

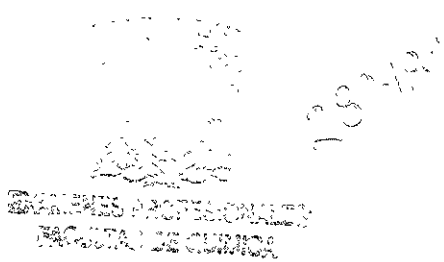
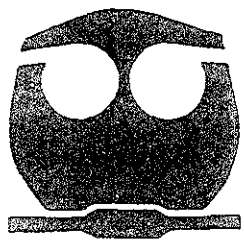


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO DE ARSENICO Y SELENIO EN AGUAS SUBTERRANEAS

T E S T I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
QUIMICA DE ALIMENTOS
P R E S E N T A :
MARTA VERONICA LANDEROS ALBORES



MEXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

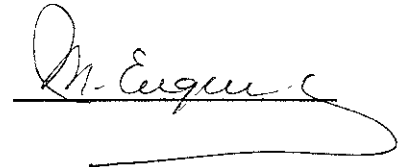
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente: Prof. Margarita Gutiérrez Ruiz
Vocal: Prof. Federico Galdeano Bienzobas
Secretario: Prof. José Luz González Chávez
1er. suplente: Prof. Silvia Elena Castillo Blum
2º suplente: Prof. Luis Gerardo Martínez Jardines

Sitio donde se desarrolló el tema: Laboratorio de análisis físicos y químicos del ambiente,
Instituto de Geografía, Ciudad Universitaria, U.N.A.M.

ASESOR: M.C. Margarita Gutiérrez Ruiz



SUPERVISOR TÉCNICO: Biol. Pilar Fernández Lomelín



SUSTENTANTE: Marta Verónica Landeros Albores



AGRADECIMIENTOS

A Dios, que ha guiado mi vida y me ha colmado de felicidad.

" Suprimid a Dios, y se habrá hecho la noche en el alma humana"
LAMARTINE

A mi querida patria, México, que me ha acogido en su seno y ha sido parte de mí desde que nací.

" La patria tiene derecho a que nuestra alma, nuestro talento y nuestra razón le consagren sus mejores y más nobles facultades"
CICERÓN

A mi amada Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas y brindarme una educación integral, espero ser una digna egresada suya. A mi querida Facultad de Química, donde pasé los mejores momentos de mi vida.

" Si crees que la educación es cara, intenta la ignorancia"
ANÓNIMO

A mis padres, Pepe y Coquis, y a mis hermanos, Eduardo y Javier, por sus enseñanzas, cariño, comprensión y no olvidemos diversión. Ustedes son lo mejor que Dios pudo haberme dado.

A mis abuelos Lupita y Juvenal, por brindarme un padre tan maravilloso y por enseñarme lo que logras con amor, ganas de trabajar y honradez.

A mis abuelos Lalo y Tita, por todos los momentos hermosos que hemos pasado juntos, por enseñarme lo que es el amor mutuo y a los demás. Lalo, vives en nuestros corazones y en el de todos los que te conocieron. Tita, gracias por tus palabras de aliento en tiempos difíciles y felices.

A mi tíos: Bety Albores y Andrés Medina por estar siempre ahí cuando los necesité, por ser mis amigos, por sus enseñanzas, sus alientos, por ayudarme a seguir mis ideales y sobre todo por enseñarme lo que significa la conciencia social, sigo trabajando en eso. A mi querido primo Alux, por ser como un hermano para mí, sigo aprendiendo de tí.

Al clan Landeros: tíos, SUPU y sobrinos presentes y futuros, por su compañía, por todos los momentos que hemos pasado juntos y por sus ganas de vivir.

A mis futuros hijos, para que todo el esfuerzo presente se convierta en su bienestar futuro.

