



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

**“EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO**

**CEDRAL-MATEHUALA: ALTERNATIVAS DE USO”**

**TESIS QUE PARA OBTENER GRADO DE**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**PRESENTA:**

**I.G. MARCO DAVID GONZÁLEZ GRIJALVA**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA**

**CODIRECTOR DE TESIS**

**DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES**

**ASESORA**

**DRA. GUADALUPE GALINDO MENDOZA**

San Luis Potosí, SLP  
Septiembre de 2009

---

**PROYECTO REALIZADO EN:**

**LABORATORIO DE ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA (LADISIG)**

**DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

**CON FINANCIAMIENTO DE:**

**PROYECTO FOMIX- SLP “IDENTIFICACIÓN DEL MARCO GEOLÓGICO DEL ACUÍFERO CEDRAL-  
MATEHUALA: HACIA UN MANEJO SUSTENTABLE CON AYUDA DE UN MODELO NUMÉRICO  
MEJORADO”**

**CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)**

**BECA-TESIS (NO. REGISTRO 203540)**

La maestría en ciencias ambientales está incluida en el padrón nacional de posgrados del CONACYT

**DEDICADO A:**

MIS PADRES MARCO ANTONIO GONZÁLEZ JUÁREZ Y ROSALINA GRIJALVA VALDÉZ DE QUIENES HE RECIBIDO AMOR, PACIENCIA, APOYO Y COMPRENSIÓN EN TODO MOMENTO.

A MI ABUELITA MARÍA DOLORES JUÁREZ NAVA POR SU AMOR, CONSEJOS Y SABIDURÍA.

A MIS HERMANOS BELEM, DANIELA E ISRAEL.

A MIS HERMANOS DE MAESTRÍA CATALINA SANTILLANA, TERESA HERNÁNDEZ, BETZA PALAFOX, JORGE ACEVES Y MANUEL CONTRERAS.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco sinceramente al Dr. Javier Castro Larragoitia por la disposición, confianza, asesoramiento académico y apoyo moral que me brindó durante la elaboración de la presente tesis.

Al Dr. Antonio Cardona Benavides por la oportunidad y apoyo laboral, agradezco también su asesoría para realizar el presente trabajo.

A la Dra. Guadalupe Galindo Mendoza por su tiempo y asesoría brindada.

A la M.C. Leticia Padilla Sánchez por su invaluable ayuda en la captura de los datos de campo.

Al M.C. Jorge Aceves de Alba encargado del Laboratorio de Análisis de Imágenes y Sistemas de Información Geográfica del Área de Ciencias de la Tierra, por la ayuda y disposición, para la generación de mapas e impresión de los mismos.

Al Laboratorio de Geoquímica de la UASLP y las laboratoristas IQ María de los Ángeles Navarro González, QFB Sandra Dinorah Ramos Castillo, M.E. Ana María Guadalupe López Hernández; por su profesionalismo y amabilidad para los análisis de las muestras de agua.

A mis compañeros y capacitadores en muestreos de agua: J Refugio Balín, Elías Nuñez y Arturo Pérez.

A Joel Blas por ser mi guía y amigo; a su familia por abrirme las puertas de su casa durante mi estancia en el área del proyecto.

## Índice

---

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Estudios Previos .....</b>	<b>4</b>
<b>Objetivo General.....</b>	<b>8</b>
Objetivos específicos.....	8
<b>1 Descripción del área de estudio.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Generalidades.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Vías de Comunicación .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3 Población .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4 Clima .....</b>	<b>11</b>
<b>1.5 Flora y Fauna .....</b>	<b>12</b>
<b>1.6 Fisiografía .....</b>	<b>14</b>
<b>1.7 Geomorfología.....</b>	<b>15</b>
<b>1.8 Hidrología.....</b>	<b>15</b>
<b>1.9 Geología.....</b>	<b>16</b>
1.9.1 Geología Regional .....	16
1.9.2 Estratigrafía.....	17
<b>1.10 Geología Estructural .....</b>	<b>25</b>
<b>1.11 Unidades Hidrogeológicas.....</b>	<b>25</b>
<b>2 Metodología .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Trabajo de campo.....</b>	<b>27</b>
2.1.1 Censo de aprovechamientos.....	27
2.1.2 Medición de parámetros de campo .....	28
2.1.3 Colecta de muestras de agua .....	32
<b>2.2 Métodos de Laboratorio.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3 Trabajo de Gabinete .....</b>	<b>35</b>
<b>3 Situación Actual del Acuífero.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Resultados.....</b>	<b>37</b>
3.1.1 Resultados del censo.....	39
3.1.2 Piezometría.....	42
3.1.3 Interpretación hidrogeoquímica y de calidad del agua .....	46
3.1.4 Relación de Adsorción de Sodio (RAS) .....	61

**3.2 Propuestas de Alternativas..... 64**

**Conclusiones ..... 69**

**Referencias ..... 72**

## Índice de Figuras.

<b>Figura 1.</b> Localización del área de estudio con poblaciones.....	9
<b>Figura 2.</b> Proyección del crecimiento de la población de Matehuala para el año 2020. (Fuente INEGI, 2005)	11
<b>Figura 3.</b> Subprovincia Fisiográfica Sierras y Llanuras Occidentales de la Sierra Madre Oriental (Pérez, 2006).....	14
<b>Figura 4.</b> Región Hidrológica (Pérez, 2006).....	16
<b>Figura 5.</b> Mapa Geológico del área de estudio (Pérez, 2006).....	18
<b>Figura 6.</b> Formato de cuestionario aplicado por aprovechamiento. ....	29
<b>Figura 7.</b> Ejemplo de la hoja de campo para el muestreo de agua subterránea. ....	30
<b>Figura 8.</b> Celda de aislamiento y equipo utilizado para la medición de los parámetros de campo. ....	31
<b>Figura 9.</b> Sonda Eléctrica utilizada para la medición de niveles piezométricos.....	32
<b>Figura 10.</b> Toma de muestras de agua en pozos.....	33
<b>Figura 11.</b> Filtrado de muestras.....	34
<b>Figura 12.</b> Polígono del Acuífero Administrativo Cedral-Matehuala. ....	38
<b>Figura 13.</b> Gráfica de la comparación de gastos de extracción entre 1981 y 2007.....	40
<b>Figura 14.</b> Distribución de aprovechamientos censados (2007). ....	41
<b>Figura 15.</b> Nivel estático 2007. ....	43
<b>Figura 16.</b> Evolución en el nivel estático 1981-2007.....	44
<b>Figura 17.</b> Elevación al 2007. ....	45
<b>Figura 18.</b> Porcentaje de error en los balances de electroneutralidad para cada muestra de agua. ....	49
<b>Figura 19.</b> Familias de agua dominantes en el acuífero Cedral-Matehuala.....	50
<b>Figura 20.</b> Clasificación de aguas muestreadas según Stiff .....	51
<b>Figura 21.</b> Distribución de los Sólidos Totales Disueltos en aprovechamientos del acuífero Cedral-Matehuala. Símbolo proporcional a la concentración.....	53
<b>Figura 22.</b> Distribución del Sulfato en aprovechamientos del acuífero Cedral-Matehuala. Símbolo proporcional a la concentración.....	54
<b>Figura 23.</b> Distribución de la Dureza en aprovechamientos del acuífero Cedral-Matehuala. Símbolo proporcional a la concentración.....	55
<b>Figura 24.</b> Distribución del Nitrato en aprovechamientos del acuífero Cedral-Matehuala.....	57
<b>Figura 25.</b> Distribución del Arsénico en aprovechamientos del acuífero Cedral-Matehuala. Símbolo proporcional a la concentración.....	58
<b>Figura 26.</b> Zona que delimita con una línea verde los aprovechamientos con mejor calidad de agua para uso público-urbano. ....	59
<b>Figura 27.</b> Pozos activos por uso en zona de buena calidad según la NOM -127-SSA1-1994.....	60
<b>Figura 28.</b> Diagrama de Wilcox para los aprovechamientos cuyo uso es de servicios. ....	61
<b>Figura 29.</b> Diagrama de Wilcox para los aprovechamientos cuyo uso es para abrevaderos. ....	62
<b>Figura 30.</b> Diagrama de Wilcox para los aprovechamientos cuyo uso es agrícola.....	63
<b>Figura 31.</b> Diagrama de Wilcox para los aprovechamientos cuyo uso es para agua potable. ....	63
<b>Figura 32.</b> Diagrama de Wilcox para los aprovechamientos cuyo uso es recreativo.....	64

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Población y tasa media de crecimiento anual (Fuente INEGI, 2005).....	10
<b>Tabla 2.</b> Coordenadas que delimitan el polígono del acuífero Cedral-Matehuala.....	37
<b>Tabla 3.</b> Tipos de aprovechamientos.....	39
<b>Tabla 4.</b> Extracción de agua de según el uso.....	39
<b>Tabla 5.</b> Comparación de extracción de agua entre 2007 y 1981.....	40
<b>Tabla 6.</b> Resumen de los resultados de parámetros de campo.....	46
<b>Tabla 7.</b> Resumen estadístico de las principales características fisicoquímicas de aguas subterráneas (n = 50).....	46
<b>Tabla 8.</b> Balance de electroneutralidad.....	48
<b>Tabla 9.</b> Clasificación de familias de agua mostradas en %.....	49
<b>Tabla 10.</b> Pozos de SAPSAM con parámetros requeridos según la NOM-127-SSA1-1994.....	66

## INTRODUCCIÓN

El agua superficial total que se encuentra contenida en ríos, corrientes de agua y lagos es solo alrededor del 1.5% del volumen de agua total que se encuentra debajo de la superficie terrestre. Generalmente el agua subterránea permanece fuera de nuestra vista. Sin embargo, en algunas ocasiones aflora de manera natural a la superficie en forma de manantial.

En regiones con climas que van de áridos a semiáridos, el agua subterránea es la mayor fuente de abastecimiento del recurso; y en ocasiones la única. Es ahí donde radica la necesidad de realizar estudios como el presente trabajo, donde se pretende generar la información pertinente que permita el diseño y planeación de estrategias adecuadas respecto a este recurso.

Los acuíferos no son específicos de zonas semiáridas pero, en zonas donde la precipitación es muy escasa, su importancia relativa para el desarrollo socioeconómico es mucho más relevante que en regiones más húmedas y sin limitaciones hídricas. De ahí la necesidad por mejorar el conocimiento e investigar la dinámica de las aguas subterráneas en estas regiones con el objetivo de entender sus relaciones con los ecosistemas y mejorar el desarrollo socioeconómico de las poblaciones que dependen de ellas.

De los acuíferos, es importante conocer su morfología y naturaleza así como sus dimensiones y propiedades hidráulicas para evaluar así los recursos potencialmente explotables. Igualmente, es fundamental investigar dónde se localizan las áreas de recarga y descarga así como los procesos que la promueven (el origen del agua, cómo los cambios de uso pueden afectarla, etc.).

En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) por cuestiones administrativas delimita y clasifica los acuíferos del país en zonas, con el propósito de llevar un adecuado control del manejo del recurso subterráneo, tomando en cuenta factores tales como: la distribución de las unidades geológicas, las direcciones de flujo subterráneo y algunas otras condiciones hidrogeológicas. En

este caso se designa a la zona geohidrológica Cedral – Matehuala como acuífero aunque es pertinente mencionar que dichas delimitaciones son útiles para llevar un registro y control de los acuíferos, y no necesariamente concuerdan con los acuíferos reales (desde el punto de vista hidrogeológico) en el país.

El acuífero Cedral-Matehuala, localizado en la porción norte del estado San Luis Potosí, es conocido como el aprovechamiento de agua subterránea de mayor importancia en la parte norte del estado, denominada Altiplano Potosino.

El acuífero en cuestión está considerado como de tipo libre conformado por arenas y gravas de gran heterogeneidad y anisotropía que rellenan las depresiones topográficas. Este material es subyacente y flanqueado por un medio fracturado formado principalmente por carbonatos mesozoicos y rocas volcánicas terciarias que afloran en los altos estructurales de la zona. Casi la totalidad de los aprovechamientos existentes en el área se encuentran emplazados en el medio granular.

La región de Cedral constituye el área con mayor concentración de pozos en los límites del acuífero. El principal factor que condiciona dicha concentración, se debe a que la relación entre la calidad del agua y el volumen de extracción necesario es relativamente aceptable para los fines de riego y abastecimiento de agua potable, por lo que tradicionalmente se ha presentado una competencia por el recurso entre los usos agrícola y rural-urbano en los alrededores. En cambio hacia el sureste, en el área de Matehuala, esta condición se torna desfavorable, ya que en general los caudales específicos disminuyen notablemente y la calidad del agua, en general no es apta para consumo humano, lo que se refleja en una menor densidad de pozos.

Aproximadamente el 67% del agua extraída es utilizada en actividades agrícolas, el 19% es destinado para uso público-urbano, el 3% para uso pecuario y el 11% para otros usos como industrial y de servicios. Por otro lado el sector agrícola, el cual consume el mayor porcentaje del agua extraída en la región, requiere de grandes volúmenes de agua, situación debida a prácticas agrícolas tradicionales,

donde un alto porcentaje del volumen del agua originalmente extraída se pierde ya sea por procesos de evaporación o infiltración a través de los canales de riego, acequias, y en los mismos campos de cultivo (CONAGUA, 2001). Actualmente ha crecido de manera importante la presencia de invernaderos en los alrededores de Cedral, los cuales aunque hacen un uso más óptimo del recurso no disminuyen su consumo.

La región de Cedral-Matehuala tiene una importancia especial en el aspecto hidrogeológico, ya que dentro de las características climáticas del altiplano se puede considerar como "abundante" la presencia 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, la cual es en sí una característica típica de regiones semiáridas. Esta situación pone en evidencia la necesidad de una planeación sustentable para cumplir las expectativas de cada sector y plantea la necesidad de contar con instrumentos que permitan gestionar el recurso de una manera que sea lo más benéfica posible para los usuarios y las futuras generaciones.

Este proyecto se inserta en la necesidad de generar conocimiento técnico que permita contar con herramientas que soporten la toma de decisiones. A pesar de ser un acuífero en el que se han realizado trabajos técnicos hace ya más de treinta años, existe aún una gran cantidad de deficiencias de información, principalmente en la falta de generación de información sistemática que permita obtener una imagen de cómo ha ido reaccionando el sistema acuífero a las modificaciones en su balance hídrico, tanto de manera natural ante el cambio climático, como al inducido por el hombre ante la gran cantidad de aprovechamientos que ha operado a lo largo de los años, en especial los últimos treinta y siete que es en los que se ha generado algo de información.

## Estudios Previos

El número de estudios disponibles relacionados con los recursos hídricos de la región de Matehuala y zonas aledañas es muy reducido, sobre todo en lo que respecta al estudio de las aguas subterráneas. Esta deficiencia es aún más importante cuando se analiza el aspecto de la calidad del recurso hídrico subterráneo, considerando que en el periodo 1982-2004 no se realizó ningún estudio integral que estableciera la distribución de los elementos mayores, menores y traza en el agua subterránea del área de interés.

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

En caso similar, en 1975, se encuentra el estudio elaborado por la empresa Geohidrológica Mexicana, S.A., para la entonces 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 en una serie de planos. Por lo tanto, también se desconoce cuáles 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).

En 1979, la empresa Geohidrológica Mexicana, S.A., elaboró el estudio llamado “Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de

Charco Blanco-Matehuala, San Luis Potosí” elaborado para la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. El objetivo de este trabajo consistió en determinar la localización de conductos cársticos en las formaciones calcáreas aflorantes, las cuales deben estar relacionadas con las zonas de mayor permeabilidad, 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 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: i) determinar las condiciones de explotación del acuífero de la zona “Matehuala-Cedral-Vanegas”, S.L.P.; ii) cuantificar la recarga para establecer la factibilidad de extraer volúmenes adicionales de agua subterránea, sin inducir efectos perjudiciales; iii) definir a nivel anteproyecto las características constructivas y de operación de las captaciones subterráneas con fines de abastecer a la ciudad de Matehuala; y, iv) analizar mediante un modelo simplificado, la posible repuesta piezométrica del acuífero ante varias políticas de extracción.

Razo Soto (2002), en su tesis de maestría, titulada: “Evaluación de la Contaminación de Metales y del Riesgo en Salud en un Sitio Minero de Sulfuros Polimetálicos: Caso de Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P. (México)”, demostró la existencia de una elevada contaminación por arsénico en el área de descarga del acuífero localizada al nororiente 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.

Knauth (2003) en su tesis de maestría titulada: “Determination of Groundwater Recharge with Geochemical and Isotopic Methodes in the Arid Area of Matehuala,

Mexican Altiplano”, establece un balance en la generación del agua subterránea en el área de Cedral y Matehuala mediante perfiles de cloruro y mediciones de isótopos radiactivos (Tritio y  $^{14}\text{C}$ ) y estables (Deuterio y  $^{18}\text{O}$ ).

Bueno Pedroza (2005) en su tesis de maestría titulada: “Interpretación Hidrogeoquímica de los Sistemas de Flujo de la Parte Norte del Altiplano Potosino” identifica la distribución de las características químicas del agua subterránea en el acuífero Cedral-Matehuala, 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.

Castro Larragoitia y colaboradores (2005) en el reporte final del proyecto “Aprovechamiento Sustentable de Recursos Hídricos en la Parte Norte del Altiplano Potosino” concluyeron, entre otras cosas, que con el aumento de la profundidad de las extracciones disminuye la transmisividad del acuífero libre, por lo que los nuevos aprovechamientos presentan menores gastos con aumento de la profundidad, así mismo muestran que la principal zona de explotación en los alrededores de Cedral se está extrayendo agua con edades superiores a los 1000 años, y esta edad aumenta en dirección al SE al igual que la concentración de iones disueltos por lo que se presenta la necesidad de replantear el esquema de extracción y distribución una vez que se disponga de un modelo numérico confiable.

Pérez Morán (2006) en su tesis de licenciatura titulada: “Determinación de los parámetros hidráulicos con métodos analíticos y numéricos en el acuífero Cedral-Matehuala, S.L.P.”, se enfoca en la determinación de la distribución espacial de parámetros hidráulicos, específicamente la conductividad hidráulica, mediante la interpretación de pruebas de bombeo utilizando métodos analíticos y numéricos.

Núñez Perez (2007) presentó su tesis de licenciatura denominada “Determinación de la vulnerabilidad del acuífero Cedral-Matehuala” en la que utilizando modelos básicos de vulnerabilidad obtiene resultados que señalan a la zona colindante al N

de la ciudad de Matehuala como una de las más vulnerables para impactar el acuífero subyacente.

Pelallo Martínez et al., (2008) en el trabajo denominado “Arsenic mobilization in aquatic sediments of an impacted mining area, North Central Mexico” señala a los residuos mineros como la más probable fuente de As en el agua subterránea somera del NE de Matehuala.

Giffin (2008), realizó el trabajo denominado “Hydrostratigraphy and Mapping with implementation into an ArcGIS project in the region of Matehuala San Luis Potosí, Mexico)” en el que utilizando información previa así como alguna generada en el curso del presente estudio, redefinió los límites nororientales del acuífero granular en función de la geología local, así como una corrección en las elevaciones de las cargas hidráulicas de los aprovechamientos evaluados.

Muñoz Quintana (2008) en su tesis de maestría titulada: “Modelo Geológico del Área Cedral – Matehuala y su Relación con los Sistemas de Flujo Subterráneo” con apoyo de sondeos eléctricos verticales (SEV's), definió el espesor del medio granular en algunas zonas distribuidas por el área de estudio.

En la actualidad, Dora Lizeth García Lerma y Raúl Sánchez Flores, ambos pasantes de la carrera de Ingeniero Geofísico de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la UANL, se encuentran utilizando geofísica. En específico, los métodos de gravimetría y sondeos eléctricos verticales (SEV) para generar información que complemente el conocimiento sobre la geometría del acuífero.

## **Objetivo General**

Llevar a cabo un diagnóstico de la situación actual del acuífero Cedral-Matehuala, utilizando para ello información preexistente así como generada en el presente trabajo, que permita plantear alternativas de distribución del recurso acorde a su calidad, a los diferentes usuarios del mismo; a través de propuestas que contribuyan al desarrollo sustentable de la región.

## **Objetivos específicos**

De manera particular, los objetivos específicos son:

1. Realizar un censo general de los aprovechamientos hídricos ubicados en el acuífero administrativo Cedral-Matehuala, identificando aprovechamientos piloto que permitan obtener datos de campo y muestras de agua subterránea.
2. Determinar las áreas que rebasan los límites permisibles para uso público según la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994).
3. Obtener un panorama de la situación actual de la calidad del agua en el acuífero.
4. Obtener la evolución de profundidad en el nivel estático de acuerdo con la información disponible.
5. Proponer alternativas de uso y distribución del recurso hídrico.

## 1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 1.1 Generalidades

La zona de estudio cuenta con un área aproximada de 1650 km<sup>2</sup> y está ubicada en el valle localizado entre la Sierra de Catorce y la Sierra Azul, al norte en el estado de San Luis Potosí; dentro de los paralelos 23°27' y 24° 08' y los meridianos 100° 29'y 100° 50', a unos 148 km aproximadamente (en línea recta) de la ciudad capital.

Las principales cabeceras municipales localizadas dentro de la zona de estudio son Matehuala, Cedral, y Villa de La Paz; así como algunas pequeñas rancherías, todas estas, ubicadas en el estado de San Luis Potosí (Figura 1).

