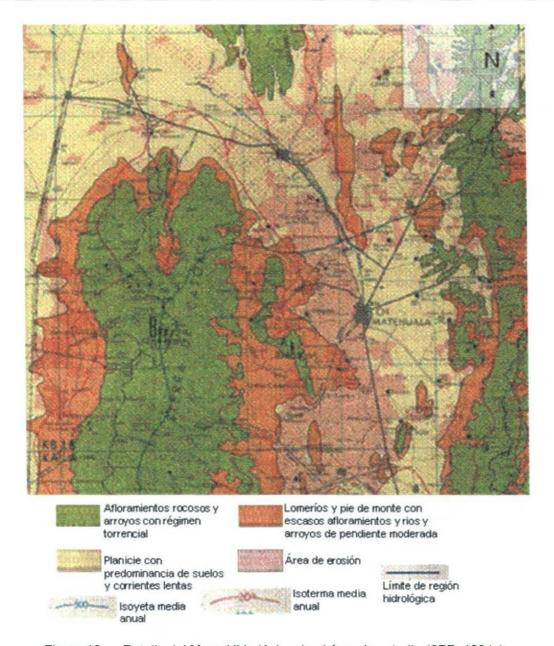


Figura 10. Detalle del Mapa Hidrológico de el área de estudio (SPP, 1984a)

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 premesozoicos. 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 Luís 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 al 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).

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 intrusitas. 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 Litologia

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 Sombreretillo 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"

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 sobreyaciente 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 obscura 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 obscuro 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 pirita 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 sacaroide, 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 físiles 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).

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 areno-arcillosa 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 subrredondeados 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.

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.

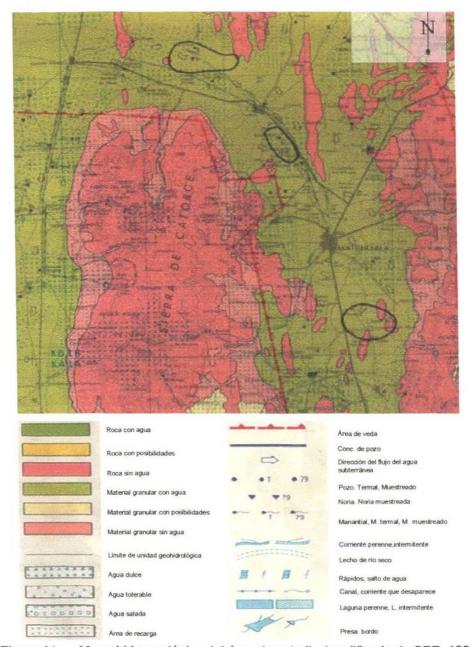


Figura 11. Mapa hidrogeológico del área de estudio (modificado de SPP, 1984b)

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 x 10⁻³ m²/s y 5 x 10⁻⁴m²/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 x 10^6 m³ por año, siendo el más importante el uso agrícola con una extracción de aproximadamente 40 x 10^6 m³ por año, mientras que el uso público-urbano es de 12 x 10^6 m³ por año y el doméstico e industrial no es mayor de 2 x 10^6 m³ 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 constituída 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 (FeCuS2), bornita (Cu₅FeS₄), esfalerita (ZnS) y pirita (FeS₂) 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 µm (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.

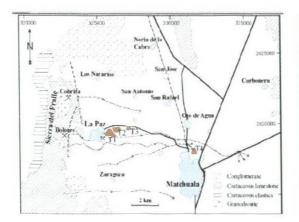




Figura 12. Presas de jales y canales de escurrimiento en el distrito minero de La Paz (Razo, 2004).

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 AsO₂, AsO₄³, HAsO₄² y H₂AsO₃ 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 fierro 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 µg/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 Jinijang).

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/m³ en áreas rurales y 3 a 200 ng/m³ 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/m³ e incluso más

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

2.12.3. Arsénico en agua.

El agua normalmente contiene de 0.15- 0.45 μg/l de arsénico, principalmente en forma inorgánica, pero algunas aguas en Canadá, Arizona, Argentina, Chile, Bosnia, Nueva Zelanda y Taiwán contienen más de 1000 μg/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 μg/l (Ishinishi et al., 1986; Marijanovic et al., 1983). La concentración de arsénico en ríos y lagos generalmente es menor de 10 μg/l aunque se han reportado valores hasta de 5 mg/l cerca de fuentes antropogénicas (WHO, 2001). Se han reportado concentraciones de hasta 1100 μg/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 μg/l (Smedley y Kinniburgh, 2002).