" La vida es un diez por ciento como la hacemos y un noventa por ciento como la tomamos"
IRVIN BERLIN

A todos los maestros que me brindaron su tiempo con generosidad, dedicación y entrega. En especial agradezco a mi asesora la M.C. Margarita Gutiérrez por sus atinadas recomendaciones para la realización y escritura del presente trabajo, ya que su apoyo fue indispensable para la elaboración de este documento. Agradezco a los profesores: José Luz González y Federico Galdeano por su ayuda incondicional, su tiempo, sus recomendaciones y su amistad.

Así mismo, agradezco a mi supervisora técnica, Pilar Fernández, por su ayuda durante la etapa experimental de mi tesis, por sus recomendaciones, compañía y aliento. A todos los miembros de LAFQA y de CIMA, Estela, Elena, Irene, Coro, Claudia, Esmeralda, Gerardo, Jaime, Antonio, José Luis, Juan, Franz, Julia, Hilda, José, Francisco y Heriberto, por su apoyo y amistad, espero que esta relación dure mucho tiempo más.

A GTZ-México en representación del Dr. Bertram Nagel por el apoyo económico brindado durante la realización del presente trabajo y por enseñarme lo que se puede lograr cuando los países trabajan en equipo. Al CONACYT por el apoyo económico para el proyecto de investigación realizado.

" Hay que hacer algo, pero no pensar en hacer algo"
FRANCIS PICABIA

A todos mis amigos, Viviana, Pilar, Mariana, Rosy, Nohemi, Jahel, Jérica, Karime, Leticia, Emmanuel, Luis Enrique, Luis Alberto, Pepe, Raquel, Gina, Ricardo, Alex, David, Gaby, Sandra, Rodrigo, les agradezco todos los momentos que han estado conmigo. Ustedes han sido mi segunda gran familia y me han enseñado el verdadero valor de la amistad.

A la familia González Ortega, por hacerme sentir como de su familia y abrirme las puertas de su corazón.

Con todo mi amor para Jerry por compartir conmigo todos estos años. Gracias por todas tus palabras de aliento, de cariño, de enseñanzas y sobre todo por ser un amigo verdadero y un compañero sincero.

" La FELICIDAD suprema en la vida es tener la convicción de que nos aman por lo que somos o, mejor dicho, a pesar de lo que somos"
VICTOR HUGO

Y por último quiero terminar con las palabras de un poeta inglés:

Sí un pajarillo caído,
con amor puse en su nido;
sí un acto o palabra mía
llevó a un triste la alegría;
sí una lágrima he enjugado;
sí una pena he consolado;
sí al pobre que auxilio implora
tendí alguna vez la mano;
sí al morir, alguien me llora,
¡ Yo no habré vivido en vano !

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|--------------|
| RESUMEN..... | |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| I. MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| 1.1 IMPORTANCIA DEL AGUA..... | 3 |
| 1.2 EL ARSÉNICO | 8 |
| 1.2 EL SELENIO..... | 16 |
| 1.3 LEGISLACIÓN DE ARSÉNICO Y SELENIO EN AGUAS..... | 20 |
| 1.4 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (AAS)..... | 25 |
| II. METODOLOGÍA..... | 32 |
| 2.1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN..... | 32 |
| 2.2 MEDIO GEOGRÁFICO DEL SITIO DE MUESTREO..... | 32 |
| 2.3 MUESTREO..... | 36 |
| 2.4 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS..... | 42 |
| 2.4.1 DETERMINACIÓN DE LOS IONES MAYORES, PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL AGUA. | 42 |
| 2.4.2 DETERMINACIÓN DE ELEMENTOS TRAZAS. | 43 |
| 2.4.3 CONTROL DE CALIDAD DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS..... | 52 |
| III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 55 |
| 3.1 RESULTADOS..... | 55 |
| 3.1.1 PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. | 55 |
| 3.1.2 IONES MAYORES..... | 56 |
| 3.1.3 ARSÉNICO Y SELENIO | 57 |
| 3.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 58 |
| 3.2.1 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y PH DEL AGUA. | 58 |
| 3.2.2 IONES MAYORES | 62 |
| 3.2.3 ARSÉNICO Y SELENIO | 70 |
| IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 75 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 79 |
| ANEXOS..... | 86 |
| APÉNDICES..... | 96 |