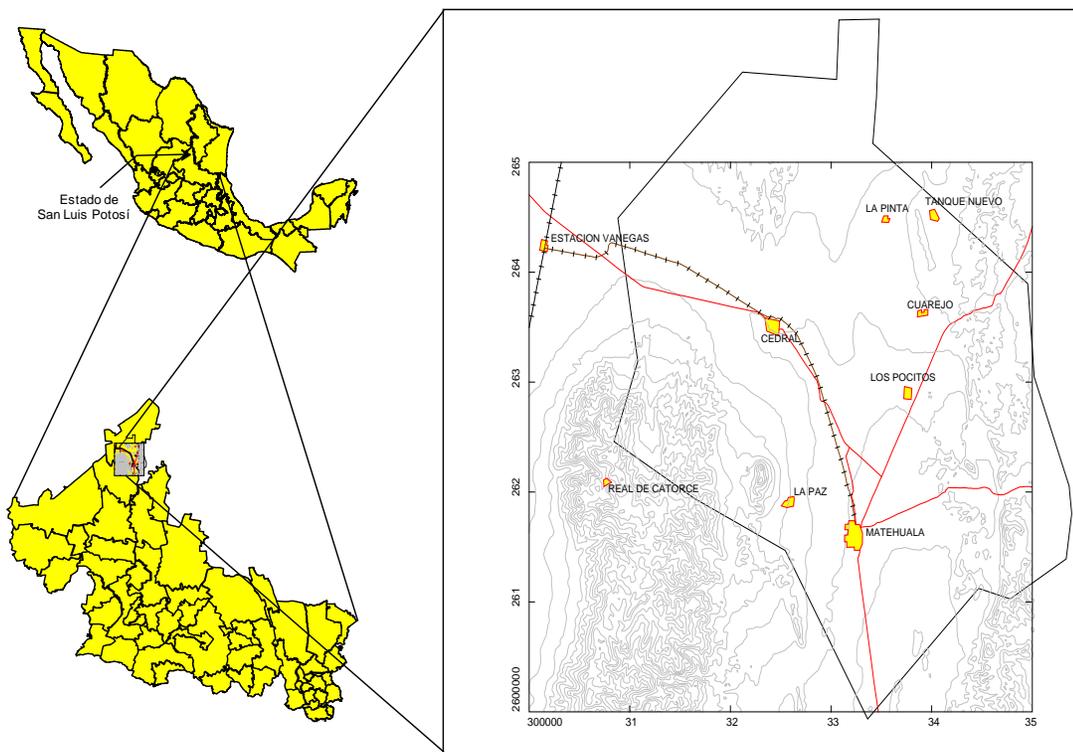


Figura 1. Localización del área de estudio con poblaciones.

## 1.2 Vías de Comunicación

Las principales vías de comunicación son la carretera federal N°57 México-Piedras Negras, tramos San Luis Potosí-Salttillo y dos estatales, una que comunican con Concepción del Oro, Zac. (Carretera Zacatecas-Salttillo) en el entronque a San Tiburcio y la segunda que comunica a Dr. Arroyo, N.L.

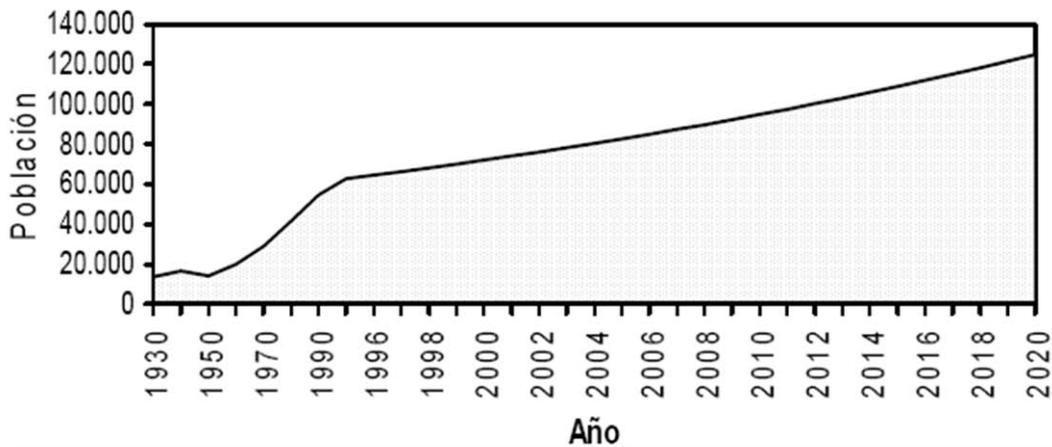
Por otra parte, se encuentran algunos caminos vecinales y brechas que interconectan a las poblaciones y a las rancherías. También cuenta con una vía férrea México-Laredo, que cruza por el extremo occidental de la zona de estudio.

## 1.3 Población

Como se mencionó anteriormente, los municipios ubicados en la zona de interés son: Matehuala, Cedral y Villa de la Paz (Tabla 1), siendo Matehuala el municipio con mayor densidad de población y la tercer ciudad más grande del estado con aproximadamente 80,000 habitantes asentados en un territorio de 1,286 km<sup>2</sup> (62 hab/ km<sup>2</sup> aproximadamente); y se estima que para el 2020 la población incrementará a unos 120 mil habitantes (Figura 2). Cedral tiene una población de 16,498 habitantes y una extensión territorial de 1,185 km<sup>2</sup> (13 hab/km<sup>2</sup> aproximadamente). Ambos municipios tienen un alto porcentaje de población considerada como rural y la principal actividad en la región es la agricultura (INEGI, 2005).

Municipio	Población (al año 2005)	Superficie total del municipio (km <sup>2</sup> )	Densidad de población (hab/km <sup>2</sup> )
Matehuala	82,726	1,286	64.3
Cedral	16,948	1,185	14.3
Villa de la Paz	4,967	131	37.9

**Tabla 1.** Población y tasa media de crecimiento anual (Fuente INEGI, 2005).



**Figura 2.** Proyección del crecimiento de la población de Matehuala para el año 2020.  
(Fuente INEGI, 2005)

#### 1.4 Clima

Se encuentran diferentes tipos de climas a lo largo del estado de San Luis Potosí, cada uno de estos bien identificado y clasificado según Köppen.

El altiplano potosino se caracteriza por ser la parte más árida del estado. Por otra parte, los altos índices de evaporación (1600 a 2300 mm/año) y las bajas precipitaciones (270 a 525 mm/año) presentes en la zona, la clasifican como semiárida a árida (INEGI, 2005).

Como se describe en la clasificación de climas 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.

$C(W_0)(x')$ . 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 (>2500msnm).

## Tipo BS1. Tipos climáticos semiáridos.

BS<sub>1</sub>kw(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 (2000 a 2500 msnm).

BS<sub>0</sub>kw(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).

BS<sub>0</sub>hx´. 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.

BS<sub>0</sub>kx´. Clima árido con veranos calientes (>18% de la precipitación anual durante el invierno). Se localiza en Cedral-Pocitos, al NE del área de estudio.

Generalmente 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 (INEGI, 2005).

## 1.5 Flora y Fauna

La vegetación encontrada en el área está descrita de acuerdo a los tipos de vegetación predominantes; que están determinados por las diferentes altitudes, clima, substrato geológico y suelo (Rzedowsky, 1995). Los tipos son los siguientes:

1. Encinar arbustivo. Este tipo de vegetación es característica de un clima semiárido, requiere de temperaturas relativamente bajas, se desarrolla en altitudes superiores a los 1500m. en suelos someros y bien drenados, más o menos arcillosos y con un pH cercanos 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.

2. Zacatal. Se desarrolla sobre suelos inmaduros, poco profundos. Las características edafológicas pueden variar mucho. En este tipo de vegetación se aprecia a grande 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 filífera*, pueden encontrarse (partes bajas de la Sierra de Catorce y La Paz).
3. Matorral Desértico Micrófilo. Se conforma por elementos arbustivos propios de zonas áridas que se caracterizan por tener hojas de tamaño reducido. Se establece preferentemente en terrenos planos y en las proporciones inferiores de los cerros en altitudes ente 1000 y 2300 msnm, en clima semiseco, seco y muy seco templado. El matorral está formado por individuos arbustivos cuyas alturas van de los 0.5 a los 2.5 m, entre ellos destacan: Gobernadora (*Larrea tridentada*), Duranizillo (*Opuntia leucotricha*), Huizache (*Acacia sp*) y Nopal (*Opuntia sp*). Se encuentra distribuido abundantemente a los largo del valle Cedral-Matehuala.
4. 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: Lechugilla (*Agave lechugilla*), Sotol, Palma Samandoca (*Yuca carnerosana*), Candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) y Palma China (*Yuca filífera*), Ocotillo, Mezquite y variedades diversas de cactáceas (Rzedowski, 1995).

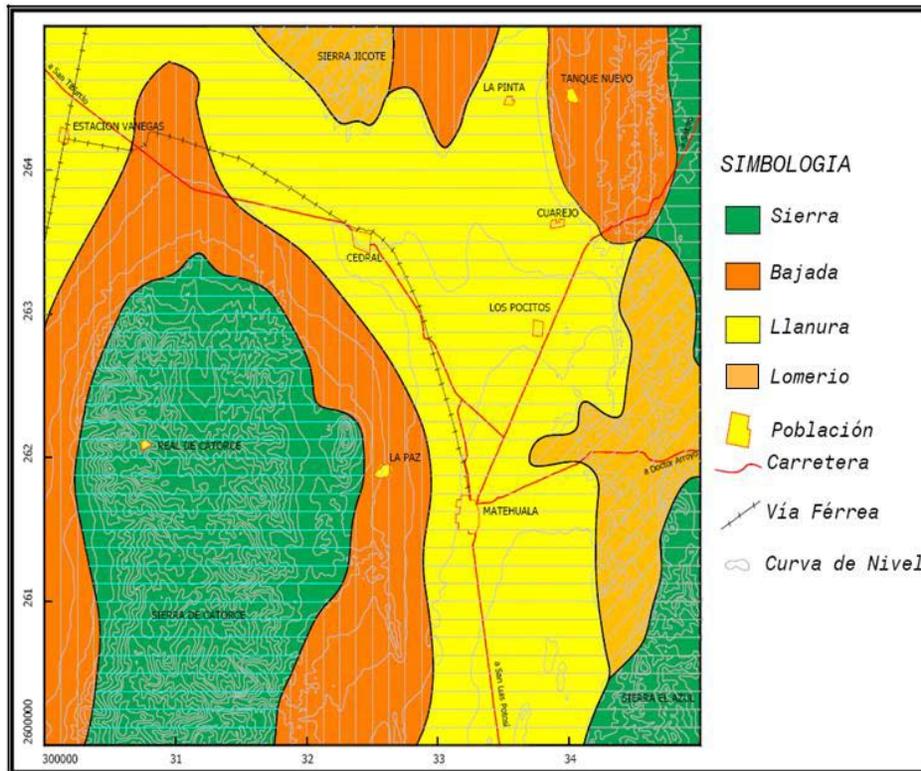
La fauna presente en la región en pequeñas cantidades son: coyote, zorrillo y codorniz común; se pueden encontrar en poblaciones a las siguientes especies: liebre, conejo, paloma alas blancas, pájaro azul, cuervo, huilota, tordo, águila, gavián, coralillo y víbora de cascabel (Gómez-Anguiano, 2001).

## 1.6 Fisiografía

En la Síntesis de Información Geográfica de Estado de San Luis Potosí (2005), el área de estudio está localizada en su totalidad dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, la cuál es un conjunto de sierras menores con estratos plegados constituidos por rocas sedimentarias marinas del Jurásico Superior y Cretácico, en general calizas, areniscas y lutitas.

La zona de estudio pertenece a la Subprovincia Fisiográfica Sierras y Llanuras Occidentales; la cual se caracteriza por constituir sierras de calizas con orientación preferencial norte-sur y unidas entre sí por elevaciones topográficas menores (Figura 3).

Cabe mencionar que La Sierra de Catorce define el límite occidental de la Subprovincia, siendo esta la estructura de mayor importancia y magnitud; y no se encuentra ligada con las otras sierras cercanas.



**Figura 3.** Subprovincia Fisiográfica Sierras y Llanuras Occidentales de la Sierra Madre Oriental (Pérez, 2006).

## **1.7 Geomorfología**

En la zona se observan sierras bajas alargadas, con orientación preferencial nortesur, esto como evidencia de las diversas estructuras de sinclinales y anticlinales por plegamiento de rocas sedimentarias mesozoicas.

La zona se caracteriza por presentar una significativa etapa de erosión llevándose importantes espesores de rocas sedimentarias de las zonas topográficamente mayores excepto la Sierra de Catorce, que es alta y abrupta. Por otra parte, las llanuras conforman cuencas endorreicas rodeadas de diferentes abanicos aluviales que tienden a unirse formando laderas de pendiente suave (INEGI, 2005).

## **1.8 Hidrología**

La hidrología en el estado de San Luis Potosí se caracteriza por tener grandes diferencias. Su distribución está determinada fundamentalmente por la orografía y los tipos de clima.

Para el área de estudio, la región presenta escasas corrientes que se forman en la temporada de lluvias (la mayor parte de ellas entre los meses de mayo y octubre) y su curso es de corta longitud, ya que comúnmente desaparecen en las llanuras, debido a procesos de evaporación y/o infiltraciones. Cabe mencionar que, debido a las condiciones de aridez, el rango de escurrimientos es menor a 10mm, razón por la cual no existe infraestructura hidráulica ni almacenamientos importantes.

Específicamente, el área de interés está localizada en la región hidrológica No. 37-B<sub>RH3</sub> Matehuala de 7,284 km<sup>2</sup> de extensión (Figura 4). La subcuenca Cedral-Matehuala ocupa 3,765 km<sup>2</sup> del total de la cuenca (INEGI, 2005).

Los escurrimientos que se presentan en esta cuenca provienen principalmente de las sierras de Catorce, San Bartolo y el Azul. Entre los arroyos más importantes se encuentran; el arroyo San Antonio, El Colorado, La Boca, Cajón de los Nopales y El Jordan. Todos estos nacen en la porción oriental de la Sierra de Catorce.

Destacan también, los arroyos Mezquital, Matanzas, El Astillero, Las Pilas, El Mimbres y El Salto.

Con lo antes mencionado, se considera 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 está localizada en la parte sur.

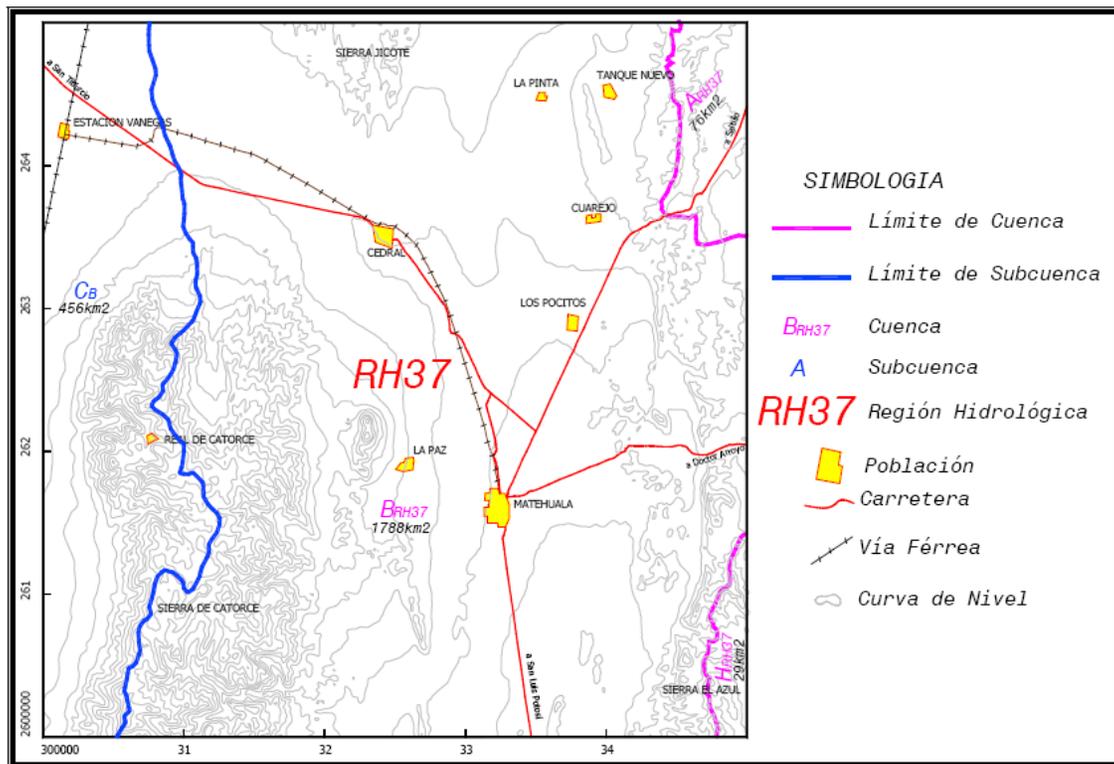


Figura 4. Región Hidrológica (Pérez, 2006).

## 1.9 Geología

### 1.9.1 Geología Regional

Dentro del área de estudio se encuentran diversas unidades geológicas con génesis y naturaleza variada, dicha diversidad está constituida por rocas de origen sedimentario marino y continental; 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. Por otra parte, las rocas de origen marino afloran ampliamente en las elevaciones que se presentan en los flancos oriental y occidental de la zona de interés. Los materiales sedimentarios de origen continental se presentan, en las zonas topográficas de menor elevación.

Las rocas ígneas intrusivas, se presentan en menor cantidad y se localizan en al menos dos afloramientos, uno de ellos ubicado en el poblado de La Paz y el otro en Real de Catorce; poblaciones cuyos yacimientos minerales están estrechamente ligados con estas rocas intrusivas. Las rocas ígneas extrusivas comprenden pequeños derrames de basaltos que tienen una extensión muy limitada, estas se encuentran ubicadas en la zona de Cedral-Vanegas.

#### 1.9.2 Estratigrafía

Existen varias unidades geológicas con edades que van del Paleozoico al Cuaternario. Predominan rocas del Jurásico y el Cretácico, las cuáles han sido clasificadas en al menos 10 formaciones por diferentes autores. Varían en su tipo desde rocas metamórficas y sedimentarias; principalmente calizas, también conglomerados y limolitas.

Dentro del área predominan rocas cretácicas, mismas que están agrupadas en las formaciones el Abra, Cuesta del cura, Indidura y Caracol.

A continuación se presenta una descripción general de las diferentes unidades estratigráficas presentes en el área de interés y el mapa geológico (Figura 5):

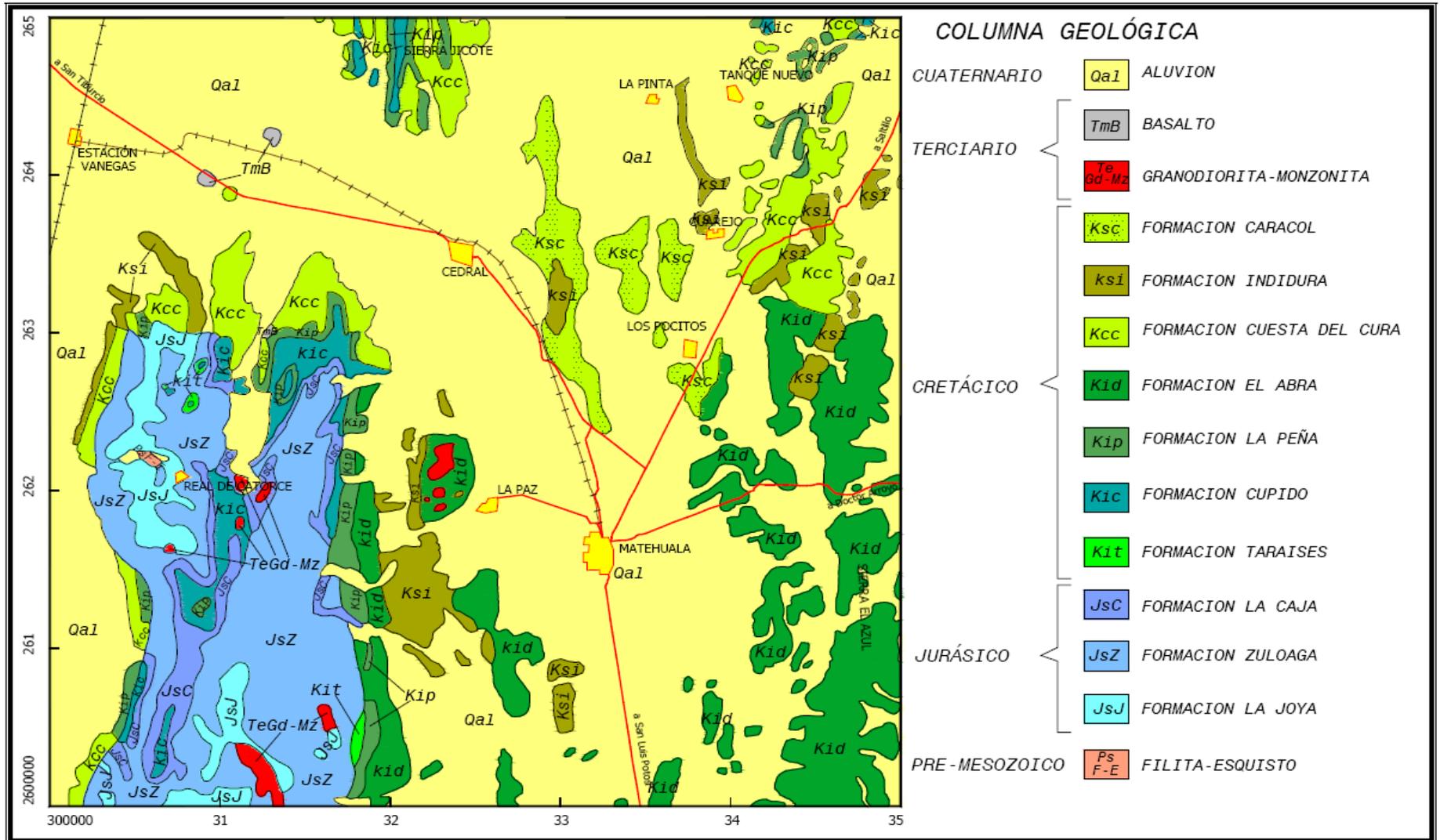


Figura 5. Mapa Geológico del área de estudio (Pérez, 2006)

### 1.9.2.1 Unidades Pre-Mesozoicas

#### Rocas Metamórficas del Paleozoico (Ps F-E)

Algunos afloramientos de rocas metamórficas dentro de la Sierra Madre oriental, están localizados cercanos a Ciudad Victoria, Tamaulipas. Dichos afloramientos están constituidos por rocas metamórficas de origen ígneo como el gneis Novillo (Precámbrico), esquisto Granjeno (Paleozoico), algunos sedimentos Paleozoicos no metamórficos de edad Siluriano y Pérmico Inferior (Gursky, 1996; en Knauthe, 2003).

En el área solo se encuentra un pequeño afloramiento de rocas metamórficas al noroeste del municipio de Real de catorce en la Sierra de Catorce.

### 1.9.2.2 Unidades Mesozoicas

#### Formación la Joya (JsJ)

La formación la Joya está definida como una secuencia clástica continental constituida en la base por conglomerados y limonitas, y en la parte superior por arcillas rojas, limonitas y areniscas conglomeráticas. Dicha formación, aflora en el Anticlinorio Huizachal-Peregrina, en Tamaulipas. Sobreyace a una secuencia volcanogénica y es descrita como tipo *fining upward*; con brechas o conglomerados polimíticos de fragmentos subredondeados de las rocas volcánicas y metasedimentos subyacentes en la base, pasando por areniscas conglomeráticas hasta transformarse en una secuencia monótona de limolitas y en parte lutitas de color rojo y café rojizo (Barboza-Gudiño et al., 2004).