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 μg/l, excepto en presencia de rocas volcánicas o depósitos minerales sulfurosos 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 μg/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 Stoeppler, 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 H₃AsO₃⁰ es dominante.

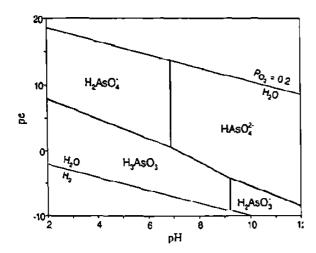


Figura 13. Diagrama de estabilidad Eh-pH, mostrando la especiación del arsénco disuelto. Los tímites indican igual actividad de las diferentes especies de arsénico Appelo y Postma, 1996

En condiciones oxidantes, el oxianión H₂ASO₄²⁻ es la especie dominante a pH menores de 6.9, mientras que a pH mayores, HAsO₄⁰ y AsO₄³⁻ 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 significante 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 pirita 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 OH₂⁺, 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).

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 paises 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)	ales en desarrollo: 1500 infecciones genos millones de estomacales, or el casos/año; 3 mill. comúnmente nados al Muertes/año fatales		Mejorar la higiene, Baja mejorar sanidad, aplicando desinfectantes de agua			
Plomo en suministro de agua	1 milión	Desorden neuronal y cerebral	Reemplazar la tuberia de plomo y accesorios	Baja		
de agua (agua países en desarrollo d subterránea) d		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 paises 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)

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 fierro 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).

Tabla 4. Situación mundial de contaminación por arsénico

Pals o región	Número de personas en riesgo	Distribución espacial y naturaleza de la contaminaciónb
án	200 000	Pequeños poblados rurales, dependiendo del nivel de contaminación en los pozos (medio a alto), poco más de 1.8 mg/ll
Zonas costeras nororientales y sudorientales		Incidencia dispersa a bajos, medios y ocasionalmente altas
	1 700,000	ciones en los pozos.
en la parte oeste)	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.
México Región Lagunera: Torreón, Matamoros, Viesca,	400 000	Cuencas cerradas con formaciones calcáreas; el As fue encontrado primero en la esquina este del aculfero, dispersándose a otros lugares. Raios a medios concentraciones en un gran número de pozos
Durango y Coahuila) Chile		Asociado con volcanismo cuaternario en Coordillera Andina Central.
nes Loa y Salado: ciudades de Antofagasta, na, Chuquicamato, Salar de Atacama; cia de Arica	400, 000	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
าล ia de Salta: regiones de Puan y Chaco	200,000	argenuna dei nordeste, tambien en sueros secimentarios
no sureste	50,000	En particular acufferos Origen hidrotermal. Altas a bajas concentraciones
Grecia Thessaloniki	150,000	La mayoría en suelos sedimentarios. Medias a altas concentraciones
	400,000	La mayoría de los pozos artesianos en suelos sedimentarios. Medias a
Ghana Obuasi	10,000	bajas concentraciones. Posiblemente minado de oro y oxidacion de arsenopirita. En 8 de los 17 distritos 50% de los pozos afectados. Media a baja
India Estado de Bengal oeste	40 000,000	
Bangladesh En la mayoría de los distritos	80 a 90 millones	estan contaminados. El acuífero parece ser un ambiente reductivo alcalinio.

aPersonas viviendo cerca y/o consumiendo agua con >0.05 mg As/l bConcentraciones 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 Khouri.(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 geofisicos 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 acuifero 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-

		AREA DE		
ESTUDIO	AÑO	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	Desconocido\$
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 hidricos 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:

Fecha 13 - febrero - 2003 No. de Censo 11 Clave CNA (7) 103 Coordenadas X 324901 Coordenadas Y 2637825 cedral Cedral Localidad Municipio 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 Pozo Forma de explotación Bomba Aprovechamiento Agricola Uso del agua Profundidad total (m) 300 Elevación del brocal Prof. N.E (m) Prof. N.D (m) 2" Φ Pozo Φ Ademe Φ Descarga Gasto Y(cm) Gasto X(cm) 6 l/s Horas de operación (día) 24 Horas estimadas de bombeo (año) Horas estimadas de bombeo por ciclo de siembra Cultivo Horas Temperatura (°C) 1576 23 C.E. Tipo de bomba Sumergible Φ Descarga 2" Tipo de motor Electrico Potencia 25 HP Área de predio 25 Ha. Área de cultivo 6 Ha. Superficie de riego Ha. Sistema de riego Gravedad Conducción de agua Canales Cebollas Tipo de cultivo 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 Vende agua? Precio (ha) Horas/bombeo Seleccionado para: Prueba de Bombeo Pozo piloto Muestra de agua

Figura 14. Hoja de campo para censo de aprovechamientos.