RESUMEN

El arsénico y el selenio han sido reportados como elementos tóxicos si se ingieren en el agua durante un tiempo prolongado y a concentraciones superiores a 0.05 mg/L. Las fuentes de estos elementos pueden ser de origen natural o antropogénico. Este estudio se realizó en una ciudad industrial de México (Monterrey) donde existen las características litológicas (presencia de lutitas y calizas) y plantas industriales que favorecen la presencia de arsénico y selenio en cuerpos de agua.

En este trabajo se encontró que el método de espectroscopia de absorción atómica-generador de hidruros es apropiado para la evaluación de arsénico y selenio soluble en aguas subterráneas, ya que permitió la cuantificación de arsénico y selenio desde concentraciones de 2.5 y 3 µg/L respectivamente. En el área de estudio se encontraron 4 posibles fuentes puntuales de arsénico y selenio, donde posiblemente haya sido removida la capa de arcilla que protege al manto freático. No se encontraron evidencias de que el arsénico y el selenio provengan de fuentes naturales ya que, a pesar de que existen lutitas y calizas en esta área, éstas no liberan arsénico y selenio en cantidades significativas. Este hecho es evidente porque las aguas fuera del agua impactada por la actividad industrial contienen cantidades inferiores a 0.005 y 0.017 mg/L de arsénico y selenio respectivamente.

Por otro lado, se detectaron dos pozos de una industria alimentaria que contiene una concentración de selenio superior a la estipulada por el reglamento en materia de control sanitario de la Ley General de Salud (0.05 mg/L). Sin embargo, no se encontró una norma o reglamento que sea aplicable para las aguas de uso industrial alimentario, por lo que se considera que la legislación debe ser complementada de tal manera que no se omitan análisis necesarios en zonas que tienen el riesgo de estar contaminadas por arsénico y selenio.

La fuente antropogénica de selenio en esta agua no pudo ser localizada en este estudio. Los pozos de uso y consumo humano no se encuentran afectados por las actividades industriales. La zona afectada por arsénico y selenio se encuentra bien localizada, ya que el flujo del agua subterránea es bajo y, por tanto, no permite el transporte de estos elementos.

INTRODUCCIÓN

El agua es indispensable para todos los organismos vivos y además es utilizada en todas las actividades humanas. La mayor cantidad de agua sobre la tierra se encuentra en los océanos. El agua dulce encontrada en los ríos, lagos, arroyos, manantiales, cenotes y mantos subterráneos representa únicamente el 0.63%.

Uno de los grandes problemas es la baja disponibilidad del recurso agua, en cuanto a calidad y cantidad, ya que los cuerpos de agua están siendo seriamente afectados por la acción del hombre y condiciones ambientales. Se han detectado contaminantes en diversas proporciones en toda el agua del planeta, desde plaguicidas en los hielos polares, hasta hidrocarburos en mitad del Atlántico y del Pacífico (SEDUE, 1983).

En la literatura se informa diferentes casos de contaminaciones de diferentes cuerpos de aguas con elementos potencialmente peligrosos como el mercurio, cadmio, cobre, etc (Hutchinson, 1996) o por elementos de frontera como el arsénico y el selenio (Crompton, 1997). En la reserva de Kersterson en California se encontraron anomalías en las aves debido a la ingesta de agua contaminada con selenio (Francis, 1993), por otro lado en Chile, Argentina e India se han reportado intoxicaciones debido a la ingestión prolongada de agua contaminada con arsénico (Chakroborty, 1996; Yager y Ostrosky, 2000). En el caso del selenio hay que tomar en cuenta que a pesar de ser tóxico a altas concentraciones, también es necesario para la vida (Albert, 1985).