La formación La Joya se encuentra expuesta en la parte central y en el flanco noroeste de la Sierra de Catorce.

### Formación Zuloaga (JsZ)

Esta Formación aflora principalmente en la porción central de la Sierra de Catorce y está constituida por una secuencia calcárea.

En la base, se encuentran calizas cizalladas, de estratificación delgada. En la parte superior, la secuencia está representada por calizas de color gris claro a oscuro, nódulos de pedernal negro y algunos horizontes fosilíferos arcillosos.

En algunos trabajos, a esta formación, se le asigna una edad Oxfordiana del Jurásico Superior.

### Formación La Caja (JsC)

Está compuesta por calizas delgadas y margas, que afloran en la Sierra de La Caja en la parte norte de Zacatecas. Existe un contacto discordante con las calizas gruesas de la subyacente Formación Zuloaga.

Esta unidad tiene una distribución estrechamente asociada con la Formación Zuloaga, aunque con un espesor más reducido.

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 de color gris (IEPSA, 1981). En la porción superior está constituida por limolitas y limolitas con pedernal, con concreciones de caliza oscura y material fosfórico.

A dicha formación se le asigna una edad es del jurásico superior, debido a su contenido faunístico.

### Formación Taraises (Kit)

Aflora en zonas aisladas en los flancos norte y sureste de la Sierra de Catorce. Está constituida por rocas Mudstone-Wackstone ligeramente arcillosas de color

gris. Es considerada de edad Valanginiano al Hauteriviano de acuerdo a su contenido faunístico (Imlay, 1936).

#### Formación Cupido (Kic)

Imlay (1936) definió a esta formación como una secuencia de calizas de color gris con estratificación delgada. Aflora principalmente en la parte central y norte de la Sierra de Catorce; también se pueden encontrar pequeños afloramientos en la parte sur de la Sierra El Jicote.

Las calizas se encuentran en capas delgadas de menos de un metro de espesor, con concreciones de pirita oxidada y estilolitas. En pocas cantidades, se localizan capas pequeñas de margas y lutitas de color rosado.

La edad asignada a esta formación es del Hauteroviano-Barremiano, esto con base en el contenido faunístico. Se correlaciona principalmente con la Formación Tamaulipas Inferior y Superior del cretácico Inferior.

#### Formación La Peña (Kip)

En un trabajo realizado por Estudios Geotectónicos S.A (1981) se describe está conformada por calizas de color gris con algunas intercalaciones de arcillas y limolitas con abundantes nódulos de pedernal; en la parte superior, calizas y lutitas calcáreas de color gris.

Se encuentran afloramientos en gran parte del área de estudio, principalmente en los flancos Este y Oeste de la Sierra de Catorce, en la parte sur de la Sierra El Jicote y en la parte noreste del área de interés, cerca de la comunidad de Tanque Nuevo.

Se le asigna una edad Aptiana debido a su posición estratigráfica y la fauna que contiene. Por otra parte, se considera correlacionable con el Horizonte de Otates de la Sierra de Tamaulipas.

### Formación El Abra (Kid)

Se encuentra en la región oriental y constituye la denominada Sierra Azul, también se encuentran algunos afloramientos en la parte Este de la Sierra de Catorce y en algunos lomeríos dispersos en la planicie. Está dividida en dos unidades: la primera formada Packstone-Grainstone de miliólidos y pellets de color gris; presenta estratificación gruesa en la base a masiva hacia la cima con restos de moluscos en la superficie de erosión. La segunda consiste en Mudstone a Wackstone de miliólidos de color gris, con estratificación gruesa a masiva en algunas partes.

Esta formación se encuentra distribuida en toda la extensión de la Plataforma Valles-San Luis y es correlacionable a las Formaciones Tamabra de facies de talud y Cuesta del Cura de facies de cuenca.

Se considera de una edad del Valanginiano al Santoniano de acuerdo a la fauna que presenta (Basañez-Loyola, *et al.* 1993).

### Formación Cuesta del Cura (Kcc)

Imlay (1936) describe a esta formación como una secuencia de 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 sobreyacen estratigráficamente a las calizas arrecifales de la Formación Aurora e infrayacen a las calizas arcillosas y lutitas de la Formación Indidura.

Esta formación aflora en la parte Norte y Oeste de la Sierra de Catorce, al sur de la Sierra El Jicote; así como en la parte Norte de la Sierra El Azul.

Se encuentran capas delgadas de caliza de color gris que intemperiza y se ve de color gris claro. Presenta horizontes de limolitas rojizas; así como, bandas y nódulos de pedernal negro. Otra característica de esta formación, es la presencia de pliegues de tipo Chevrón.

Se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano, esto debido a su contenido faunístico y su posición estratigráfica. Es correlacionable con la Formación Tamaulipas-Superior de la Sierra de Tamaulipas, con las Formaciones Aurora y Cuesta del Cura de Norte de México y con la Formación El Abra en la Plataforma Valles- San Luis Potosí.

#### Formación Indidura (Ksi)

Aflora principalmente en la parte Norte y Este de la Sierra de Catorce; al Sur y al Norte del municipio de Matehuala y distribuida de manera irregular en la porción Norte de la Sierra El Azul.

Consiste en capas alternadas de calizas arcillosas y lutitas de color gris, con tonalidades que van de rojo a verdoso en la superficie intemperizada (Barboza-Gudiño *et al.*, 1998).

Se le asigna una edad Turoniano y se correlaciona con la Formación Agua Nueva y con las Formaciones Eagle Ford, Boquillas Y Ojinaga. De forma lateral es equivalente al miembro inferior de la Formación Tamasopo, en la Plataforma Valles-San Luis Potosí.

#### Formación Caracol (Ksc)

Fue descrita por Imlay (1936) como una serie de lutitas y calizas que sobreyacen concordantemente en la Formación Indidura. Se presenta principalmente en la parte oriental del municipio de Cedral.

Barboza-Gudiño *et al.* (1998) la describen como capas de lutitas calcáreas de color gris en superficie fresca y amarillenta en superficie intemperizada y escasas areniscas. Las areniscas son de grano grueso y se presentan en capas delgadas con laminación paralela y oblicua curvada. Esta unidad se encuentra sumamente plegada y con la cima erosionada en la mayor parte de los afloramientos.

Se considera que es de una edad Coniaciano-Santoniano, esto por su posición estratigráfica.

### 1.9.2.3 Unidades Cenozoicas

#### Rocas Intrusivas del Terciario (Te Gd-Mz)

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

Dentro de la Sierra El Fraile, los sedimentos calcáreos del Mesozoico 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 Extrusivas del Terciario (TmB)

Existen algunos afloramientos de derrames basálticos en la región noreste y noroeste de los taludes de la Sierra de Catorce que se les relaciona con el fallamiento normal en el Neógeno y el Plesitoceno (Barboza-Gudiño, 1993). Pequeños afloramientos de rocas extrusivas del terciario con composición máfica, se presentan en Vanegas y al noroeste de Estación San Isidro, consiste de un basalto de color oscuro, con estructura vesicular y en ocasiones amigdaloidal con fenocristales de labradorita, horblenda y augita.

#### Materiales Sedimentarios Continentales del Terciario y Cuaternario (Qal)

Es poca la información geológica disponible, por lo tanto es difícil diferenciar en forma definitiva la edad de los materiales geológicos semiconsolidados y sin consolidar que son producto de la erosión de las rocas más antiguas.

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 tamaños que oscilan entre cantos rodados, gravas y arenas

empacados en una matriz areno-arcillosa, parcial o totalmente cementados por calcita.

En el área existen materiales sedimentarios de origen continental del Cuaternario que han sido identificados en una buena porción de las planicies localizadas en el área de interés. La formación Jabonero, por ejemplo; aflora en la región noroeste, específicamente en la porción norte y poniente de la Sierra de Catorce. Consiste de gravas mal clasificadas con clastos subredondeados a angulosos, ocasionalmente cementados por carbonatos. Dentro de las partes topográficas más bajas también se encuentran arcillas, limos, arenas y gravas intercalados y mezclados entre sí, con material cementante que incluye yeso y/o carbonatos.

### **1.10 Geología Estructural**

La Sierra de Catorce es una estructura de levantamiento de edad Terciario Inferior. Tiene una orientación norte-sur y está delimitada por fallas de la misma orientación. Existe una estructura plegada con varias estructuras mayores y numerosos plegamientos menores por lo que se puede decir que hay un anticlinorio.

El plegamiento presente en la Sierra de Catorce son una serie de anticlinales y sinclinales, estas estructuras tienen una dirección predominante norte-sur y no-noroeste. En el frente occidental de la Sierra de Catorce ocurren una serie de fallas normales con dirección norte-sur, esto como producto de la extensión regional del Terciario Inferior y el levantamiento de la Sierra de Catorce (Barboza-Gudiño, 1993).

### **1.11 Unidades Hidrogeológicas**

El área de estudio está localizada dentro de la unidad hidrogeológica denominada Acuífero Cedral-Matehuala (ACM). Esta unidad limita al norte con la Sierra el Tunal, al sur con el valle de Guadalupe, al este con la Sierra el Azul y al oeste con la Sierra de Catorce. El acuífero tiene una superficie aproximada de 1,650 km<sup>2</sup> y

queda ubicado entre las coordenadas 23° 28' y 24° 5' de latitud norte, y los 100° 24' y 100° 54' de longitud oeste.

Pérez Morán (2006) presenta una clasificación de los materiales que afloran en el área de estudio, los cuales se agrupan en unidades de acuerdo a su permeabilidad.

Las trece unidades geológicas se clasifican en 4 unidades permeables y en 4 unidades de escasa permeabilidad.

Las unidades permeables son la Formación Cupido, Formación El Abra, 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 Abra 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.

Las unidades de baja permeabilidad son las Formaciones Zuloaga, La Caja, Cuesta del Cura y Rocas Ígneas Intrusivas. Estas formaciones se caracterizan por constituirse de estratos delgados de material arcilloso, frecuentemente con pedernal, muy comunes en ambientes sedimentarios marinos de cuencas profundas.

## **2 METODOLOGÍA**

Se realizaron visitas periódicas al área de interés con el fin de cumplir los objetivos planteados para el presente trabajo. Para esto fue necesario diseñar una estrategia de trabajo previa a fin de optimizar el tiempo y trabajo de campo. El trabajo de gabinete se realizó con los datos y muestras colectadas durante las vistas de campo; así como también, con la información disponible para el área.

En general, las actividades de campo fueron: censo de aprovechamientos, medición de parámetros físicos y químicos en campo y colecta de muestras de agua subterránea, esto en un lapso de tiempo aproximado de 4 meses.

### **2.1 Trabajo de campo**

#### **2.1.1 Censo de aprovechamientos**

Tomando como base el último censo realizado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se reestructuró con el fin de asegurar la compatibilidad de la información recolectada para los usuarios del proyecto, las autoridades correspondientes y la pertinencia para el caso de estudio, por lo que la base de datos fue actualizándose, durante el curso del presente estudio, con aprovechamientos nuevos y algunos antiguos no incluidos en esta (Figura 6).

La metodología aplicada incluyó visitas a los aprovechamientos localizados en los municipios de Matehuala, Cedral y Villa de la Paz, donde se aplicó el cuestionario que incluía los siguientes datos: localización, construcción, parámetros fisicoquímicos, equipo de bombeo, conducción del agua, fotografías, croquis de ubicación y observaciones con datos verbales de los usuarios.

En función de la información recopilada durante el censo, se seleccionaron los aprovechamientos piloto en los que se medirían parámetros de campo, se recolectarían muestras de agua subterránea y se realizarían sondeos, tomando como criterios: el estado del pozo, uso, localización y accesibilidad.

La información obtenida y las hojas de campo, del total del los aprovechamientos censados, se encuentra incluida en el Anexo 1 (disponible en forma digital):

#### 2.1.2 Medición de parámetros de campo

El formato base utilizado, fue proporcionado por la CONAGUA, el cual se encuentra dividido en datos generales, parámetros medidos en campo e información de las muestras de agua colectadas. Dicho formato se llenó en campo con las mediciones obtenidas por aprovechamiento (Figura 7).

Una vez en el sitio de muestreo se requirió llevar un registro de las condiciones físicas del aprovechamiento, datos fisicoquímicos *in situ*, etc.

La información obtenida y las hojas de campo del total del los aprovechamientos muestreados, se encuentra incluida en el Anexo 2 (disponible en forma digital):



**COMISION NACIONAL  
DEL AGUA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS  
SUBGERENCIA DE EXPLORACIÓN Y MONITOREO  
GEOHIDROLÓGICO  
PARA EL CENSO (VERIFICACIÓN) DE POZOS**

ESTADO San Luis Potosí CLAVE \_\_\_\_\_  
MUNICIPIO \_\_\_\_\_ CLAVE ANTERIOR \_\_\_\_\_  
LOCALIDAD I ZONA GEOHIDROLOGICA Cedral-Matehuala  
NOMBRE LOCAL \_\_\_\_\_ CARTA INEGI N° \_\_\_\_\_  
Ejido, Rancho, Finca, Lote, etc.

PROPIETARIO \_\_\_\_\_

TIPO DE APROVECHAMIENTO Noria ( ) Pozo ( ) OPERACIÓN Activo ( ) Inactivo ( )  
Manantial ( )

**COORDENADAS GEOGRÁFICAS:**

**DATUM** WGS-84

CON GEOPOSICIONADOR: N \_\_\_\_\_ W \_\_\_\_\_  
POR UBICACIÓN EN CARTOGRAFÍA: N \_\_\_\_\_ W \_\_\_\_\_  
NIVEL BROCAL: EN PLANO ( ) ALTÍMETRO ( ) TOPOGRÁFICO ( ) ALTITUD \_\_\_\_\_ m.s.n.m.  
ALTURA DEL BROCAL \_\_\_\_\_ m  
USOS: AGRÍCOLA ( ) PÚBLICO-URBANO O ABASTECIMIENTO: ( ) OTROS ( ) PECUARIO ( )  
TIPO DE CULTIVO Alfalfa y maíz CICLO DE RIEGO Y EN QUE ESTACIÓN DEL AÑO SE REALIZA Todo el año CTE

MEDIDOR TOT. FLUJO SI ( ) NO ( ) MARCA \_\_\_\_\_ SERIE \_\_\_\_\_ LECT \_\_\_\_\_  
MEDIDOR DE CFE SI ( ) NO ( ) No. \_\_\_\_\_ LECTURA \_\_\_\_\_  
NOMBRE DE USUARIO ANTE CFE \_\_\_\_\_

**CROQUIS DE TERMINACIÓN** SI ( ) NO ( ) PROF. TOTAL \_\_\_\_\_ m PROFUNDIDAD CEMENTADA \_\_\_\_\_ m  
REGISTRO ELÉCTRICO SI ( ) NO ( ) PRUEBA DE AFORO Fecha ( )  
CORTE GEOLÓGICO SI ( ) NO ( ) PRUEBA DE BOMBEO Fecha ( )  
AÑO DE CONSTRUCCIÓN \_\_\_\_\_

**ANÁLISIS DE AGUA:** Fecha \_\_\_\_\_ Temperatura \_\_\_\_\_ °C Cond Eléctrica \_\_\_\_\_  mhos/cm  
Sólidos Totales Disueltos \_\_\_\_\_ mg/l

**PIEZOMETRIA** CAUDAL DE OPERACIÓN \_\_\_\_\_ l.p.s.  
HISTORIAL: N.E. Nivel Inicial \_\_\_\_\_ m Fecha \_\_\_\_\_  
Nivel Ultimo \_\_\_\_\_ m Fecha \_\_\_\_\_  
N. D. \_\_\_\_\_ m Fecha \_\_\_\_\_ N. D. \_\_\_\_\_ m Fecha \_\_\_\_\_

TIPO DE MOTOR Eléctrico ( ) Combustión Interna ( ) Aire ( ) Tracción Animal ( )  
TIPO DE BOMBA: Pozo Profundo Lubricado con Agua ( ) Pozo Profundo Lubricado con Aceite ( )  
Sumergible ( ) Centrífuga ( ) Desplazamiento positivo ( )

LONGITUD COLUMNA SUCCIÓN \_\_\_\_\_ m  
DIÁMETRO COLUMNA SUCCIÓN \_\_\_\_\_ cm DIÁMETRO DE DESCARGA \_\_\_\_\_ cm

POTENCIA DEL MOTOR \_\_\_\_\_ H.P. A \_\_\_\_\_ R.P.M.  
TIPO DE DESCARGA: Libre ( ) Tanque Elevado ( ) A la Red ( ) Mixta (Pileta y Tanque) ( )  
Pileta ( ) Canal ( )

**OBSERVACIONES:** \_\_\_\_\_

DEPENDENCIA O EMPRESA INFORMANTE: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería  
FECHA DEL CENSO: \_\_\_\_\_ VERIFICARON Ing. Marco David González Grijalva  
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN: SI ( ) NO ( )

**Figura 6.** Formato de cuestionario aplicado por aprovechamiento.

**Figura 7.** Ejemplo de la hoja de campo para el muestreo de agua subterránea.

Los datos fisicoquímicos como Conductividad Eléctrica (C.E.), Potencial de Hidrógeno (pH), temperatura, Potencial oxidación-reducción (Eh) y Oxígeno Disuelto (O.D.), fueron medidos en una celda de aislamiento, con el fin de limitar la interacción con la atmosfera y de esta manera obtener datos más confiables (Figura 8).



**Figura 8.** Celda de aislamiento y equipo utilizado para la medición de los parámetros de campo.

La medición de estos parámetros se realizó con un aparato digital portátil modelo PC18, serie 3971, marca Conductronic, medidor pH- $\mu$ S- $^{\circ}$ C, calibrado por Conductronic, S.A.

Para el caso de la medición de pH, la calibración se realizó en cada lectura a lo largo del muestro en los aprovechamientos. Utilizando la celda de aislamiento, misma que cuenta con 2 depósitos que contienen solución *buffer* del 4.0 y 7.0 respectivamente, las cuales toman la temperatura del agua en circulación proveniente del aprovechamiento en el cual se lleva a cabo la toma de lectura. La solución *buffer* utilizada tiene las siguientes características: pH 7.00 y 4.01 a 25 $^{\circ}$ C,

marca MLLKT-J. T. Baker, lote no. Y32C14, A18C04, certificación NIST SRM186le SRM185g. El pH varió en un rango de 6.5 a 8.5.

La temperatura fue medida con un termómetro marca Alla France, rango  $-8^{\circ}$  a  $32^{\circ}$   $^{\circ}\text{C}$ , precisión  $0.1^{\circ}\text{C}$ , certificación ASTM E1 595.063EU.

La determinación de la conductividad eléctrica (C.E.) fue medida con un conductímetro y la unidad de medida utilizada se expresa como microsiem por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Los valores oscilaron entre 222 y  $3180 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Para la medición de niveles piezométricos, se utilizó una sonda eléctrica marca Geosistemas SA, modelo GS-SPL8, que constaba de un carrete y un cable eléctrico calibre 18 (Figura 9). Cabe aclarar que del total de los aprovechamientos visitados, solo en 74 de ellos fue posible medir el nivel piezométrico debido a que el pozo se encontraba sellado, la sonda no bajaba, etc.



**Figura 9.** Sonda Eléctrica utilizada para la medición de niveles piezométricos.

### 2.1.3 Colecta de muestras de agua

Durante esta etapa del trabajo se tomaron un total de 50 muestras, las cuales fueron realizadas en 44 pozos, 5 norias y 1 manantial. De manera tal que fue

posible obtener muestras de agua subterránea que sirvieron para obtener una muestra representativa de la población analizada.

Para fines de este estudio y lo planteado en los objetivos, fue necesario, para la obtención de muestras de agua, considerar un protocolo de muestreo de agua subterránea que incluyó los siguientes conceptos:

**Toma de muestra.-** Previo al muestreo y con la finalidad de evitar la contaminación de las muestras de agua, los envases utilizados fueron lavados cuidadosamente con un detergente ligero, enjuagados repetidas veces con agua de uso; después con una solución diluida de HCL al 10% y finalmente con agua destilada por lo menos en tres ocasiones.

Ya en el campo, se enjuagó el recipiente con agua de la descarga del aprovechamiento antes de ser tomada la muestra. Se adaptó una manguera de diámetro pequeño a la válvula de descarga ubicada en la tubería del aprovechamiento y se dejó fluir el agua durante aproximadamente 5 minutos antes de la toma de la muestra. Posteriormente se procedió a llenar el recipiente hasta el tope eliminando la mayor cantidad de burbujas de aire dentro del frasco (Figura 10).



**Figura 10.** Toma de muestras de agua en pozos.

**Filtrado y preservación.-** Se filtraron las muestras en campo para preservar la porción de agua extraída para cada muestra, haciéndolas pasar por una membrana de acetato de celulosa con aberturas de diámetro nominal de 0.45 µmicras. Con esto fue posible remover la mayoría de las bacterias y partículas suspendidas (Figura 11).



**Figura 11.** Filtrado de muestras.

Para la conservación se añadió ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y se mantuvieron refrigeradas las muestras, con el fin de evitar la precipitación de metales e inhibir la actividad bacteriana.

## **2.2 Métodos de Laboratorio**

Las técnicas analíticas utilizadas se aplicaron de acuerdo a las recomendaciones descritas por Armienta *et al.*, (1987); y Deutsh, (1997).

Para su análisis fueron enviadas a los Laboratorios de Análisis Químicos de la Facultad de Ingeniería de la UASLP en la que se determinaron los parámetros considerados como mayores (aniones y cationes). Los elementos traza presentes en las muestras fueron determinados en el laboratorio comercial ActLabs de Ontario Canadá.

Para el análisis de Ca, Mg, Na, y K se utilizó el método de Espectrometría de Absorción Atómica por Flama (FAA) con un Espectrofotómetro Perkin –Elmer AA-5100. Los cloruros fueron analizados por el método Argentométrico y los Sulfatos con el método Turbidimétrico. Por último el análisis de Nitratos se realizó con el método Colorimétrico. Todos estos análisis fueron realizados por personal capacitado en el Laboratorio de Análisis de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.

Para el análisis de elementos traza, se enviaron las muestras de agua a Canadá al laboratorio ActLabs. Previo al envío, las muestras fueron diluidas con agua tridestilada cuyo factor de dilución fue calculado en función de la cantidad de muestra y los requerimientos de análisis establecidos por ActLabs. La tabla con el factor de dilución se encuentra incluida en el Anexo 3 (disponible en forma digital).

El aparato utilizado para determinar elementos traza fue el de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), utilizando las muestras de referencia internacional SLRS-4 y NIST 1640 para verificar su precisión.