Observaciones:sondeable,

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 H₂SO₄ como conservador; de 125 ml. para metales aplicándose HNO₃ como conservador y pasándose por un filtro de acetato de celulosa con aberturas de diámetro nominal de 0.45 μmicras; de 60 ml. para elementos traza filtrándose al igual que la anterior y aplicándose HNO₃ 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	HNO₃	SI
ActLabs(traza)	POLIETILENO	60 ml	HNO₃	SI
FCQ-UASLP(NO ₃)	POLIETILENO	125 ml	H₂\$O₄	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.

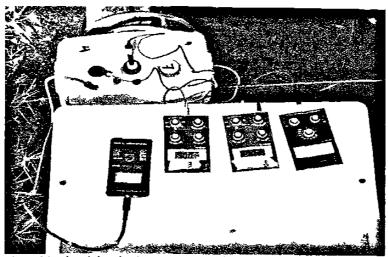


Figura 15. Arreglo de celda de aislamiento para medición de parámetros de campo durante la toma de la muestra.

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 ± 0.1°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 $\pm\,$ 1 digito.

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:

$$CaCO_3 + H^+ = Ca^{2+} + HCO_3^-$$

Disolución mineral/precipitación

$$Fe^{3+} + H_2O \approx Fe (OH)^{2+} + H^+$$

Acomplejamiento

Adsorción/Desorción.

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 (HCO₃⁻ + 2CO₃⁻).

La expresión $\left(m_{CO_3}^- + 2m_{CO_3}^2\right)$ 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 HCO₃ a H2CO₃ 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 ampolletas 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:

	V H ₂ SO ₄	
pН	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/I CaCO ₃
HCO ₃ =	240.32	mg/l

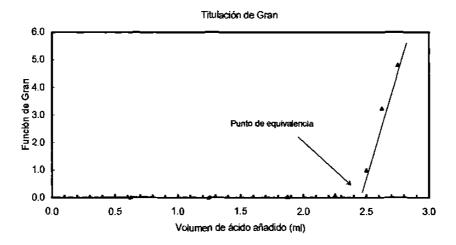


Figura 16. Procedimiento para la titulación por medio del método de Gran. (Appelo y Postma, 1996).

Función de Gran

F= (V+Vo)X10^{-pH} V=volumen de muestra Vo=volumen de ácido añadido

Punto de Equivalencia= [(Vol_{muestra}+Vol_{ácido añadido}) X 10^{-pH}] X 100 La alcalinidad total se obtiene

Alcalinidad [(P eq X Nacido) X 50 000]/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 cunductivímetro 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 (μS/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 ± 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

$$Eh = E_o + E_{electrodo}$$

En donde Eh es el potencial redox de la muestra relativo al electrodo estándar de hidrógeno, E_o es el potencial desarrollado por la muestra en el electrodo de platino y E_{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 Eh 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 + 221.79-0.9286Xtemp.°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 (Ca²⁺, Mg²⁺, 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(O), 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 absortion 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).

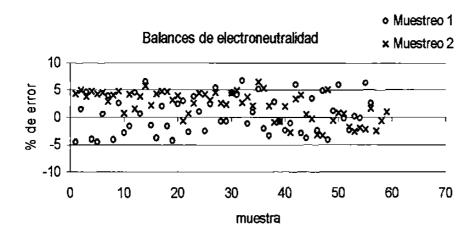


Figura 17. . Porcentaje de error de los balances de electroneutralidad para cada una de las muestras de agua para las dos etapas de muestreo.

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.

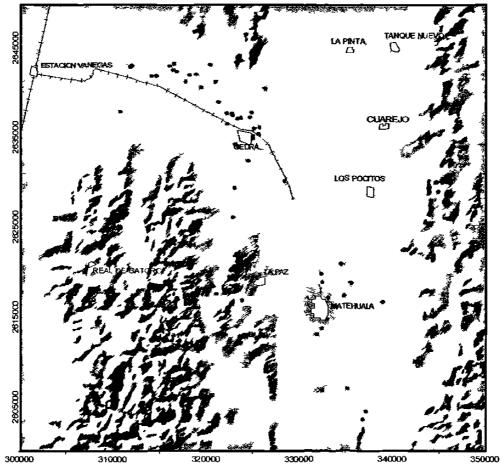


Figura 18. Localización de los aprovechamientos muestreados.

Aprovechamiento muestreado

Aprovechamiento muestreado

4.1 PARÁMETROS DE CAMPO

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 os aprovechamientos de las zonas Cedral, Matehuala y S. de Catorce (primer muestreo).