México es un país naturalmente rico en elementos potencialmente tóxicos por sus características geológicas (hidrotermalismo, vulcanismo), lo cual ha propiciado que tanto las aguas superficiales como las subterráneas estén potencialmente expuestas a ser contaminadas por especies químicas móviles de Se y As. Se ha reportado que en México existen zonas donde los individuos beben agua con As a niveles superiores a los valores máximos permisibles por la legislación mexicana (50 µg/L), en regiones como Zimapán Hidalgo (Armienta, 1995), la región lagunera (Del Razo et al, 1990), en San Luis Potosí (Pérez, 1999) y otras. Considerando que dos terceras partes del agua en México son de origen subterráneo (Goytia, 1998), existe la latente necesidad de determinar la calidad de

las aguas en todas las regiones donde éstas están potencialmente expuestas a ser contaminadas selenio y arsénico, debido a las condiciones naturales e industriales del sitio.

Por otro lado, el selenio no ha sido estudiado en México a pesar de que las condiciones naturales aunadas a las fisicoquímicas del medio y el constante crecimiento industrial favorecen la presencia de éste en formas solubles e insolubles. Así mismo, hay que tomar en cuenta que, si bien es cierto que el selenio es necesario para la vida, también es cierto que su acumulación en el cuerpo provoca signos de toxicidad como trastornos en el tracto digestivo, dermatitis, etc (Albert, 1985).

Esta tesis tiene como finalidad la determinación de la cantidad de arsénico y selenio presente en diferentes pozos de agua de usos diversos de una zona industrial de México. El uso del método de espectroscopia de absorción atómica con generador de hidruros permitirá alcanzar límites de detección de 1 µg/L (Beaty, 1979).

Se investigará el marco legislativo mexicano en relación a la concentración máxima permisible de estos elementos químicos en el agua de uso potable, industrial, de esta manera se podrá identificar los pozos de agua que sobrepasen dichos límites y se darán las recomendaciones al respecto.

Dado que dichos metaloides pueden provenir de fuentes naturales o antropogénicas, este estudio se enfocará, en caso de observarse concentraciones por arriba de las legislaciones mexicanas vigentes, a detectar cual es la posible causa de la presencia de éstos en las aguas subterráneas.