### **2.3 Trabajo de Gabinete**

El análisis de los datos por medio de mapas es una herramienta importante que ayuda a una mejor comprensión espacial de los datos, logrando con esto que la interpretación de los mismos se vuelva más sencilla y brinda una visualización más amplia de situaciones que de otra manera pudieran pasar desapercibidas.

Para la representación espacial de la información se recurrió a los programas de cómputo especializados Autocad 2009, Surfer 8.0, ArcGIS 9.2 y Aquachem 4.0.

Las primeras dos herramientas se utilizaron exclusivamente para la edición y generación de mapas; sin embargo, la tercera se utilizó también para la integración de la tabla de datos referida espacialmente y que puede ser utilizada como un sistema de consulta de la información, en la que se pueden agregar nuevos datos, modificarlos y eliminarlos, teniendo como cualidad principal la referencia espacial para poder obtener un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Para la generación de mapas y diagramas se utilizaron los recursos disponibles y pertinentes para la obtención de los mismos.

Equipo de cómputo y software para el análisis de imágenes digitales y sistemas de información geográfica, fueron utilizados durante esta etapa de interpretación a partir de las bases de datos generadas con la información obtenida en campo.

### 3 SITUACIÓN ACTUAL DEL ACUÍFERO

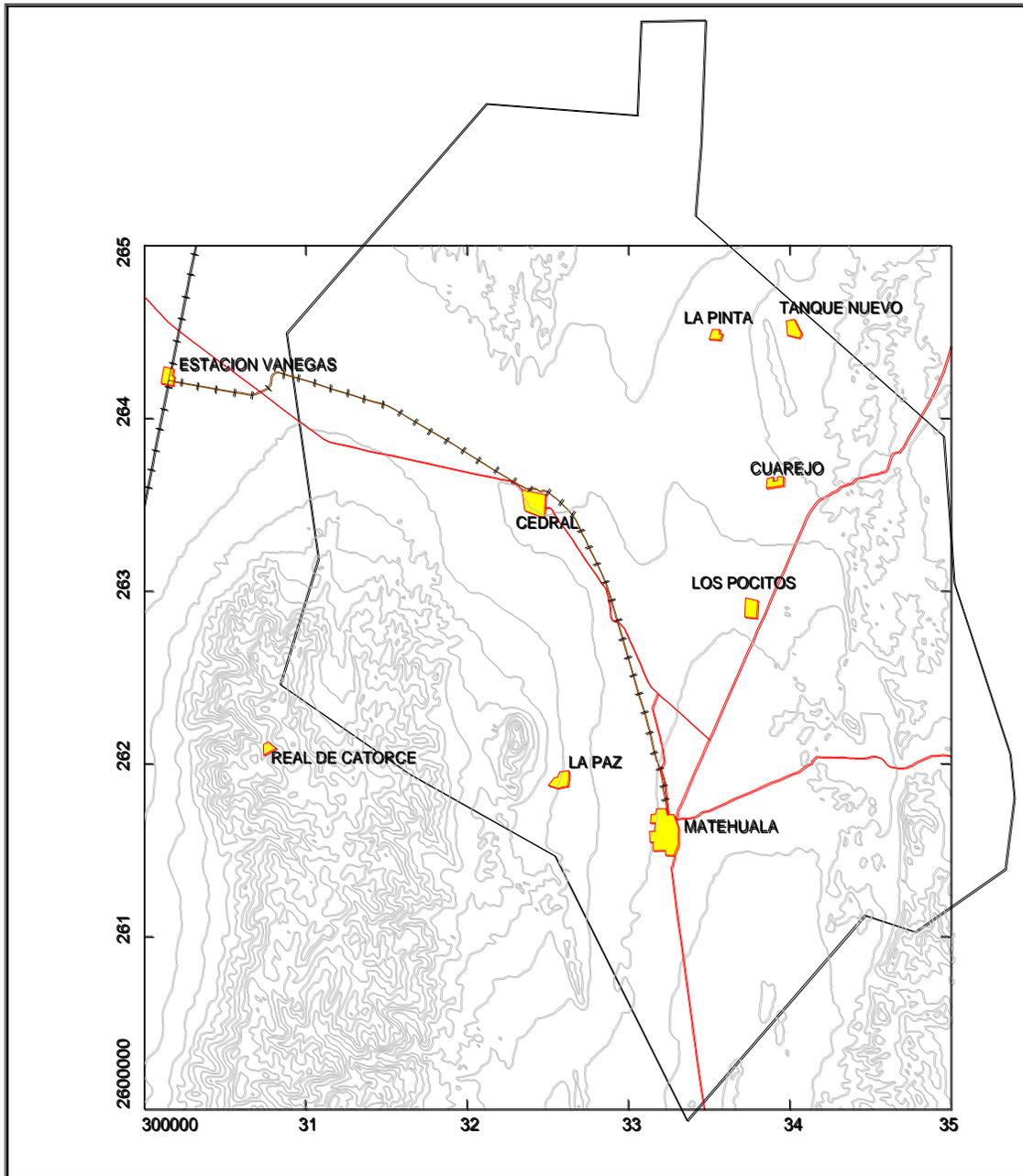
#### 3.1 Resultados

Como ya se mencionó en el primer capítulo, la zona de interés se encuentra localizada en la unidad geohidrológica denominada Acuífero Cedral-Matehuala, el cuál cubre una superficie aproximada de 1650 km<sup>2</sup> y queda ubicado entre las coordenadas 23° 28' y 24° 5' de latitud norte y los 100° 24'y 100° 54' de longitud oeste.

A partir de las coordenadas brindadas por la CONAGUA y el mapa base de INEGI, se generó un mapa que incluye la ubicación del área con el polígono del acuífero (Figura 12). La tabla que a continuación se presenta, muestra las coordenadas que enmarcan el polígono del acuífero (Tabla 2).

Vértice	Coordenadas UTM		Vértice	Coordenadas UTM	
	X	Y		X	Y
1	308435	2624584	11	350190	2630460
2	310796	2631876	12	353657	2620550
3	308817	2644917	13	353915	2618025
4	321203	2658204	14	353364	2613909
5	330549	2657536	15	347799	2610274
6	334515	2655921	16	344662	2611230
7	334156	2651710	17	333641	2599353
8	334515	2655921	18	325454	2614677
9	334156	2651710	19	316443	2619403
10	349543	2638958	20	308435	2624584

**Tabla 2.** Coordenadas que delimitan el polígono del acuífero Cedral-Matehuala.



**Figura 12.** Polígono del Acuífero Administrativo Cedral-Matehuala.

### 3.1.1 Resultados del censo

Durante los recorridos realizados se localizaron un total de 204 aprovechamientos, de distinto tipos (Tabla 3), distribuidos a lo largo y ancho del perímetro del acuífero. Sin embargo dicha distribución no es uniforme, ya que la mayor concentración de aprovechamientos está en la parte centro- norte y principalmente en los alrededores de Cedral; tal como se muestra en la Figura 14.

Con los datos obtenidos en el censo, se observó que aproximadamente el 67% del agua extraída es utilizada en actividades agrícolas, el 19% es destinado para uso público-urbano, el 3% para uso pecuario y el 11% para otros usos como industrial y de servicios.

<b>Tipo</b>	<b>Numero total</b>	<b>Activos</b>	<b>Inactivos</b>
<b>Pozos</b>	171	93	78
<b>Norias</b>	32	22	10
<b>Manantiales</b>	1	1	0
<b>Total</b>	<b>204</b>	<b>116</b>	<b>88</b>

**Tabla 3.** Tipos de aprovechamientos

Por otra parte, con los datos del censo, se logró calcular el gasto de extracción de agua de acuerdo al uso y se obtuvieron los datos que se presentan en la Tabla 4 para el 2007.

<b>Extracción Mm<sup>3</sup>/año</b>	<b>Agrícola Mm<sup>3</sup>/año</b>	<b>Público Mm<sup>3</sup>/año</b>	<b>Otros Mm<sup>3</sup>/año</b>
1.59E+07	6.97E+06	7.66E+06	1.24E+06

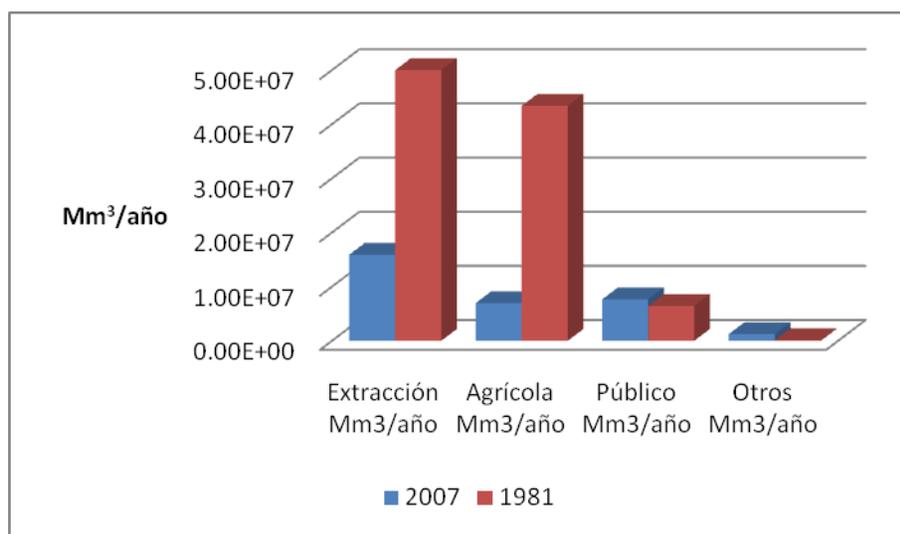
**Tabla 4.** Extracción de agua de según el uso.

En conjunto con lo anterior, se realizó un análisis de la cantidad de agua que se extraía en 1981 y se comparó con la calculada para el 2007, para conocer la diferencia de gastos entre estos dos años. De tal análisis se logró identificar una gran diferencia de extracción total en los últimos 26 años y esta discrepancia está

dada principalmente a que ha habido una gran disminución en la extracción para uso agrícola, tal como se muestra en la Tabla 5. En la Figura 13 se puede observar de manera gráfica la evolución en los gastos de extracción entre estos 2 años.

Año	Total de extracción Mm <sup>3</sup> /año	Agrícola Mm <sup>3</sup> /año	Público Mm <sup>3</sup> /año	Otros Mm <sup>3</sup> /año
2007	1.59E+07	6.97E+06	7.66E+06	1.24E+06
1981	5.00E+07	4.34E+07	6.44E+06	1.30E+05

**Tabla 5.** Comparación de extracción de agua entre 2007 y 1981.



**Figura 13.** Gráfica de la comparación de gastos de extracción entre 1981 y 2007.

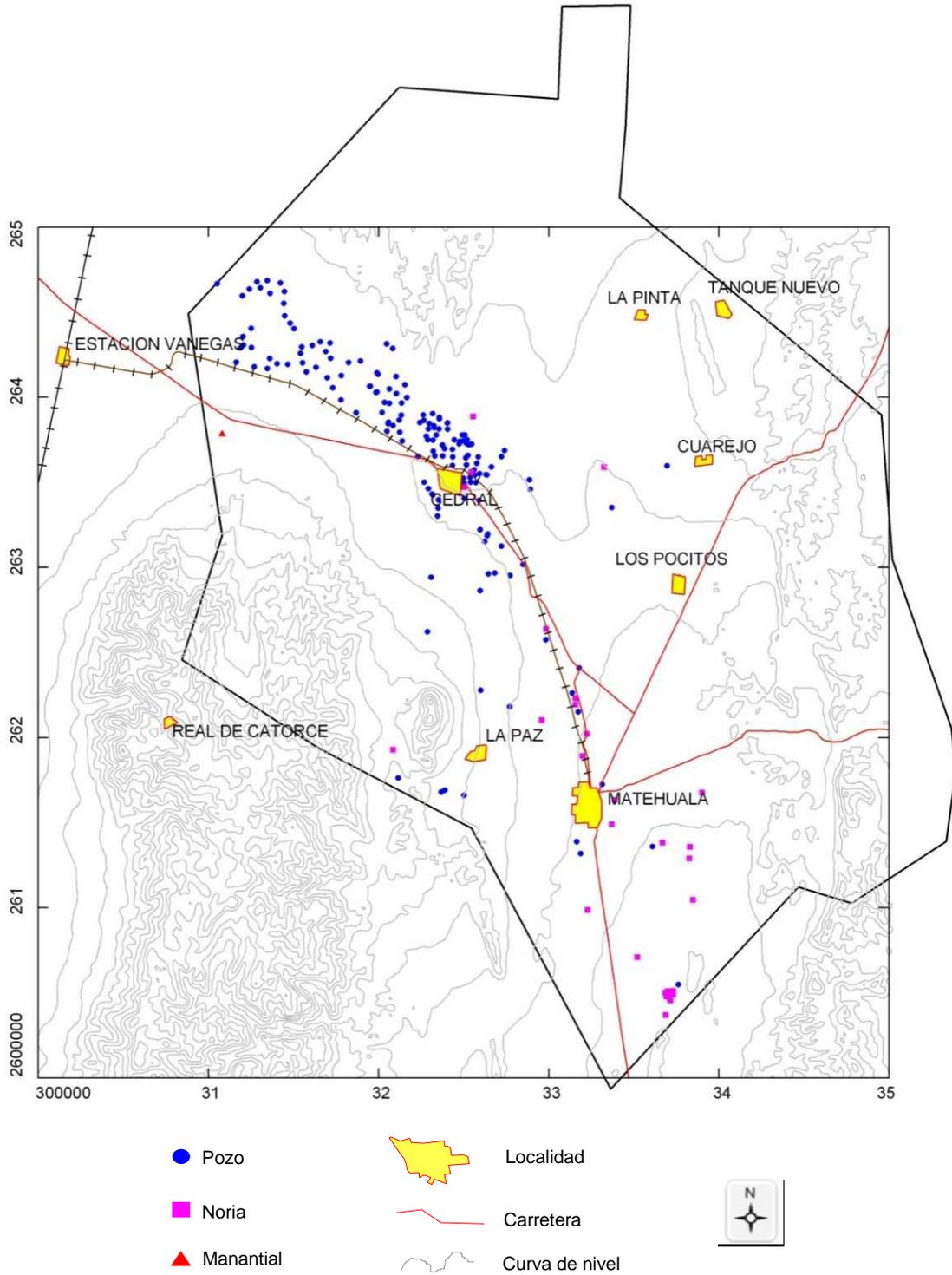


Figura 14. Distribución de aprovechamientos censados (2007).

### 3.1.2 Piezometría

Durante la etapa del censo se seleccionaron los aprovechamientos en los cuáles se podía medir el nivel piezométrico; considerando el estado y equipamiento de los mismos; de manera tal, que fuera posible introducir la sonda y obtener la medición del nivel. Dichas mediciones fueron realizadas en su mayoría durante la campaña del censo y el resto durante la visita en la cual se realizó la toma de muestras de agua y mediciones de parámetros de campo.

Las profundidades del nivel estático para el 2007 se representan en la Figura 15. Dentro de los principales rasgos que se pueden apreciar, está el mantenimiento de un cono de abatimiento localizado en una de las zonas de mayor extracción, al Norte de la ciudad de Cedral, y que en reportes anteriores es localizada como una de las zonas con agua de buena calidad tanto para uso público como agrícola, por lo que a lo largo de los años se ha concentrado en esa zona una buena cantidad de aprovechamientos tanto para uso público urbano como para uso agrícola.

Se hizo un análisis, mediante la generación de un mapa, que muestra la evolución en el nivel estático entre 1981 y 2007 (Figura 16). En este se puede apreciar una diferencia promedio de 45 metros; es decir, ha habido un abatimiento del nivel estático de 1.7 metros por años, aproximadamente. Sin embargo es necesario considerar que en la parte NW de Cedral se tienen valores de 65 m en contraste con la parte sur del mismo municipio en la cual se tienen valores de 25 m.

Por otra parte y con la finalidad de que los datos fueran veraces, se realizó una nivelación de precisión de los brocales, obteniendo niveles de 74 pozos en total (Figura 17). Con lo cual se observa como en general, la dirección de flujo se mantiene en un sentido SE desde la parte NW de Cedral hacia el sur.

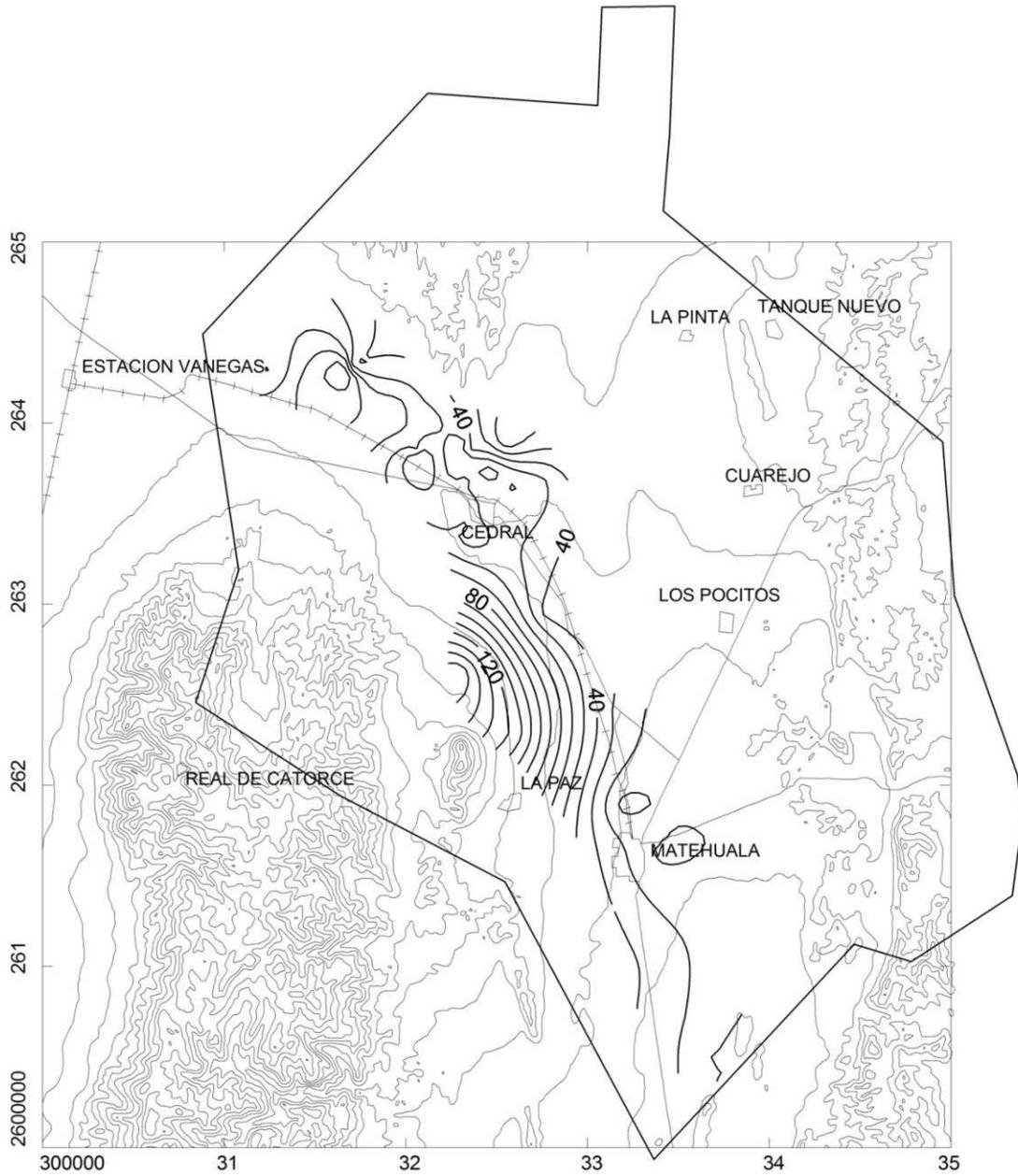


Figura 15. Nivel estático 2007.

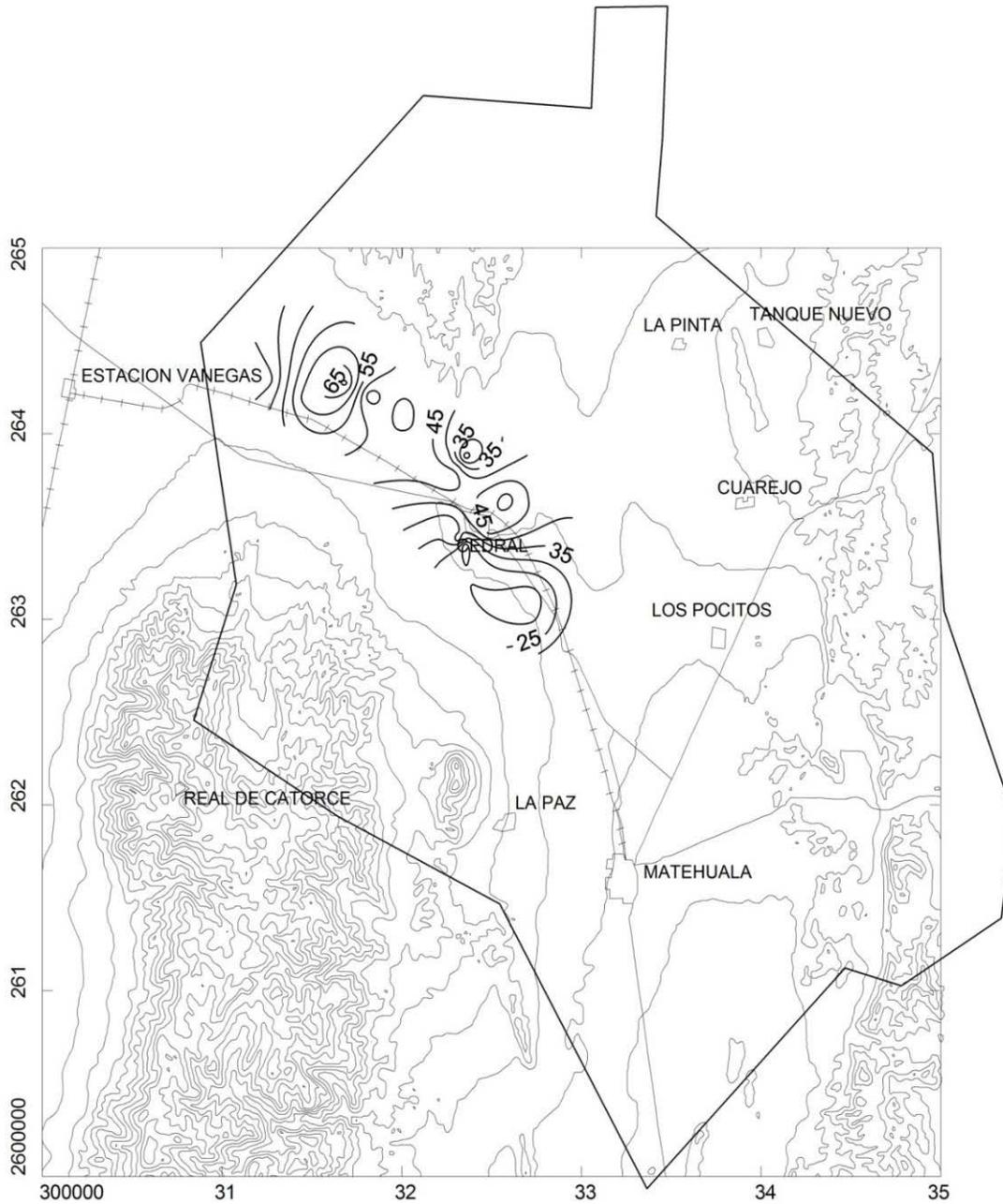


Figura 16. Evolución en el nivel estático 1981-2007.