	Cedr	al n=36		Ma	itehuala r	n=18	S.	de Caton	ce n=8	
Limite [†]	U.de medida	med.	máx.	Mín.	med	Máx.	Mín	med.	Máx	Mín.
Parámetros d	le 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
CI (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	8.0	11.5	4 3	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		·						<u> </u>		
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 tra	aza	<u> </u>								
B (nd)	μg/l	159.1	1344	31.0	670.5	3003	121.5	237.0	929	9.0
Fe (300)	μ g/ 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)	μ g/l	1.9	7.9	0.0	6.2	18.8	0.7	3.7	11.3	0.2
As (30) ²	μg/Ι	2.7	7.9	0.6	2100.	13160	0.3	2.4	8.56	0.3

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).

	Cedral=32			Matehu	uala n=19 S. de C			Catorce n=5		
Limite ¹	U.de medida	med.	máx.	Min.	med	Máx.	Min	med.	Máx	Mín.
Parámetros	de campo	<u></u> -			·					_
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
CI (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		<u> </u>			<u> </u>					
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 t	raza*									
Ba (nd)	μ g/ l	21.7	37.26	9.5	22.8	45.5	7.7	68.8	126.7	11.01
Fe (300)	μ g/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

NOM-127-SSA1-1994 modificada.

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;

nd=no determinado.

²25μg/l para 2005

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).

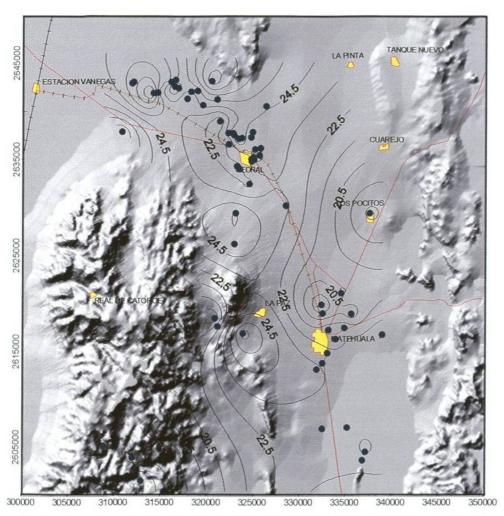


Figura 19. Mapa que muestra la distribución de la temperatura en el área de estudio.

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.

Temperati	uras más l	bajas	Temperate	uras 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 las 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 μmohs/cm y teniéndose como promedio 1644.22 μmohs/cm, registrando los valores más bajos (del orden de los 700 μmohs/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 μs/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.

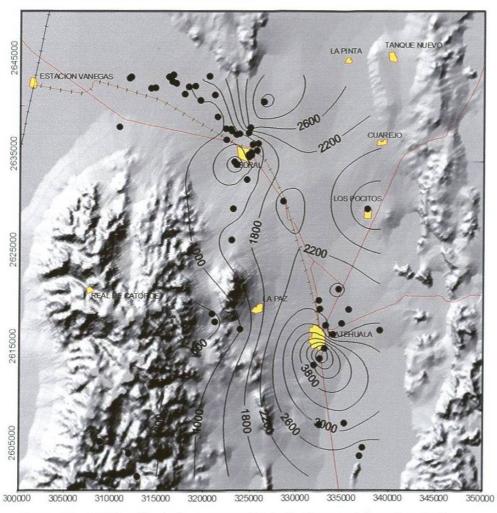


Figura 20. Distribución de la conductividad eléctrica en el área de estudio.

4.1.4. Sólidos Totales Disueltos.

Dentro de los parámetro 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.

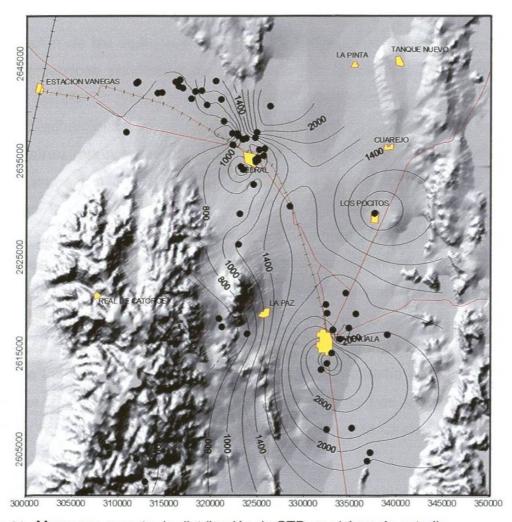


Figura 21. Mapa que muestra la distribución de STD en el área de estudio.