I. MARCO TEÓRICO.

1.1 IMPORTANCIA DEL AGUA.

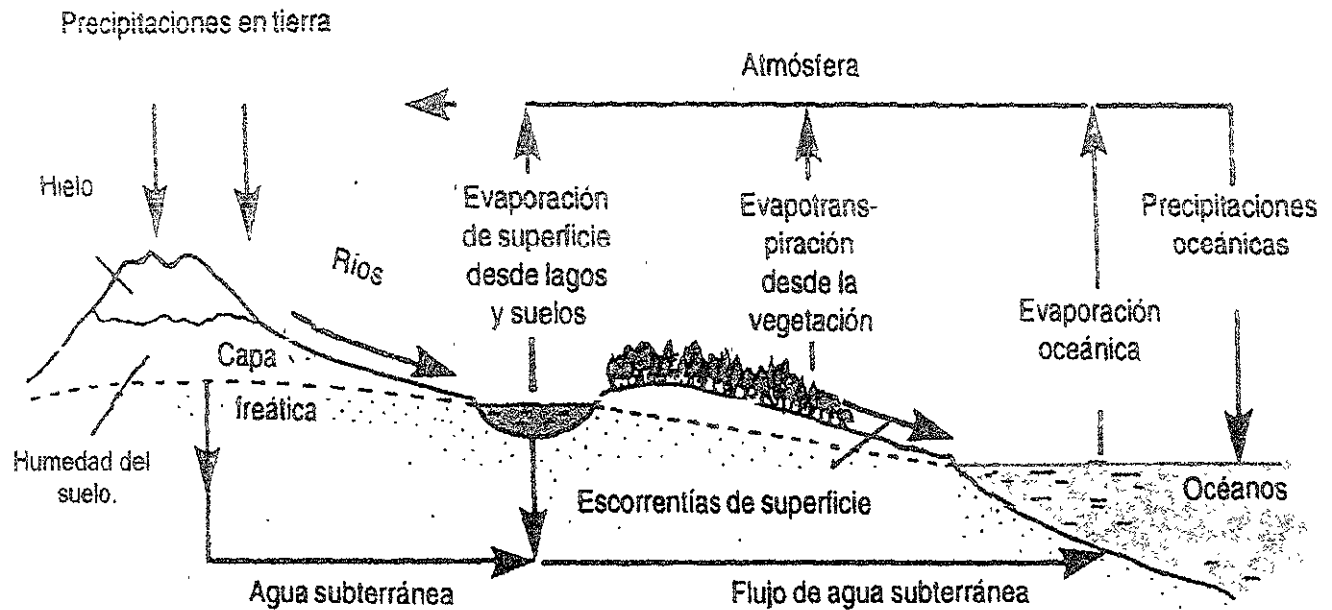
El agua es esencial para la vida, ya que funciona como el disolvente por excelencia y es donde se lleva a cabo la mayoría de las reacciones químicas. El agua es fisiológicamente necesaria para la supervivencia de los organismos de la Tierra, ésta ingresa al organismo a través de alimentos y bebidas. El promedio de agua que un adulto ingiere es de 2 a 2.5 L diariamente, aunque las mujeres y los niños ingieren una proporción menor (Mc Junkin, 1986). Basándose en dicha ingestión las diferentes organizaciones ambientales y sanitarias han fijado un nivel máximo permisible de contenido de sustancias tóxicas en el agua (OMS, 1995).

El agua dulce proviene de precipitaciones que caen sobre la tierra. Si el terreno es arcilloso, el agua queda retenida y la evaporación es alta. Si el terreno es arenoso, el agua se drena hacia capas inferiores y la evaporación es menor. Las circunstancias climáticas (presión, temperatura, humedad del aire) influyen en la magnitud de la evaporación.

El agua de las precipitaciones al caer en la zona de captación se dirige a uno de los tres destinos siguientes (ver Figura 1) :

- 1.- Puede permanecer en el suelo como humedad de superficie o como nieve.
- 2.- Fluir sobre la superficie por pequeños canales para convertirse en aguas de superficie.
- 3.- Infiltrarse en el suelo y convertirse en agua subterránea.

FIGURA 1. Ciclo del agua (Gray, 1996).



Los suministros de agua provienen de dos principales fuentes dentro del ciclo del agua: aguas superficiales y aguas subterráneas

En la República Mexicana existe aproximadamente un volumen anual de 255 km³ de agua subterránea del cual se aprovecha únicamente 28 km³/año (Murgia, 1981).

CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA.

Según la Asociación Americana para el tratamiento del agua (AWWA), el término calidad del agua es utilizado para definir las características químicas, físicas, biológicas y radiológicas por las cuales se evalúa su aceptabilidad (American Water Works Association, 1975).

La calidad del agua potable se basa en la evaluación de cinco parámetros principales (Tebutt, 1997) :

- Parámetros organolépticos
- Parámetros naturales fisicoquímicos
- Sustancias indeseables en cantidades excesivas, que son aquellas sustancias que son directamente dañinas en altas concentraciones, causan problemas de sabor u olor y que pueden no ser problemáticas por ellas mismas, pero son indicadores de contaminación.
- Sustancias tóxicas, que son aquellas que pueden tener efectos tóxicos sobre el hombre y cuya severidad depende de la dosis recibida y el tiempo de exposición.
- Parámetros microbiológicos.