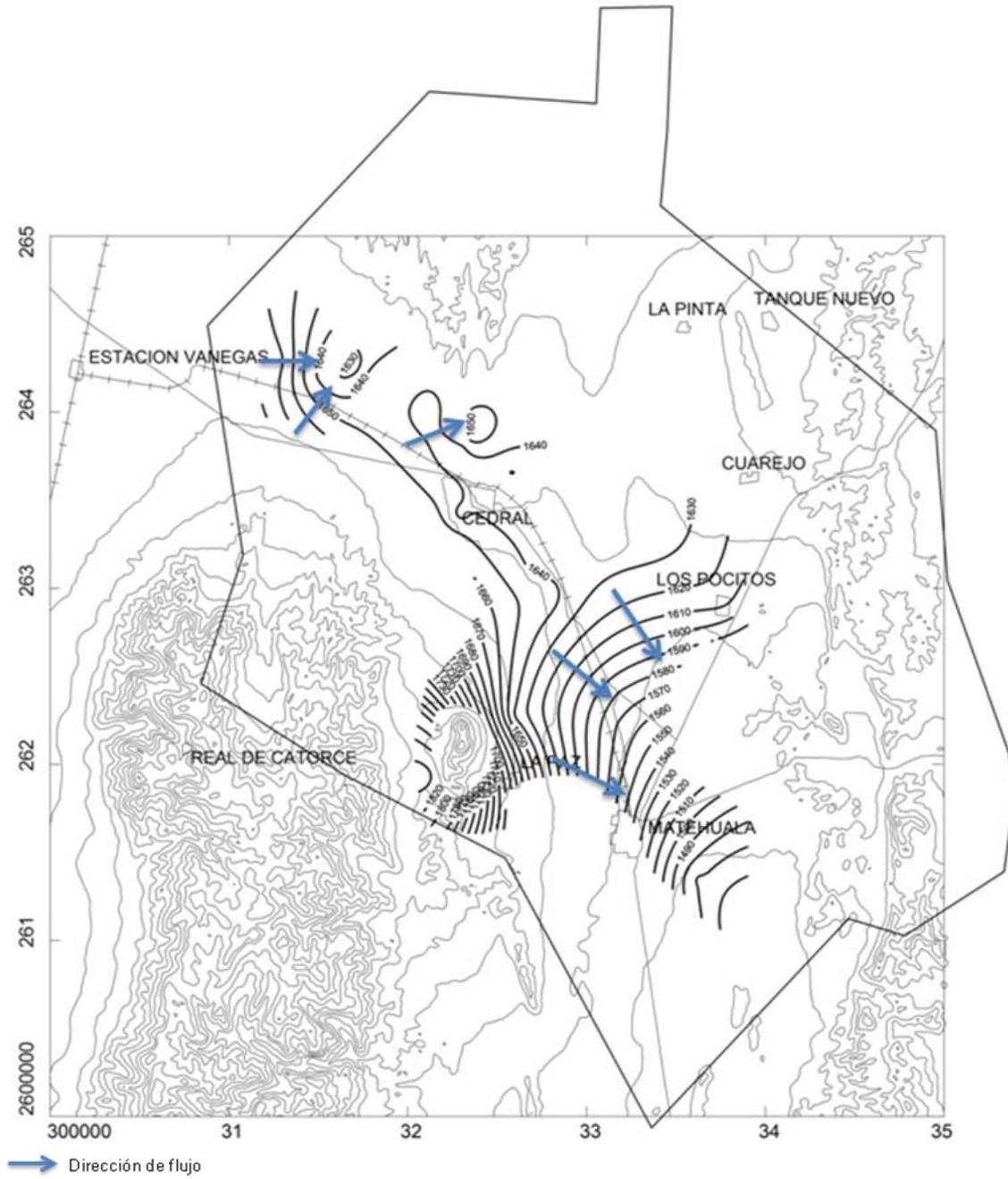


Figura 17. Elevación al 2007.

### 3.1.3 Interpretación hidrogeoquímica y de calidad del agua

Durante el censo realizado y con base en las observaciones realizadas en campo, se seleccionaron un total de 50 aprovechamientos para tomar muestras de agua, tomando en cuenta su distribución, características de construcción y operación, etc.; de manera tal, que se lograra obtener una muestra confiable sobre el estado actual de la calidad del agua subterránea. La Tabla 6 resume los principales resultados de los parámetros de campo y la Tabla 7 muestra las principales especies químicas mayores determinadas en los laboratorios. Las tablas con todos los datos de laboratorio se encuentran disponibles en el anexo 4 el cuál está en formato digital.

Datos de campo					
	Temp. °C	pH	CE (µS/cm)	Eh (mV)	O <sub>2</sub> – dis (mg/l)
<b>Media</b>	24.3	7.2	1351	231	5.2
<b>Min</b>	17.6	6.4	222	95	2.8
<b>Max</b>	32.5	8.0	3180	431	8.9

**Tabla 6.** Resumen de los resultados de parámetros de campo

	Aniones (mg/l)					Cationes (mg/l)					Alcal. Tot. (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Dureza (mg/l CaCO <sub>3</sub> )
	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	CL	SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	NA	K	Ca	Mg	Sr		
Media	228	3.05	40.1	617.6	4.4	41.6	4.2	274	19.1	5.9	324	764
Min	129	n.d.	6.9	27	0.6	7.6	1.1	81	5	0.8	185	243
Max	310	12.72	176.7	1531	28.8	151	11.8	633	44.1	13.1	616	1678

**Tabla 7.** Resumen estadístico de las principales características fisicoquímicas de aguas subterráneas (n = 50)

Utilizando los resultados de los análisis de laboratorio para los elementos mayores, se realizó un balance de electroneutralidad (Tabla 8) con la finalidad conocer la confiabilidad de los resultados de cada una de las muestras y comprobar la exactitud del resultado con relación a los elementos mayores, utilizando la siguiente fórmula:

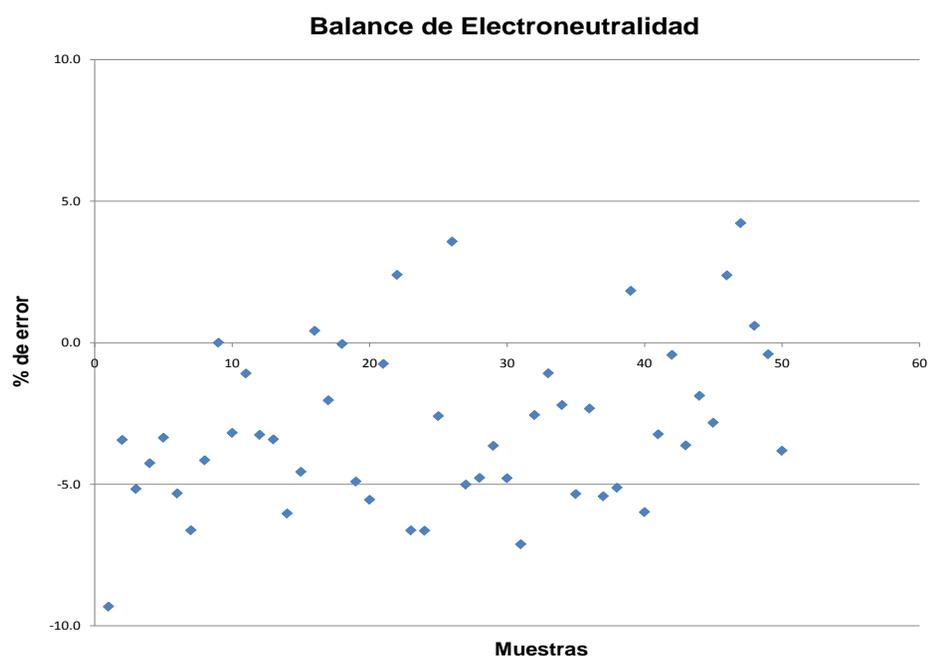
$$\%_{\text{error}} = \left( \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \right) \times 100 \quad (\text{cationes y aniones en meq/l})$$

No. de Aprob.	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	Na (meq)	K (meq)	Ca (meq)	Mg (meq)	HCO3 (meq)	Cl (meq)	SO4 (meq)	NO3 (meq)	Suma Cationes	Suma Aniones	% Error	Na %	K %	Ca %	Mg %	HCO3 %	Cl %	SO4 %	NO3 %
CNA-7-001	20.00	1.23	122.50	12.50	232.78	11.17	215.00	67.31	0.87	0.03	6.11	1.03	-3.82	-0.32	-4.48	-1.09	8.04	-9.70	-9.32	10.82	0.39	76.01	12.79	39.36	3.25	46.20	11.20
CNA-7-007	31.00	1.20	153.60	10.57	245.71	23.35	270.00	19.04	1.35	0.03	7.66	0.87	-4.03	-0.66	-5.63	-0.31	9.91	-10.62	-3.44	13.60	0.31	77.32	8.77	37.93	6.20	52.97	2.89
CNA-7-008	27.00	1.06	151.50	11.79	271.57	23.86	260.00	15.50	1.17	0.03	7.56	0.97	-4.45	-0.67	-5.42	-0.25	9.73	-10.79	-5.17	12.07	0.28	77.69	9.97	41.25	6.24	50.19	2.32
CNA-7-009	14.66	1.95	155.50	14.74	271.57	23.55	248.00	14.61	0.64	0.05	7.76	1.21	-4.45	-0.66	-5.17	-0.24	9.66	-10.52	-4.26	6.60	0.52	80.33	12.55	42.32	6.32	49.12	2.24
CNA-7-012	49.00	1.60	116.00	8.36	258.64	14.22	215.00	7.97	2.13	0.04	5.79	0.69	-4.24	-0.40	-4.48	-0.13	8.65	-9.25	-3.35	24.64	0.47	66.93	7.95	45.84	4.34	48.43	1.39
CNA-7-014	34.00	1.43	105.00	10.94	232.78	12.18	205.00	5.31	1.48	0.04	5.24	0.90	-3.82	-0.34	-4.27	-0.09	7.65	-8.52	-5.33	19.32	0.48	68.45	11.76	44.81	4.03	50.15	1.01
CNA-7-025	24.00	1.51	147.00	8.12	219.84	17.26	290.00	15.06	1.04	0.04	7.34	0.67	-3.60	-0.49	-6.04	-0.24	9.09	-10.38	-6.63	11.49	0.43	80.73	7.35	34.74	4.69	58.23	2.34
CNA-7-029	18.54	3.95	80.64	10.14	155.18	9.70	160.00	7.09	0.81	0.10	4.02	0.83	-2.54	-0.27	-3.33	-0.11	5.77	-6.27	-4.15	13.99	1.75	69.79	14.47	40.61	4.37	53.20	1.82
CNA-7-031	30.00	2.76	135.00	8.75	232.78	14.72	215.00	7.53	1.30	0.07	6.74	0.72	-3.82	-0.42	-4.48	-0.12	8.83	-8.83	0.00	14.78	0.80	76.28	8.15	43.21	4.70	50.72	1.37
CNA-7-032	37.00	3.18	110.00	6.62	219.84	9.14	205.00	6.20	1.61	0.08	5.49	0.54	-3.60	-0.26	-4.27	-0.10	7.72	-8.23	-3.19	20.84	1.05	71.06	7.05	43.78	3.13	51.88	1.21
CNA-7-038	14.75	2.20	110.72	10.80	193.98	13.86	173.00	5.76	0.64	0.06	5.52	0.89	-3.18	-0.39	-3.60	-0.09	7.11	-7.27	-1.09	9.02	0.79	77.69	12.49	43.75	5.38	49.59	1.28
CNA-7-044	42.00	4.10	130.00	13.26	193.98	6.93	320.00	6.64	1.83	0.10	6.49	1.09	-3.18	-0.20	-6.67	-0.11	9.51	-10.15	-3.25	19.21	1.10	68.22	11.47	31.33	1.93	65.69	1.06
CNA-7-045	34.19	5.25	250.56	22.76	181.04	19.40	650.00	4.43	1.49	0.13	12.50	1.87	-2.97	-0.55	-13.54	-0.07	16.00	-17.13	-3.42	9.30	0.84	78.16	11.70	17.33	3.19	79.06	0.42
CNA-7-046	7.61	2.30	252.00	17.89	245.71	9.70	571.00	5.76	0.33	0.06	12.57	1.47	-4.03	-0.27	-11.90	-0.09	14.44	-16.29	-6.03	2.29	0.41	87.11	10.19	24.73	1.68	73.02	0.57
CNA-7-047	15.54	3.03	195.84	16.25	232.78	20.78	405.00	9.74	0.68	0.08	9.77	1.34	-3.82	-0.59	-8.44	-0.16	11.86	-13.00	-4.56	5.70	0.65	82.38	11.27	29.36	4.51	64.92	1.21
CNA-7-054	11.22	2.95	292.32	21.66	193.98	12.47	633.00	4.43	0.49	0.08	14.59	1.78	-3.18	-0.35	-13.19	-0.07	16.93	-16.79	0.42	2.88	0.45	86.15	10.52	18.94	2.09	78.54	0.43
CNA-7-055	53.00	5.68	165.00	16.10	219.84	12.47	405.00	7.09	2.31	0.15	8.23	1.32	-3.60	-0.35	-8.44	-0.11	12.01	-12.51	-2.04	19.20	1.21	68.56	11.03	28.81	2.81	67.46	0.91
CNA-7-057	31.40	4.90	130.64	9.61	193.98	11.08	249.00	7.97	1.37	0.13	6.52	0.79	-3.18	-0.31	-5.19	-0.13	8.80	-8.81	-0.05	15.52	1.42	74.07	8.98	36.10	3.55	58.89	1.46
CNA-7-063	20.24	2.09	126.50	13.89	193.98	24.94	253.00	6.20	0.88	0.05	6.31	1.14	-3.18	-0.70	-5.27	-0.10	8.39	-9.25	-4.91	10.49	0.64	75.25	13.62	34.36	7.60	56.96	1.08
CNA-7-066	31.50	2.24	115.30	13.16	206.91	19.40	248.00	7.97	1.37	0.06	5.75	1.08	-3.39	-0.55	-5.17	-0.13	8.26	-9.23	-5.55	16.58	0.69	69.62	13.10	36.73	5.93	55.95	1.39
CNA-7-068	33.02	1.98	155.50	12.58	232.78	19.40	285.00	8.41	1.44	0.05	7.76	1.03	-3.82	-0.55	-5.94	-0.14	10.28	-10.44	-0.75	13.97	0.49	75.47	10.07	36.56	5.24	56.89	1.30
CNA-7-081	10.18	2.19	285.82	21.61	232.78	20.78	542.00	4.43	0.44	0.06	14.26	1.78	-3.82	-0.59	-11.29	-0.07	16.54	-15.77	2.40	2.68	0.34	86.24	10.75	24.21	3.72	71.62	0.45
CNA-7-090	10.41	2.11	246.00	18.85	245.71	12.47	571.00	5.76	0.45	0.05	12.28	1.55	-4.03	-0.35	-11.90	-0.09	14.33	-16.37	-6.63	3.16	0.38	85.65	10.82	24.61	2.15	72.68	0.57
CNA-7-093	48.00	2.20	273.00	21.61	258.64	15.24	733.00	6.20	2.09	0.06	13.62	1.78	-4.24	-0.43	-15.27	-0.10	17.54	-20.04	-6.64	11.90	0.32	77.65	10.13	21.16	2.14	76.20	0.50
CNA-7-099	133.00	8.65	358.56	31.82	245.71	20.78	1116.00	3.99	5.79	0.22	17.89	2.62	-4.03	-0.59	-23.25	-0.06	26.52	-27.93	-2.59	21.82	0.83	67.48	9.87	14.42	2.10	83.25	0.23
CNA-7-107	23.14	2.76	316.80	28.12	181.05	62.35	615.00	20.81	1.01	0.07	15.81	2.31	-2.97	-1.76	-12.81	-0.34	19.20	-17.87	3.57	5.24	0.37	82.34	12.05	16.60	9.84	71.68	1.88
CNA-7-111	9.59	1.85	238.00	18.92	193.98	22.17	550.00	6.20	0.42	0.05	11.88	1.56	-3.18	-0.63	-11.46	-0.10	13.90	-15.36	-5.01	3.00	0.34	85.46	11.20	20.70	4.07	74.58	0.65
CNA-7-112	21.13	2.66	261.00	22.80	245.71	15.24	622.00	3.99	0.92	0.07	13.02	1.88	-4.03	-0.43	-12.96	-0.06	15.89	-17.48	-4.78	5.79	0.43	81.98	11.81	23.04	2.46	74.13	0.37
CNA-7-120	20.00	2.21	227.00	21.25	245.71	16.63	505.00	2.66	0.87	0.06	11.33	1.75	-4.03	-0.47	-10.52	-0.04	14.00	-15.06	-3.64	6.21	0.40	80.90	12.48	26.74	3.11	69.86	0.28
CNA-7-121	10.10	2.00	245.00	20.17	232.76	16.63	550.00	4.87	0.44	0.05	12.23	1.66	-3.82	-0.47	-11.46	-0.08	14.38	-15.82	-4.79	3.06	0.36	85.05	11.54	24.12	2.96	72.42	0.50
CNA-7-128A	27.50	2.79	205.00	16.08	271.57	12.47	475.00	5.31	1.20	0.07	10.23	1.32	-4.45	-0.35	-9.90	-0.09	12.82	-14.79	-7.12	9.33	0.56	79.79	10.32	30.11	2.38	66.93	0.58

No. de Aprov.	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	Na (meq)	K (meq)	Ca (meq)	Mg (meq)	HCO3 (meq)	Cl (meq)	SO4 (meq)	NO3 (meq)	Suma Cationes	Suma Aniones	% Error	Na %	K %	Ca %	Mg %	HCO3 %	Cl %	SO4 %	NO3 %
CNA-7-132	30.58	5.12	457.80	27.12	258.64	26.32	1098.00	4.43	1.33	0.13	22.84	2.23	-4.24	-0.74	-22.88	-0.07	26.54	-27.93	-2.56	5.01	0.49	86.09	8.41	15.18	2.66	81.90	0.26
CNA-7-136	38.91	6.25	486.72	30.09	232.78	63.73	1131.00	3.99	1.69	0.16	24.29	2.48	-3.82	-1.80	-23.56	-0.06	28.62	-29.24	-1.08	5.91	0.56	84.88	8.65	13.05	6.15	80.58	0.22
CNA-7-144	105.50	9.09	442.08	35.33	258.64	85.90	1161.00	17.27	4.59	0.23	22.06	2.91	-4.24	-2.42	-24.19	-0.28	29.79	-31.13	-2.20	15.41	0.78	74.06	9.76	13.62	7.78	77.70	0.89
CNA-7-158	14.50	2.43	255.00	20.73	245.71	20.78	571.00	19.93	0.63	0.06	12.72	1.71	-4.03	-0.59	-11.90	-0.32	15.12	-16.83	-5.35	4.17	0.41	84.14	11.28	23.93	3.48	70.68	1.91
CNA-7-159-A	14.71	2.74	241.60	21.21	206.91	18.01	537.00	7.09	0.64	0.07	12.06	1.74	-3.39	-0.51	-11.19	-0.11	14.51	-15.20	-2.33	4.41	0.48	83.08	12.02	22.31	3.34	73.59	0.75
CNA-7-166	96.68	6.37	345.00	44.11	245.71	90.06	1005.00	37.20	4.21	0.16	17.22	3.63	-4.03	-2.54	-20.94	-0.60	25.21	-28.11	-5.43	16.68	0.65	68.28	14.39	14.33	9.04	74.50	2.13
CNA-7-167	67.45	7.04	572.80	33.31	219.84	76.20	1531.00	31.44	2.93	0.18	28.58	2.74	-3.60	-2.15	-31.90	-0.51	34.44	-38.16	-5.12	8.52	0.52	83.00	7.96	9.45	5.63	83.59	1.33
CNA-7-170	121.50	6.71	601.60	33.39	284.50	113.61	1365.00	33.66	5.28	0.17	30.02	2.75	-4.66	-3.20	-28.44	-0.54	38.22	-36.85	1.83	13.83	0.45	78.54	7.19	12.66	8.70	77.17	1.47
CNA-7-172	108.20	10.86	601.60	19.58	219.84	137.16	1531.00	118.24	4.71	0.28	30.02	1.61	-3.60	-3.87	-31.90	-1.91	36.61	-41.28	-5.98	12.85	0.76	81.99	4.40	8.73	9.37	77.27	4.62
CNA-7-174A	11.26	11.05	593.60	22.81	181.05	24.94	1465.00	14.61	0.49	0.28	29.62	1.88	-2.97	-0.70	-30.52	-0.24	32.27	-34.43	-3.24	1.52	0.88	91.79	5.81	8.62	2.04	88.65	0.68
CNA-7-175-A	39.14	11.82	598.40	24.01	193.98	55.42	1398.00	16.39	1.70	0.30	29.86	1.98	-3.18	-1.56	-29.13	-0.26	33.84	-34.13	-0.43	5.03	0.89	88.24	5.84	9.32	4.58	85.33	0.77
CNA-7-180-D	80.39	2.59	125.00	16.34	271.57	59.58	250.00	39.86	3.50	0.07	6.24	1.34	-4.45	-1.68	-5.21	-0.64	11.14	-11.98	-3.63	31.38	0.59	55.97	12.06	37.15	14.02	43.46	5.36
CNA-7-184	12.35	1.21	105.70	5.04	258.64	41.57	27.00	32.33	0.54	0.03	5.27	0.41	-4.24	-1.17	-0.56	-0.52	6.26	-6.50	-1.88	8.59	0.49	84.29	6.63	65.27	18.05	8.66	8.03
CNA-7-186	151.00	2.65	91.20	14.96	310.37	55.42	295.00	21.26	6.57	0.07	4.55	1.23	-5.09	-1.56	-6.15	-0.34	12.42	-13.14	-2.83	52.89	0.55	36.65	9.91	38.72	11.90	46.77	2.61
CNA-7-205	11.07	2.20	232.00	19.46	232.78	24.94	405.00	7.53	0.48	0.06	11.58	1.60	-3.82	-0.70	-8.44	-0.12	13.72	-13.08	2.38	3.51	0.41	84.41	11.67	29.18	5.38	64.51	0.93
CNA-7-210	37.00	10.72	633.47	22.97	181.05	88.35	1200.00	127.54	1.61	0.27	31.61	1.89	-2.97	-2.49	-25.00	-2.06	35.38	-32.52	4.22	4.55	0.77	89.34	5.34	9.13	7.66	76.88	6.33
CNA-7-211	120.90	7.46	475.00	36.91	193.98	176.70	1080.00	70.86	5.26	0.19	23.70	3.04	-3.18	-4.98	-22.50	-1.14	32.19	-31.81	0.60	16.34	0.59	73.64	9.43	10.00	15.67	70.74	3.59
CNA-7-212	51.78	9.32	542.00	18.61	310.37	126.21	1050.00	49.60	2.25	0.24	27.05	1.53	-5.09	-3.56	-21.88	-0.80	31.07	-31.32	-0.41	7.25	0.77	87.06	4.93	16.24	11.37	69.84	2.55
CNA-7-222	76.00	9.73	450.00	16.55	129.32	176.70	1025.00	67.31	3.31	0.25	22.46	1.36	-2.12	-4.98	-21.35	-1.09	27.37	-29.54	-3.82	12.08	0.91	82.04	4.97	7.18	16.87	72.28	3.67