La calidad del agua subterránea tiene un papel muy importante en el abastecimiento del agua potable, ya que su calidad generalmente es mucho mejor que la del agua proveniente de cuerpos superficiales (Carrasco,1992).

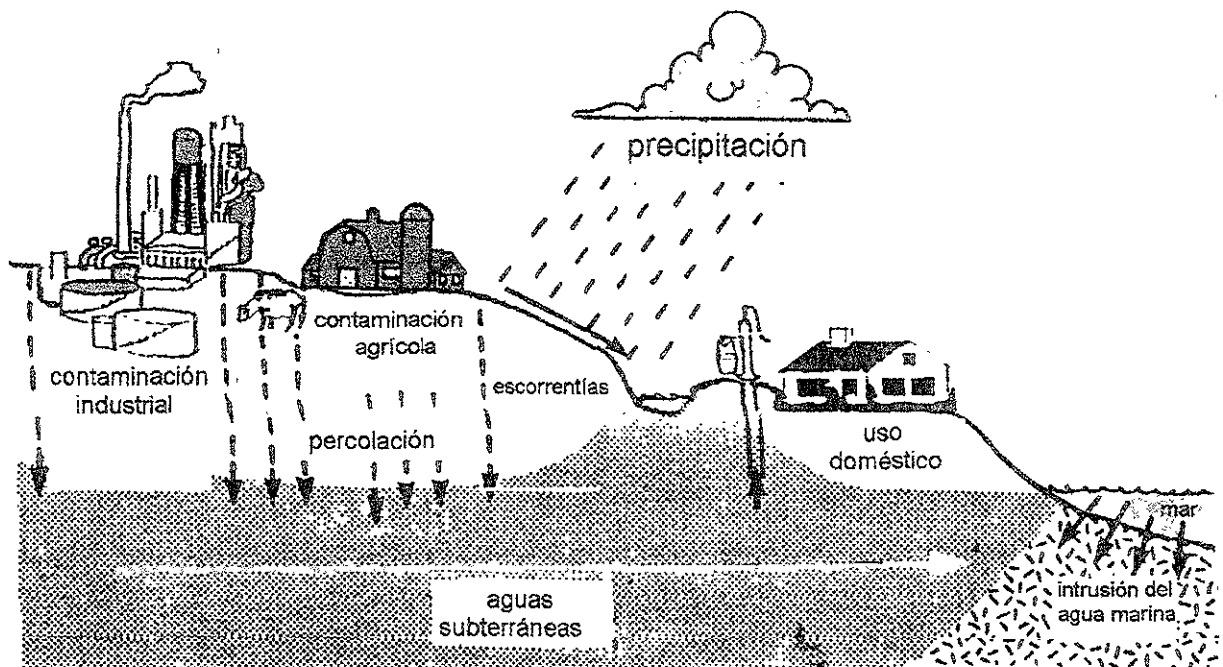
El Servicio de Salud de los Estados Unidos (United States Public Health Service, USPHS) define la contaminación del agua como la presencia de cualquier sustancia extraña (orgánica, inorgánica, radiológica o biológica) en el agua que tiende a degradar su calidad así como a constituir un riesgo o impedimento para el uso al que se encontraba destinada (American Water Works Association,1975).

Existen tres tipos diferentes de contaminación: la contaminación biológica, debida al contenido de uno o más microorganismos que se encuentren en un sustrato al que no pertenecen o en concentraciones que exceden a las naturales; la contaminación física, que se debe a la presencia en un sustrato dado de formas de energía que exceden a los niveles basales, como la contaminación térmica y la radioactiva, y la contaminación química, la cual se origina cuando una sustancia química definida, ya sea de origen natural o sintético, se acumula en una matriz determinada a niveles superiores al nivel basal. Cuando la sustancia que se encuentra en exceso existe en la naturaleza pero no en concentraciones tan altas, el origen de dicha acumulación pueden ser las actividades del hombre; en este caso, las sustancias se denominan antropogénicas. Si el hombre no es el responsable de la presencia de los contaminantes en el sustrato, se dice que dicha contaminación es de origen natural.