**Tabla 8.** Balance de electroneutralidad.

El 74% de las muestras presentó un error entre 0% y  $\pm 5\%$ ; el 26% restante con error entre  $\pm 5.1\%$  y  $\pm 10\%$ : El mayor valor de error fue de  $\pm 9.3\%$ . En la Figura 18 se representa esta información con más detalle:



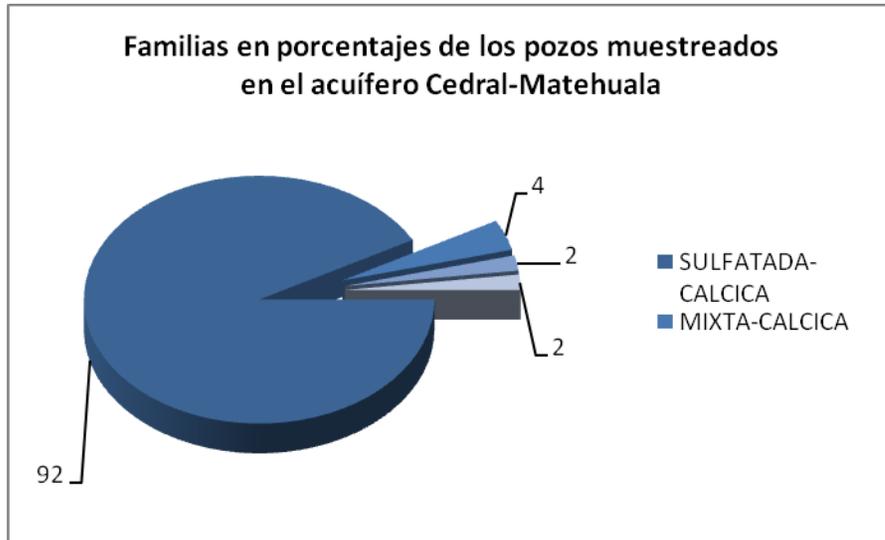
**Figura 18.** Porcentaje de error en los balances de electroneutralidad para cada muestra de agua.

A partir de los datos proporcionados por los laboratorios de los resultados de las muestras de agua enviadas para su análisis, se determinó el contenido de iones mayores.

De los 50 aprovechamientos muestreados se realizó la clasificación por familias como se presenta en la Tabla 9 y se representa de manera grafica en la Figura 19.

<b>Familia</b>	<b>%</b>
SULFATADA-CALCICA	92
MIXTA-CALCICA	4
BICARBONATADA-CALCICA	2
MIXTA-SÓDICA	2

**Tabla 9.** Clasificación de familias de agua mostradas en %.



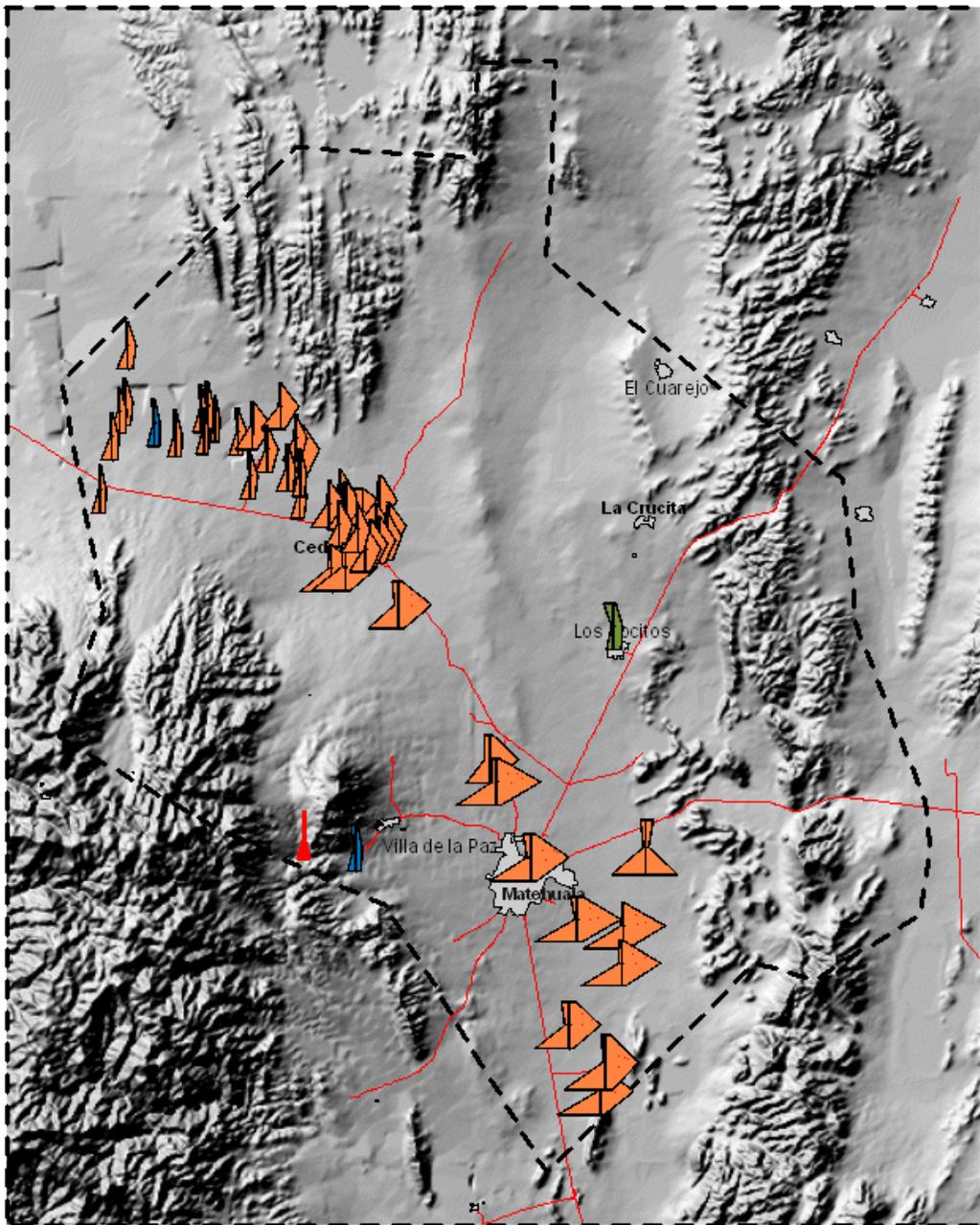
**Figura 19.** Familias de agua dominantes en el acuífero Cedral-Matehuala.

### 3.1.3.1 Diagramas de Stiff

Se realizó un mapa con la distribución y los contenidos relativos de elementos mayores en las muestras tomadas en los aprovechamientos; la representación gráfica está dada en diagramas de Stiff los cuáles fueron realizados en Aquachem (Figura 20).

Los diagramas de Stiff permiten visualizar la trayectoria de flujo en relación con la composición química del agua subterránea. Se observa que la principal zona de recarga se encuentra localizada en la parte centro-norte de la Sierra de Catorce, en esta parte el mayor caudal se encuentra hacia el norte de la misma donde al ingresar al material granular del valle, las aguas tienen carácter de mixtas-cálcicas; al continuar por el valle, interaccionan con el medio confinante de manera que a lo largo de la trayectoria va aumentando la carga de solutos, transformándose esta agua subterránea en sulfatada-cálcica.

Por otra parte, las aguas de aprovechamientos que se encuentran cerca de las rocas carbonatadas, como es el área cercana a Villa de la Paz, al W de Matehuala, muestran un carácter distintivo ya sea de aguas carbonatadas o mixtas-cálcicas, las cuales al circular en el material de relleno se van tornando sulfatadas.



### Familias de Agua

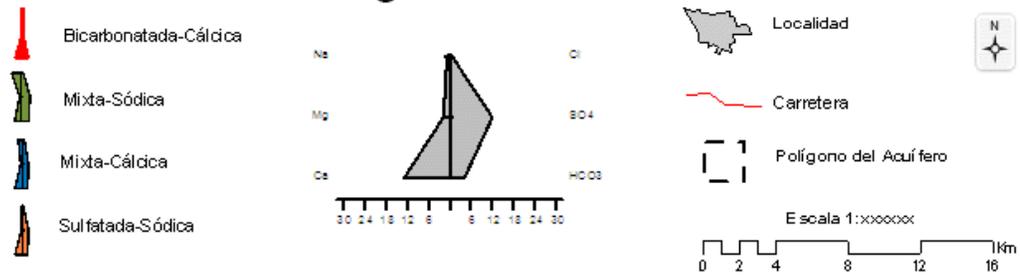


Figura 20. Clasificación de aguas muestreadas según Stiff

### 3.1.3.2 Sólidos Totales Disueltos (STD)

Los STD fueron otros de los parámetros analizados y que también se encuentran dentro de la NOM-127SSA1-1994. En el mapa generado (Figura 21) se observa la distribución de los aprovechamientos que y la concentración resultante para este parámetro; de manera que se observa que los pozos localizados, al NW de la ciudad de Cedral cumplen con este parámetro y se encuentran dentro de la zona marcada (línea morada).

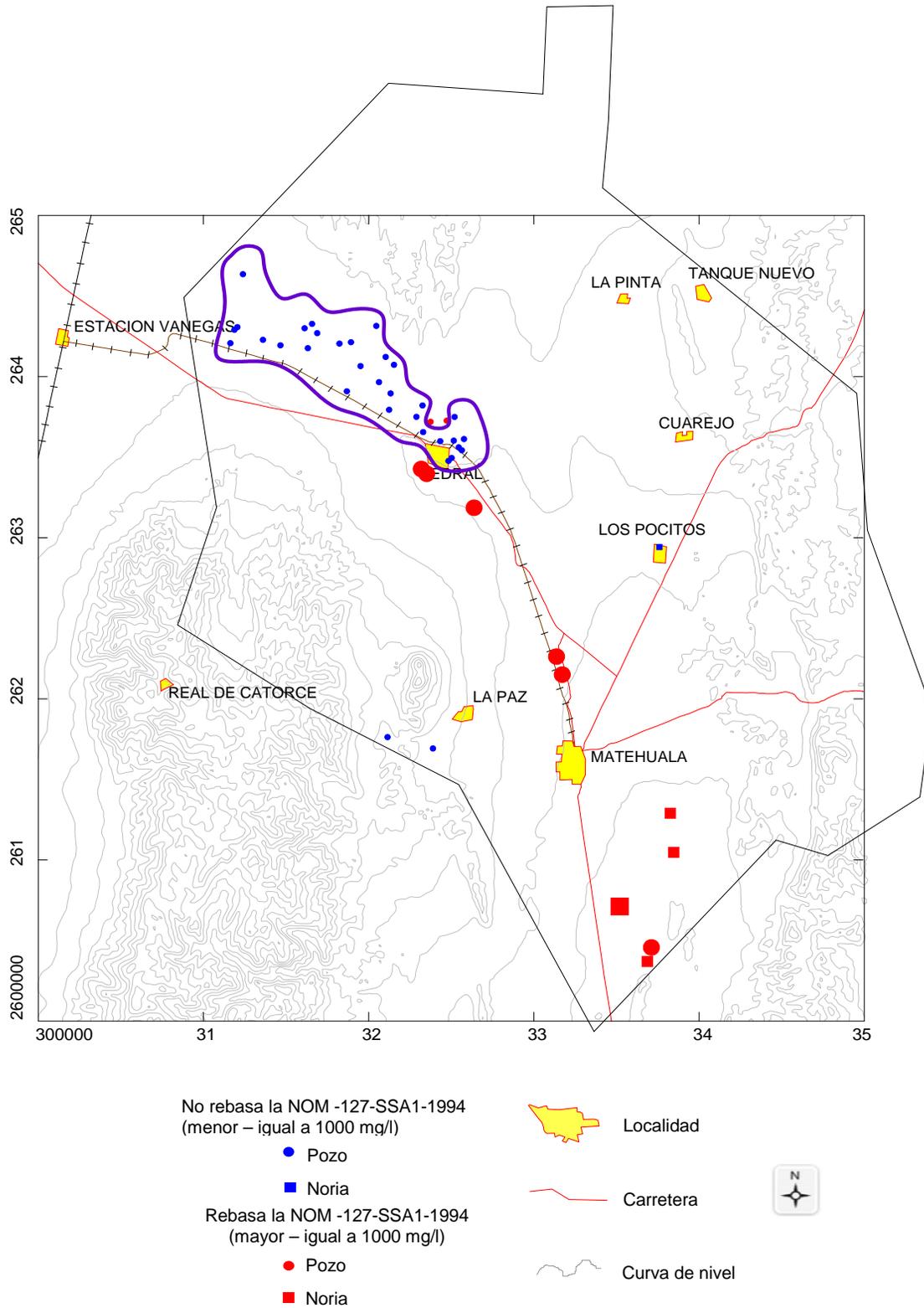
### 3.1.3.3 Sulfatos ( $SO_4$ )

Los Sulfatos son un parámetro que dentro de los elementos mayores debe considerarse importante y darle seguimiento en los acuíferos. Estudios que se han realizado en el pasado, han mostrado valores elevados de sulfatos en aprovechamientos destinados para uso público, ubicados a los largo del acuífero.

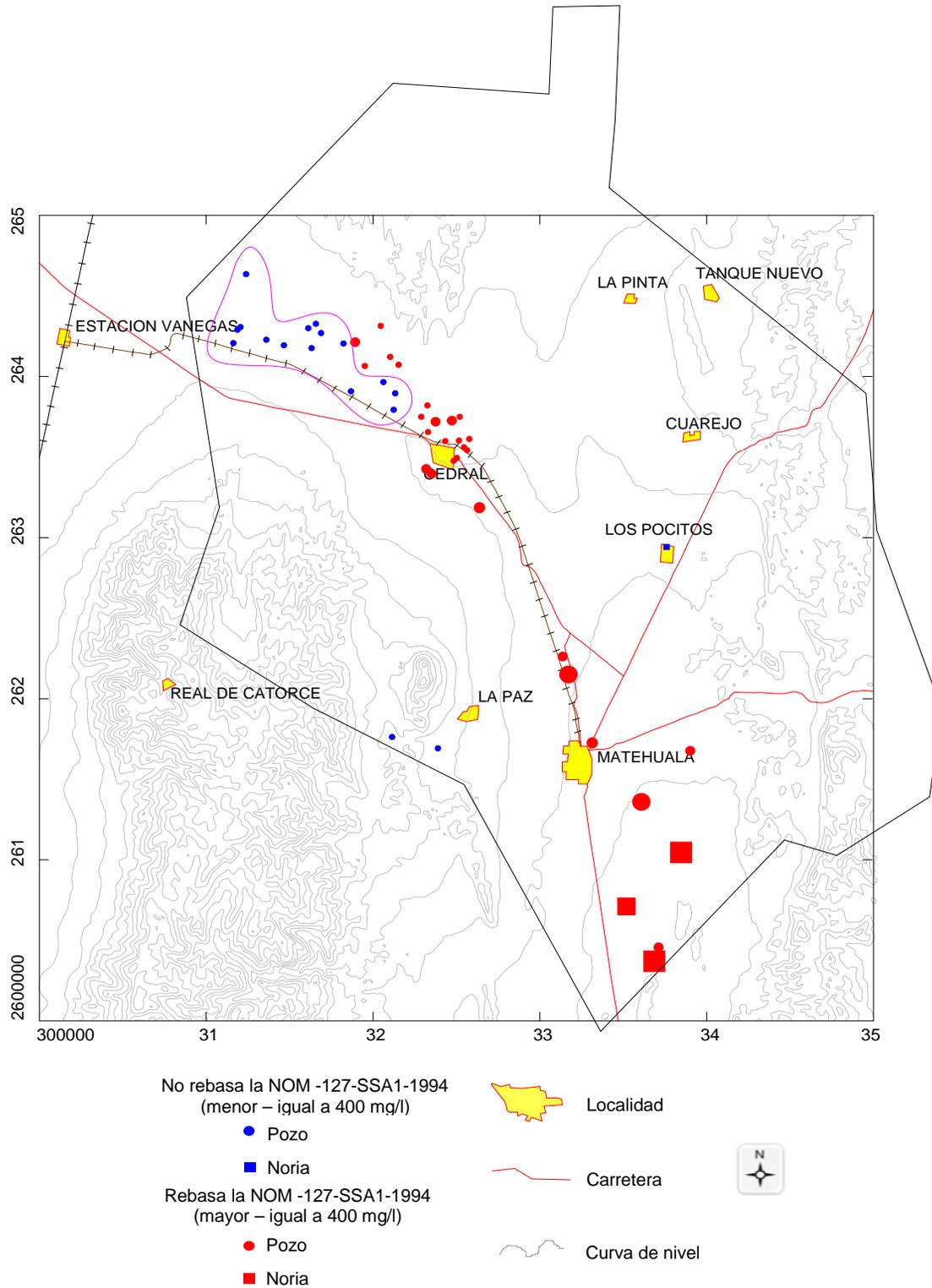
Se generó un mapa (Figura 22) en el cual se observa también que principalmente al NW de Cedral, los sulfatos se encuentran en menores concentraciones que en el resto del acuífero. Se determinó una zona (línea rosa) en donde se delimitan los pozos que tienen buena calidad en cuanto a este parámetro.

### 3.1.3.4 Dureza

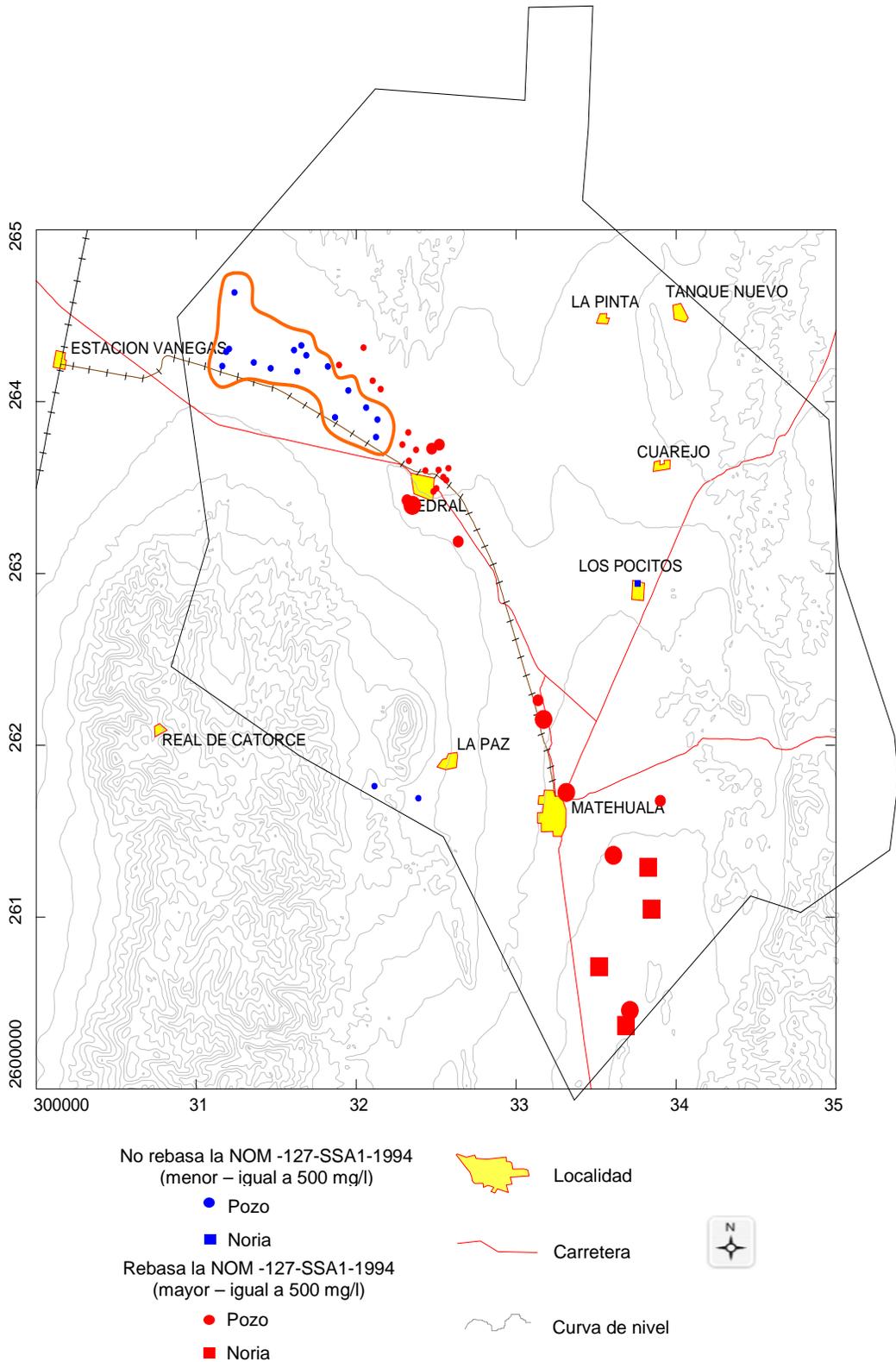
Este es otro parámetro importante en lo que a calidad para consumo humano respecta. En la Figura 23 se muestra la distribución de este parámetro en los aprovechamientos muestreados y se observa como aumentan las concentraciones en la parte centro y sur del acuífero, mientras que al NW de Cedral, se encuentran los pozos que cumplen con este parámetro según la NOM-127SSA1-1999 y están delimitados en el mapa (línea naranja).



**Figura 21.** Distribución de los Sólidos Totales Disueltos en aprovechamientos del acuífero Cedral-Matehuala. Símbolo proporcional a la concentración.



**Figura 22.** Distribución del Sulfato en aprovechamientos del acuífero Cedral-Matehuala. Símbolo proporcional a la concentración.



**Figura 23.** Distribución de la Dureza en aprovechamientos del acuífero Cedral-Matehuala. Símbolo proporcional a la concentración.

### 3.1.3.5 Nitratos ( $N-NO_3$ )

Otro de los parámetros considerados como indicador para la condición de un acuífero son los Nitratos ya que un alto contenido de los mismos, nos indica un impacto antropogénico al medio. Para el acuífero Cedral-Matehuala se detectaron concentraciones de Nitratos que sobrepasan la norma (Figura 24).

Cinco son los aprovechamientos que están superiores al límite de la norma en cuanto a este parámetro y es debido a que han ocurrido infiltraciones hacia el agua subterránea por las malas características de construcción y el mal manejo de residuos orgánicos animales. Otra causa es la irrigación con aguas residuales de la ciudad de Matehuala.

### 3.1.3.6 Arsénico ( $As$ )

Es importante dar seguimiento a la presencia de  $As$  en el agua. En la tesis de Raso-Soto (2002), muestra que la parte noreste de la ciudad de Matehuala se encuentra impactada por arsénico; al parecer, relacionado con actividades mineras. Posteriormente, en la tesis de Bueno-Pedroza (2004), evidencia nuevamente la presencia de elevadas concentraciones de arsénico en algunos aprovechamientos localizados al N-NE de Matehuala (Figura 25). En el presente estudio, nuevamente se observa la presencia elevada de este elemento en 2 de los pozos muestreados y coinciden con la ubicación de los casos antes mencionados.

### 3.1.3.7 Zonificación

Se logró identificar y delimitar la zona con mejor calidad de agua para uso público-urbano, tomando como base los límites permitidos por la NOM -127-SSA1-1994 para los parámetros de  $STD$ 's,  $SO_4$  y Dureza; y sobreponiendo las zonas identificadas en los mapas respectivos. Esta zona se encuentra al NW de Cedral (Figura 26).

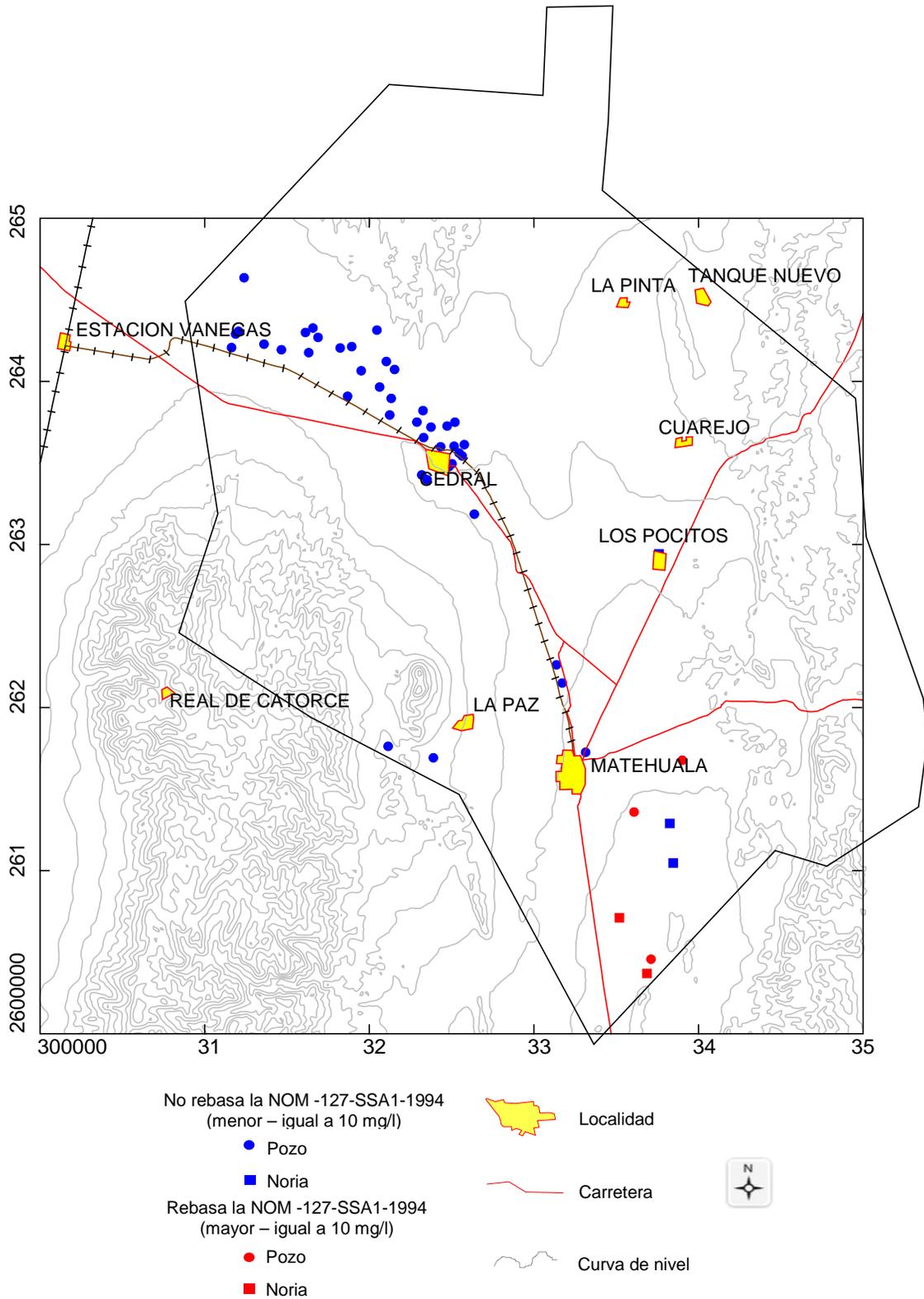
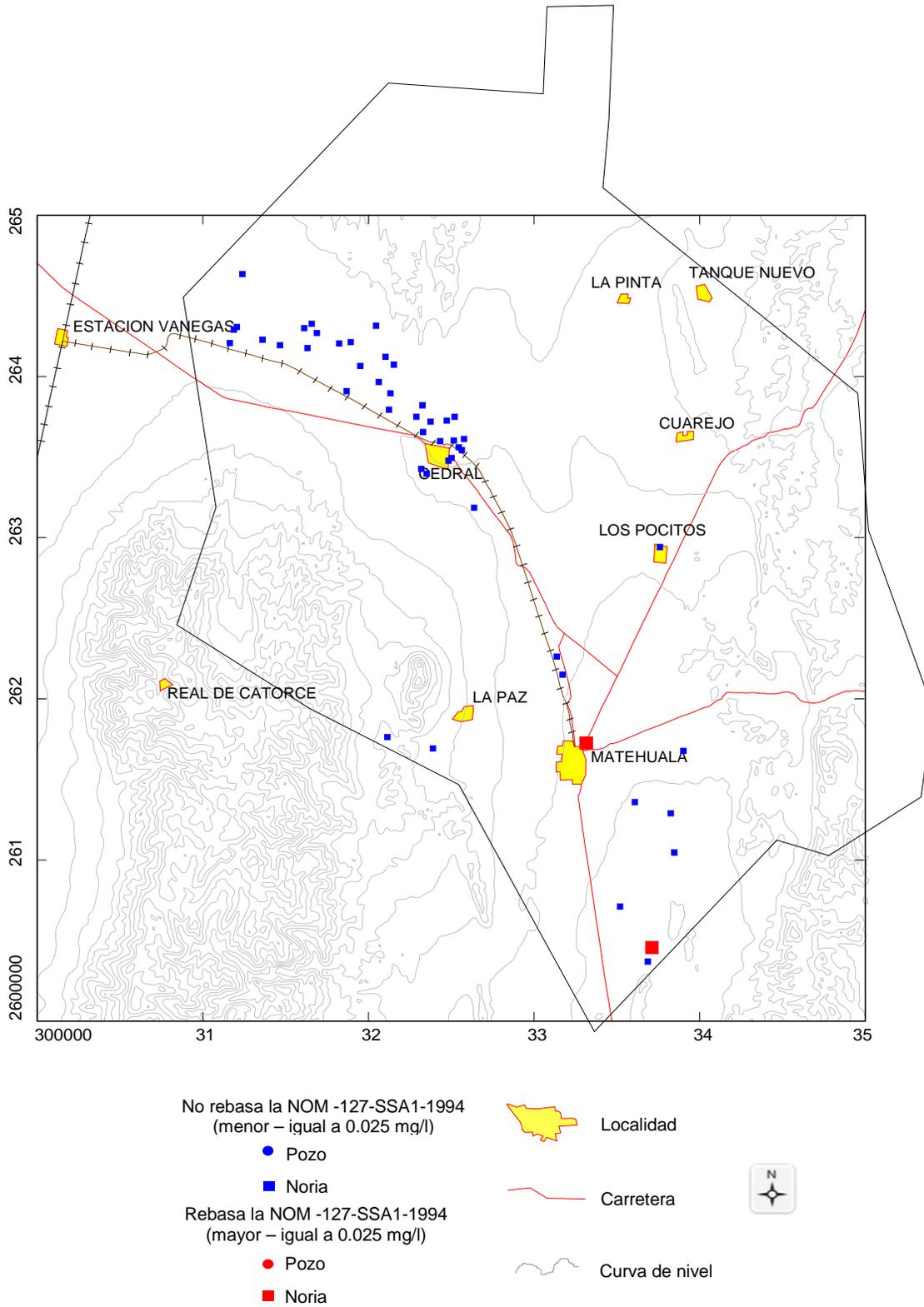
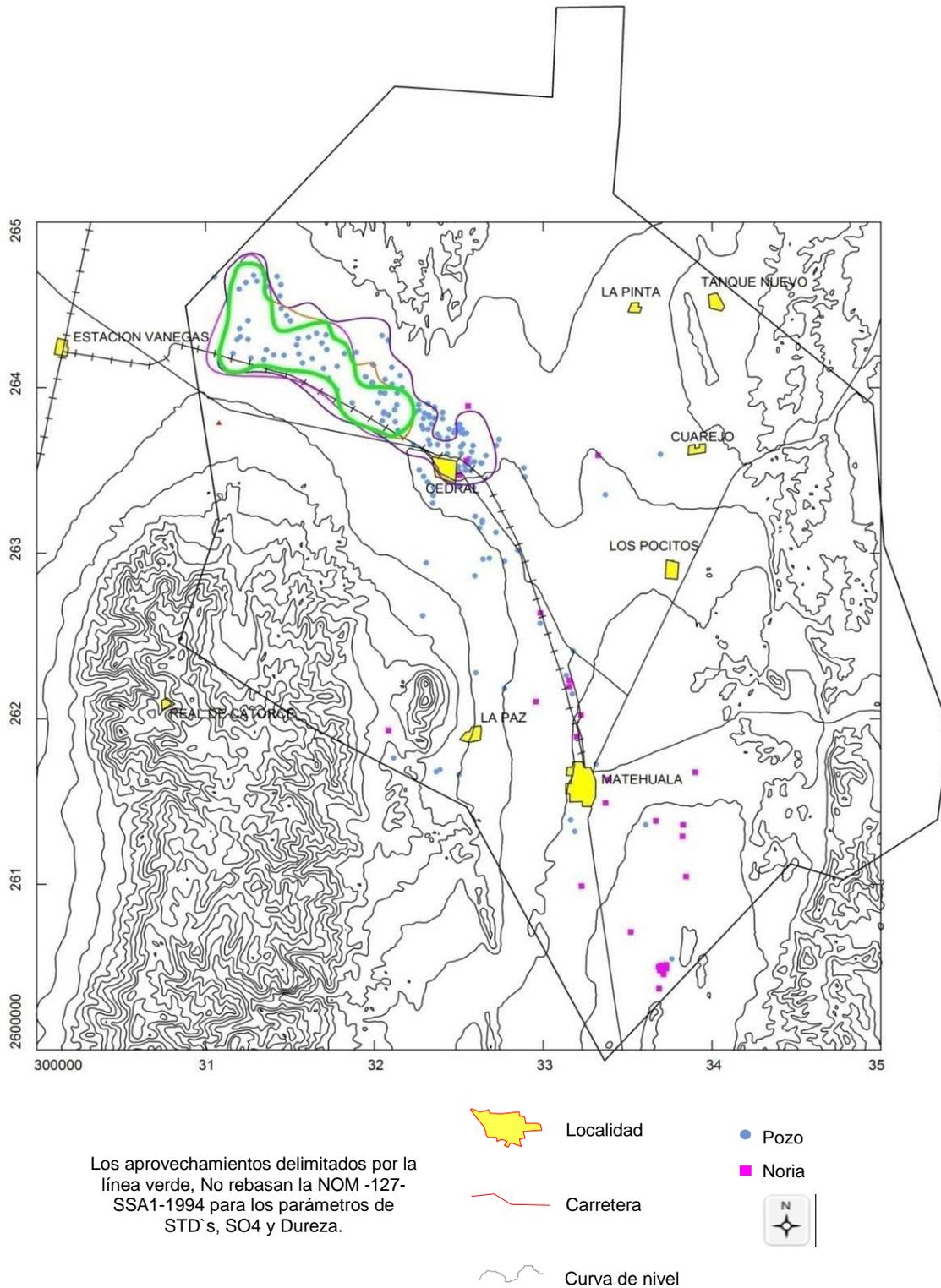


Figura 24. Distribución del Nitrato en aprovechamientos del acuífero Cedral-Matehuala.

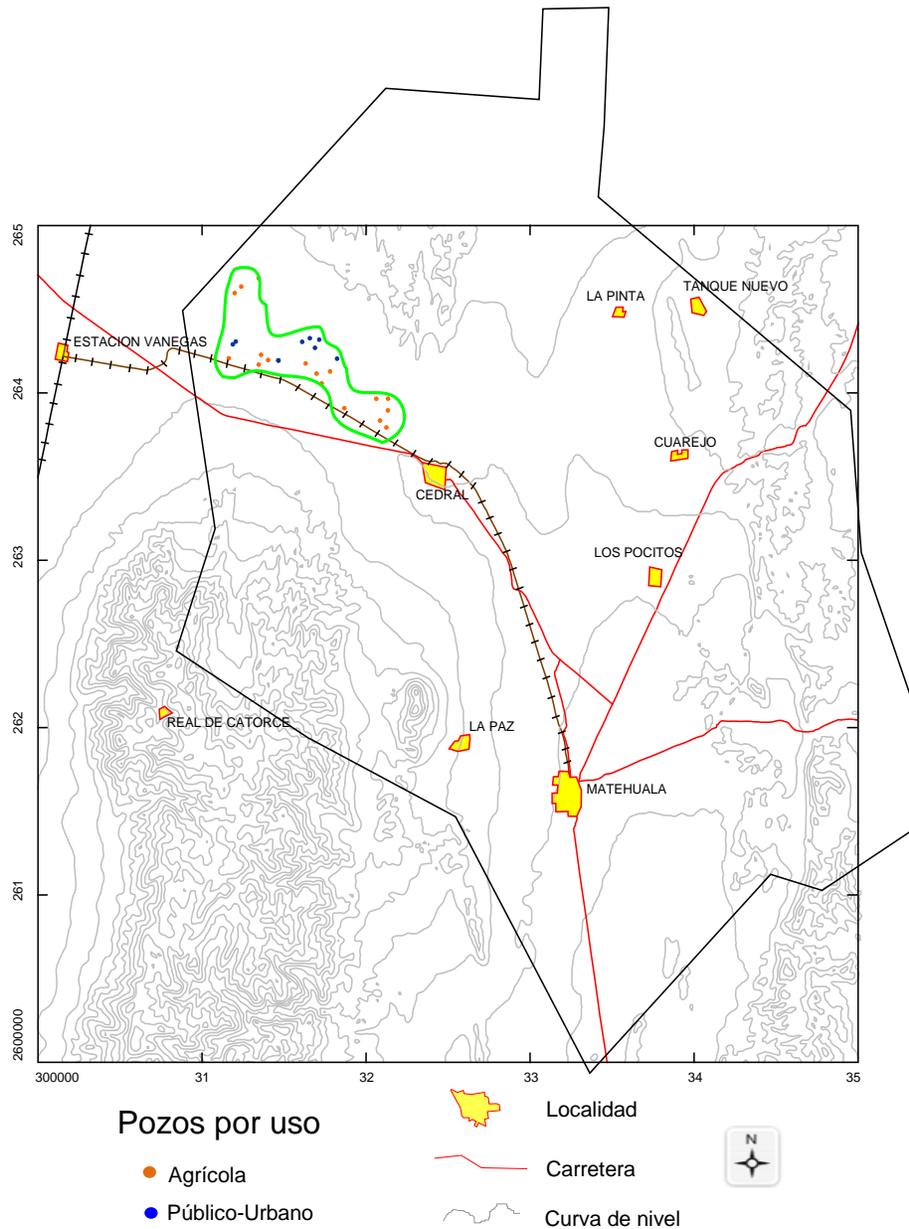


**Figura 25.** Distribución del Arsénico en aprovechamientos del acuífero Cedral-Matehuala. Símbolo proporcional a la concentración.



**Figura 26.** Zona que delimita con una línea verde los aprovechamientos con mejor calidad de agua para uso público-urbano.

En la Figura 27 se muestran los pozos activos que se encuentran dentro de la zona identificada con calidad aceptable para uso público. Tal como se mostró en la Figura 26, donde se observa que alrededor del 65% de los pozos, que caen en esta zona, son para uso agrícola mientras que el 35 % restante son para uso Público Urbano. Esto de un total de 26 pozos activos que se localizan dentro de esta delimitación.

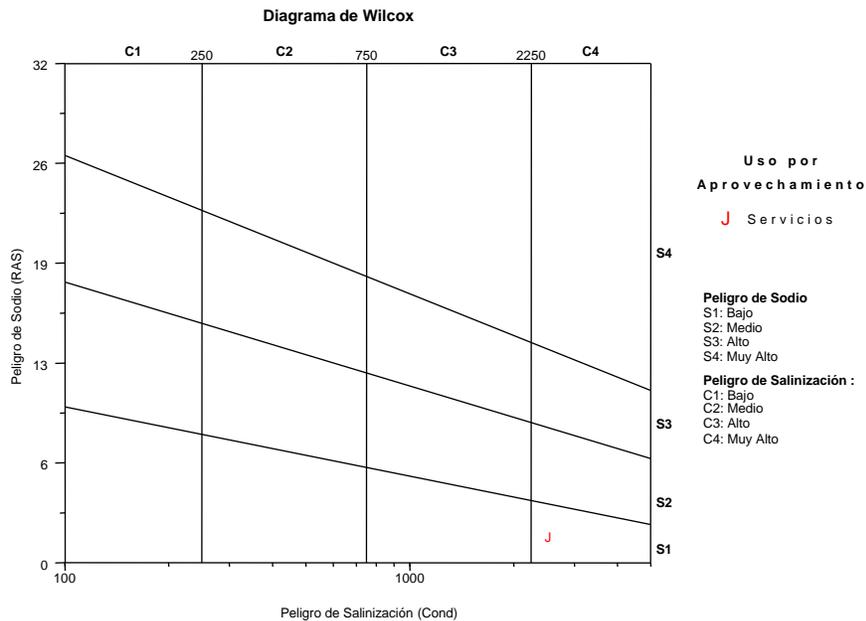


**Figura 27.** Pozos activos por uso en zona de buena calidad según la NOM -127-SSA1-1994

### 3.1.4 Relación de Adsorción de Sodio (RAS)

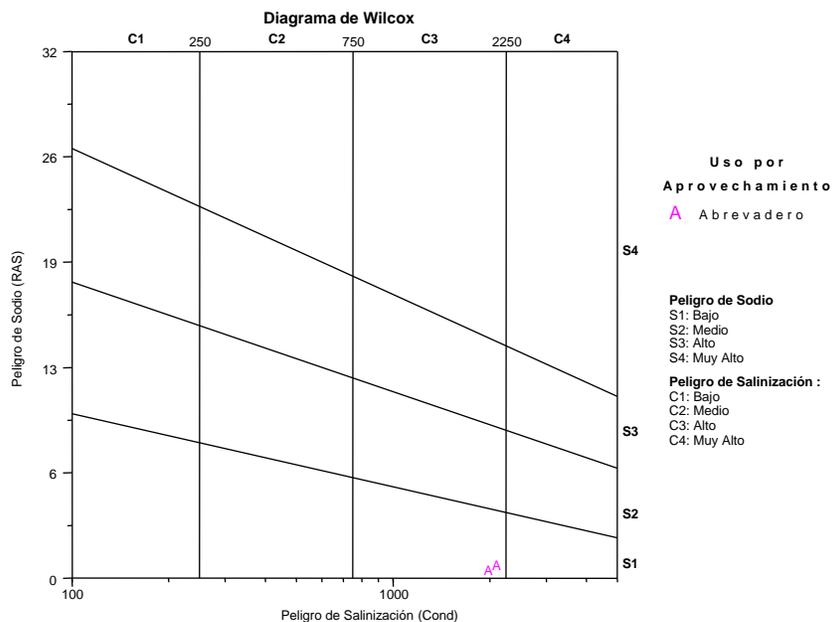
La RAS es un parámetro que expresa la relación entre los iones de sodio y la relación con el calcio y el magnesio existente en el suelo. El análisis de dicho parámetro se realizó por medio de una base de datos que contenía la información de los elementos mayores y traza. Con esta base se logró generar un Diagrama de Wilcox por uso de aprovechamiento mediante el uso de Aquachem. Se logró identificar la distribución de los aprovechamientos que, por sus concentraciones tanto en salinidad como en sodio, pueden ser aptos para algún tipo de cultivo específico. Sin embargo, durante el análisis de la clasificación que brinda la RAS, se deben tomar en cuenta también los tipos de suelo y no solo la calidad del agua para poder decidir el tipo de cultivo apto.

En la Figura 28 se muestra como un aprovechamiento destinado para servicios, que se encuentra localizado en la ciudad de Matehuala cuenta con una calidad de agua Muy altamente salina y con un bajo contenido en sodio.



**Figura 28.** Diagrama de Wilcox para los aprovechamientos cuyo uso es de servicios.

Los aprovechamientos utilizados como abrevaderos presentan un agua altamente salina y baja en sodio, tal como se muestra en la Figura 29.



**Figura 29.** Diagrama de Wilcox para los aprovechamientos cuyo uso es para abrevaderos.

En lo que respecta a los aprovechamientos para uso agrícola, se observó que la calidad del agua varía entre Muy altamente salina a agua con salinidad media, aunque uno de los aprovechamientos muestreados presentó agua de baja salinidad, la mayoría de los aprovechamientos muestreados para uso agrícola tienen un agua altamente salina. Sin embargo todas las muestras son bajas en sodio (Figura 30).

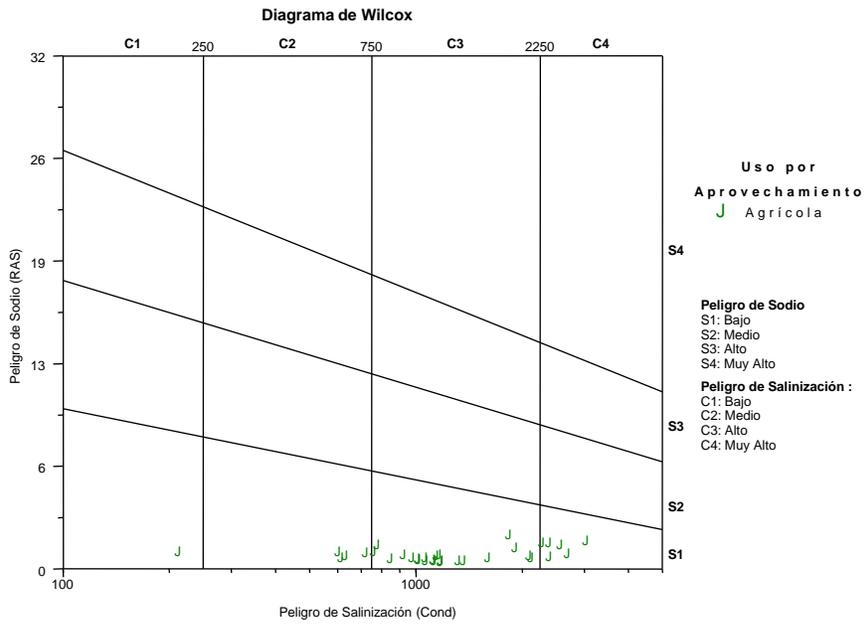


Figura 30. Diagrama de Wilcox para los aprovechamientos cuyo uso es agrícola.

Los pozos de uso potable tienen agua de salinidad media a altamente salina con poco sodio. La mayoría de pozos con este uso son altamente salinos (Figura 31)

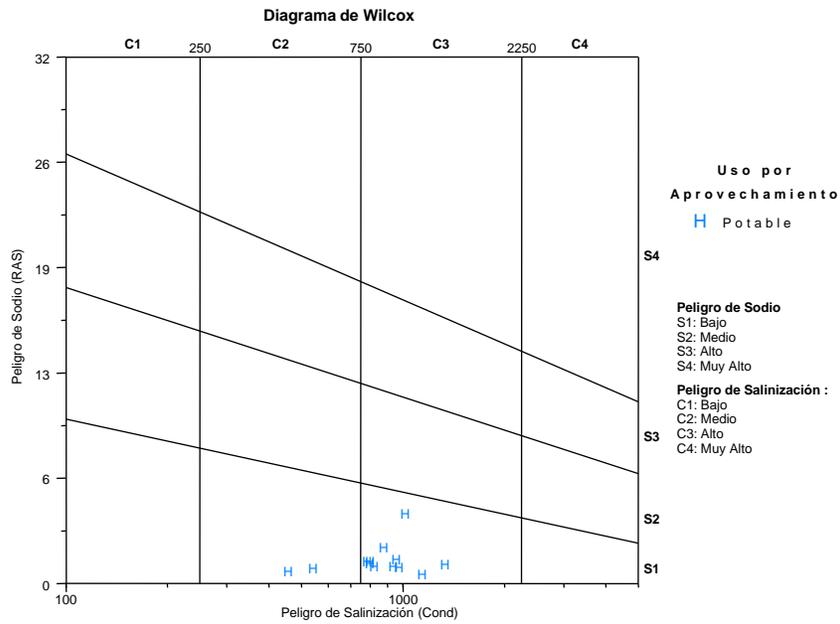


Figura 31. Diagrama de Wilcox para los aprovechamientos cuyo uso es para agua potable.

Por último, el único aprovechamiento de uso recreativo tiene un agua altamente salina y baja en sodio (Figura 32).

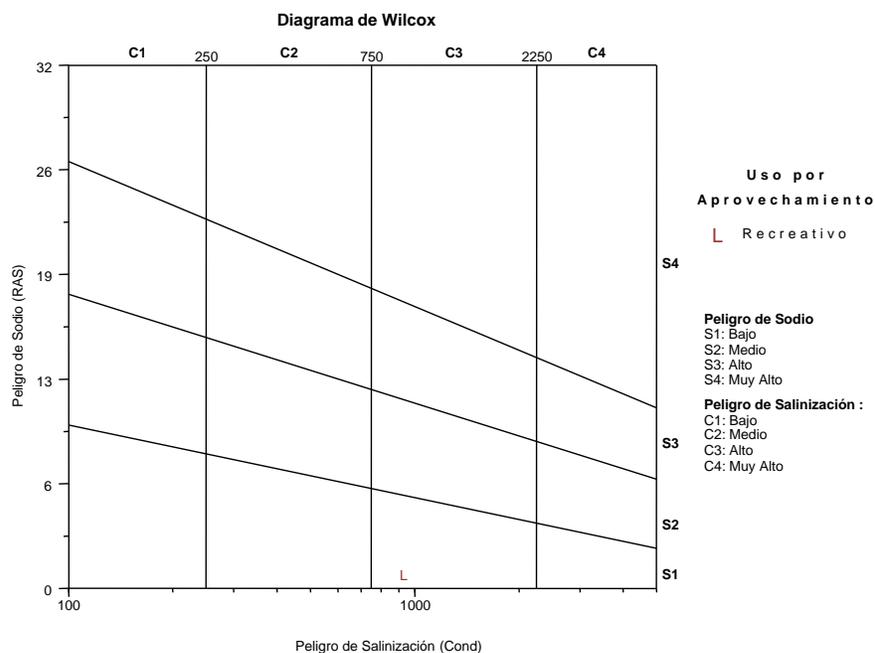


Figura 32. Diagrama de Wilcox para los aprovechamientos cuyo uso es recreativo.

### 3.2 Propuestas de Alternativas

La integración de la información obtenida durante este proyecto, parte de un diagnóstico cuyos resultados permiten realizar propuestas para el establecimiento de planes de acción de manejo del acuífero, de manera que se logre una mejor distribución del recurso. Estas propuestas de distribución deberán ir acorde tanto con la calidad necesaria para el consumo en las operaciones industriales, así como para el uso agrícola y el consumo humano. Nuestro papel en este proceso es aportar las herramientas que permitan realizar la toma de decisiones en una u otra dirección de manera fundamentada.

Deberán tomarse medidas preventivas y correctivas que no sean soluciones temporales. De manera tal, que se obtengan resultados con una conveniencia ambiental; política y social; a corto, mediano y largo plazo, y que se garantice la disponibilidad de agua para las actuales y futuras generaciones.

De manera complementaria, a las características físicas propias del sitio y la forma de explotación, están las consecuencias sociales y económicas del aprovechamiento del acuífero. En primera instancia el uso, por parte de la población, de agua que no cuenta con las condiciones para consumo humano, de acuerdo a las normas vigentes, tiene implicaciones que deben ser tomadas en cuenta; ya que afectan directamente la calidad de vida de la gente de esta zona.

Por otro lado, la falta de planeación y administración, tiene implicaciones en la economía, lo que remite a las instituciones correspondientes a hacer un replanteamiento de las políticas públicas para mejorar las condiciones tanto sociales-económicas como las propias del acuífero.

Debe analizarse la posibilidad de adquirir los derechos del agua de los usuarios agrícolas, ya que extraen los mayores volúmenes de una zona donde la calidad de agua es apta para consumo humano, como se mostró en la Figura 27, en contraste con la calidad de agua que se destina para las zonas urbanas. En estas zonas agrícolas se delimitó un área que cumple con los parámetros de  $STD^s$ ,  $SO_4$  y Dureza, establecidos en la NOM -127-SSA1-1994.

Como se mencionó anteriormente, se identificó una zona con agua de mejor calidad (Figura 27); la cual se plantea como una zona de reserva para uso público-urbano. En dicha franja se encuentran un total de 26 pozos activos, de los cuáles 17 son para uso agrícola, mientras que los 9 restantes son para uso público urbano.

Se propone un intercambio de los pozos agrícolas que ahí se encuentran por pozos destinados a la red de uso público-urbano que se encuentra fuera de la mencionada zona; si se toma en cuenta que de los 93 pozos activos ubicados en el acuífero, sólo 12 de ellos pertenecen al organismo denominado Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Matehuala (SAPSAM) y que únicamente 9 de ellos se encuentran dentro de la zona propuesta de reserva. Esto significa que 3 pozos que abastecen el servicio de agua potable no cuentan con la calidad para la misma, según lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994, y son

precisamente estos pozos los que deben intercambiarse en la zona de reserva por los pozos de uso agrícola (Tabla 10).

<b>Límites permisibles (NOM-127-SSA1-1994)</b>					
<b>Clave pozos SAPSAM</b>	<b>STD mg/l</b>	<b>DurTot mg/l</b>	<b>N_NO<sub>3</sub> mg/l</b>	<b>As mg/l</b>	<b>SO<sub>4</sub> mg/l</b>
CNA-7-007	506	427476473	4.3	0.02385	270
CNA-7-008	496	427244571	3.5	0.001643	260
CNA-7-014	407	307498355	1.2	0.00109	205
CNA-7-029	397	243307799	1.6	0.00276	160
CNA-7-031	411	373490457	1.7	0.00359	215
CNA-7-032	398	302229352	1.4	0.00261	205
CNA-7-044	502	379540967	1.5	0.004	320
<b>CNA-7-055</b>	608	478722442	1.6	0.009889	<b>405</b>
<b>CNA-7-090</b>	778	<b>692533728</b>	1.3	0.0025	<b>571</b>
<b>CNA-7-093</b>	<b>1090</b>	<b>771386147</b>	1.4	0.0021	<b>733</b>
CNA-7-180-D	645	379709608	9	0.00234	250
CNA-7-184	353	284980503	7.3	0.00078	27

**Tabla 10.** Pozos de SAPSAM con parámetros requeridos según la NOM-127-SSA1-1994

Uno de los propósitos es que al tener como base la información generada durante esta investigación, se lleve a cabo un diálogo con los actores principales y usuarios del recurso para lograr un consenso respecto al uso de los pozos; es decir, que coincidan en que deben intercambiarse los pozos en la zona de reserva por los pozos de uso agrícola tomando en cuenta todas las implicaciones de dicho cambio y llevando a cabo una gestión en la que se vea la menor afectación de los dueños de las concesiones y el beneficio de los usuarios.

También, es necesario que los usuarios y las personas involucradas que se ubican dentro de la zona de estudio puedan decidir de manera conjunta, cual debe ser la estructura de abastecimiento del agua y que a su vez se soporte el desarrollo económico de la región. Para esta labor, los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas “COTAS”, como un ente de asistencia técnica y asesoramiento, deben desempeñar su tarea de estabilización, recuperación y preservación de los acuíferos.

Por otra parte se debe promover el desarrollo de cultivos resistentes a aguas de menor calidad (o mayor salinidad). Como se mostró en el apartado de resultados, se hizo un análisis de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) mediante un el diagrama de Wilcox que mostró que gran parte de los aprovechamientos tienen problemas con agua de Muy alta a Alta salinidad; aunque por otra parte ningún aprovechamiento muestreado tiene problemas con el sodio.

Si se toma en cuenta que la mayoría de los pozos muestreados fueron de uso agrícola, debe considerarse este tipo de análisis al momento de destinar algún tipo de cultivo; que para este caso y de manera general, se puede decir que los cultivos más óptimos, según lo antes mencionados, son forrajes y algunos cultivos de hortalizas. Aunque es necesario tener presente que aunado a este análisis debe también tomarse en cuenta ciertas características del suelo como: el tipo de suelo, su drenaje y permeabilidad.

También debe implementarse la tecnificación de los sistemas de riego en la región donde la mayor extracción es para uso agrícola; esto con la finalidad de incrementar su eficiencia y con esto poder liberar volúmenes de agua, que puedan ser utilizados para uso doméstico.

Otro factor a considerar, son las fuentes alternativas de abastecimiento del recurso. Para esto SAPSAM propone, en el reporte Estudio de Fuentes Alternas de Abastecimiento para la Ciudad de Matehuala (1999), aprovechar el agua del manantial de la Maroma mediante la construcción de una presa. Con base en los estudios geológicos de la zona y tomando en cuenta que dicho manantial nace en la parte alta de la Sierra de Catorce, en el municipio del mismo nombre, se propuso que el sitio más adecuado para la construcción de la presa está ubicado después de la confluencia de los arroyos Jordán y La Maroma. Cabe mencionar que, para la realización del este proyecto, faltan los estudios hidrológicos, topográficos y geológicos; así como un análisis de la calidad del agua de este manantial y un estudio económico del costo de la obra. En lo referente a la hidrología se realizó en estudio a nivel preliminar; sin embargo, no se puede garantizar con certeza el gasto de explotación de la fuente.

Por otro lado, se deben considerar trabajos en convenio con otras universidades; como por ejemplo, el que está realizando la facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Actualmente están produciendo información a través de estudios de gravimetría y sondeos eléctricos verticales (SEV's) para generar un modelo geológico-geométrico del acuífero y con base a este, se desarrollará un modelo de flujo y transporte que permita, posteriormente, crear escenarios con la información disponible para el acuífero.

Con todo lo anterior, la información obtenida en el presente trabajo, servirá como base para la generación de la estructura de una tabla de datos que podrá utilizarse para acumular información histórica de los distintos aprovechamientos. De esta manera se puede dar seguimiento y establecer estrategias de gestión de manejo del agua. Además de esto, el concentrar los datos en un solo sistema, se podrá revisar y manipular con mayor rapidez la información.

## CONCLUSIONES

El acuífero Cedral-Matehuala constituye la principal fuente de abastecimiento de agua para la región y uno de los principales recursos para el desarrollo de la parte Norte del Altiplano Potosino. Aunque a largo plazo no existe un plan para la modificación en la estructura de abastecimiento de agua para la zona, por lo que es necesario que en el corto plazo se elaboren estrategias para a un manejo óptimo y sustentable del acuífero.

Es necesario aminorar la extracción de agua que se encuentra concentrada al noreste de Cedral. Esta concentración representa un enorme reto a la hora de tomar decisiones en lo que al manejo del acuífero respecta; es decir, determinar y destinar la distribución del recurso en función de la calidad es lo que representa una problemática al momento de intentar realizar una gestión que asegure el buen manejo del recurso, cuando los dos principales usos del agua extraída son para consumo en el sector agrícola y público-urbano. Aunque cabe mencionar que ha habido una enorme disminución en el gasto de extracción, como se mostró en la Tabla 5. Esta disminución está dada en función de que existe una gran cantidad de pozos abandonados, la mayor parte de ellos construidos para uso agrícola y que en muchos de los casos tuvieron que ser abandonados por disminución del gasto o profundización del nivel freático; y de que no existe una evidencia tangible de una zona de recarga para este acuífero.

Se logró determinar que la principal causa de la concentración de pozos en la parte NW del acuífero es debido a la combinación de agua de mejor calidad junto con pozos de alta productividad, lo que ayudó al desarrollo de una zona agrícola exitosa en los alrededores de Cedral, en los últimos 30 años. La explotación concentrada del recurso ha provocado la profundización de los niveles piezométricos. Los nuevos aprovechamientos construidos en la misma zona, pero a mayor profundidad muestran una tendencia a dar menores gastos.

Se identificó la necesidad de contar con una o varias bases de datos que permitan tener una visión de la evolución tanto en el espacio como en el tiempo de las

características principales del acuífero. En los trabajos previos realizados para el área, se generó una visión del acuífero y en el presente proyecto se generó información que permitió confirmar o modificar impresiones generadas en aquel proyecto, mediante la revisión de los aprovechamientos estudiados en la anterior campaña.

También se observó que continúa la práctica común de reponer pozos agotados por perforaciones o pozos de reposición en esa zona; lo cual sólo hace más crítica la situación y se considera que es uno de los primeros problemas que debe ser atacado para asegurar un aprovechamiento acorde a las condiciones de sitio.

Se identificó que el agua de mejor calidad se encuentra en los bordes de la cuenca en donde las aguas que circulan a través de las rocas carbonatadas descargan hacia el valle por medio de manantiales o en el subsuelo, principalmente de las Sierra de Catorce hacia el norte, localizándose esta agua de calidad aceptable entre las localidades de Cedral y San Juan de Vanegas. Otras localidades marginales de la cuenca con calidad aceptable son los manantiales localizados en la margen SW de la Sierra del Fraile.

Algunos parámetros regulados por la NOM-127-SSA1-1994 como los SDT y Sulfatos son rebasados en aprovechamientos localizados hacia el SE de Cedral, delimitando de inicio la zona en la que se puede obtener agua de una calidad suficiente para uso y consumo humano. En contraste, en esta misma zona (alrededor y al NW de Cedral) se encuentra la mayor concentración de pozos; los cuales, en su mayoría son para uso agrícola, generando así una competencia entre los usuarios por el recurso.

Por otra parte, otros parámetros regulados por la NOM-127-SSA1-1994 son rebasados en diferentes aprovechamientos pero su distribución no parece tener ninguna relación con la trayectoria de flujo, sino tienen un carácter u origen más puntual. Entre estos cabe mencionar a los Nitratos que son rebasados en algunos aprovechamientos tanto en las cercanías de Cedral, como al SE de Matehuala. En los casos cerca de Cedral y el más cercano a Matehuala se trata de

aprovechamientos localizados en propiedades con actividades pecuarias en las que las características constructivas combinadas con una mala disposición de desechos orgánicos han impactado el agua subterránea. El último aprovechamiento localizado el SE de Matehuala está emplazado en una zona agrícola irrigada con aguas residuales no tratadas de Matehuala.

Otro parámetro cuyo potencial tóxico es relevante y cuyas elevadas concentraciones fueron detectadas en estudios previos y confirmadas en este es el arsénico. Este elemento no aparece de manera natural en el agua del acuífero en estudio, sino que ha sido introducido debido al mal manejo de residuos procedentes de actividades minero-metalúrgicas practicadas en la zona. Y su distribución se limita a una franja localizada hacia el margen NE de la ciudad de Matehuala.

Los resultados de los análisis químicos de elementos traza en muestras del acuífero, mostraron niveles ligeramente elevados de elementos como el Pb o el Cd en aprovechamientos alejados de la zona impactada por los residuos minero metalúrgicos. Algunos de estos aprovechamientos son para uso público urbano por lo que es necesario darle seguimiento a estos análisis para evaluar un posible riesgo a la salud de la población en el mediano o largo plazo por el cambio en las condiciones de la zona de extracción.

Durante el desarrollo de esta investigación, se pudo constatar que se invierte gran parte del tiempo en la recopilación de datos debido a que estos se encuentran muy dispersos, y las fuentes de información no están disponibles fácilmente. Un Sistema de Información Geográfica podría reducir este tiempo, ya que facilitaría al interesado el acceso a la información del área en estudio a través de un solo sistema o fuente.

Por último, el resultado de esta investigación espera servir como herramienta base para lograr las adecuaciones necesarias en el manejo del recurso agua; que permitan garantizar la existencia del acuífero en las condiciones óptimas para los diferentes usos que la región requiere, planeando el uso del recurso agua.

## REFERENCIAS

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

Barboza-Gudiño, J.R., 1998. Geología de Real de Catorce: 1:50,000 hoja F14 A 24, San Luis Potosí (INEGI).

Barboza-Gudiño, J.R., *et al.* 2004. Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 21, núm. 3, p. 299-319.

Bueno Pedroza, A., 2004. Interpretación Hidrogeoquímica de los Sistemas de Flujo de la parte norte del Altiplano Potosino. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Castro-Larragoitia Javier, Cardona Benavides Antonio, Bueno Pedroza Angélica, Knauthe Ulrich, Pérez Morán Arturo (2005): Aprovechamientos Sustentable de Recursos Hídricos en la Parte Norte del Altiplano Potosino.- SIHGO 2002020604.Reporte Final de proyecto, 131 pp.

Comisión Nacional del Agua, 2001. Resumen del Padrón de Usuarios de Aguas Subterráneas del Acuífero Cedral-Matehuala.

Estudios Geotécnicos S.A., 1981. Exploración Geológica Petrolera del Prospecto El Huizache, Estado de San Luis Potosí. Informe Geológico No. 609.

García E. 1983. Modificaciones al sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México.

Geohidrológica Mexicana, S.A., 1975. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos, en el Estado de San Luis Potosí, zona El Salado, zona Cedral-Matehuala, zona Vanegas-Estación Berrendo”.

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

Giffin, S., 2008. Hydrostratigraphy and Mapping with implementation into an ArcGIS project in the region of Matehuala San Luis Potosí, Mexico. Master Thesis. Institute of Hydrogeology, RWTH Aachen University.

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

Hidrotec, S.A., 1972. Informe del estudio geohidrológico preliminar en la zona de Cedral-Vanegas, S.L.P.

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

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

INEGI, 2005. Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

Knauthe, U., 2003. Determination of Groundwater Recharge with Geochemical and Isotopic Methodes in the Arid Area of Matehuala, Mexican Altiplano. Master Thesis. Technische Universität Bergakademie Freiberg.

Muñoz Quintana, J., 2008 Modelo Geológico del Área Cedral – Matehuala y su Relación con los Sistemas de Flujo Subterráneo. Tesis de maestría. Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Núñez Hernández, E., 2007. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en el Acuífero Cedral-Matehuala. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Pelallo Martínez et al., 2008. Arsenic mobilization in aquatic sediments of an impacted mining area, North Central Mexico.

Pérez Morán, A., 2006. Determinación de parámetros hidráulicos mediante métodos analíticos y numéricos en el Acuífero Cedral-Matehuala, S.L.P. Trabajo Recepcional, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

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

Rzedowsky, J., 1995. Notas sobre la Flora y Fauna del Estado de San Luis Potosí, Ciencia, Volúmen XV.

SAPSAM, 1999. Estudio de Fuentes Alternas de Abastecimiento para la Ciudad de Matehuala. Informe final.