La contaminación antropogénica del agua subterránea (ver Figura 2) proviene principalmente de:

- 1) Las actividades productivas como la explotación de los recursos renovables y no renovables, la agricultura y la industria.
- 2) Las actividades no productivas como el transporte, las actividades domésticas, el uso de rellenos sanitarios.
- 3) La fuga de elementos contaminantes como petróleo, hacia los acuíferos cercanos.

FIGURA 2. Fuentes de contaminación antropogénica (Kruus, 1991).

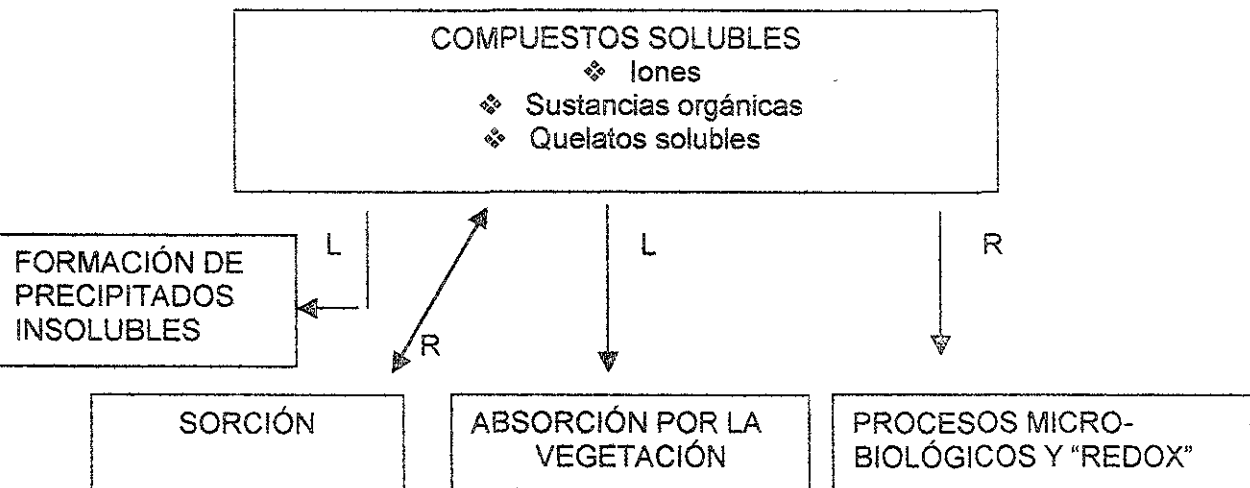


La calidad del agua subterránea depende de los siguientes factores (Gray, 1996):

- 1) La naturaleza del agua de lluvia, la cual puede variar considerablemente, especialmente en términos de acidez debido a la contaminación.
- 2) La naturaleza de las aguas subterráneas existentes.
- 3) La naturaleza del suelo a través del cual el agua se infiltra.

La dispersión de los contaminantes en los acuíferos es dependiente de: la física del movimiento del agua subterránea, la solubilidad del contaminante, el empleo del contaminante por bacterias, la eliminación por la vegetación, el intercambio iónico en la matriz y la capacidad de los contaminantes de ser adsorbidos en las superficies sólidas (ver Figura 3).

Figura 3. Procesos químicos y biológicos por los que disminuye la contaminación de las aguas subterráneas (R: Proceso rápido, L: Proceso lento) (Carrasco, 1992).



Es muy importante señalar que la contaminación del agua no proviene únicamente del manto freático, sino también depende de: la extracción y conducción del agua, donde puede llegar a haber un manejo sanitario inadecuado por contaminación externa de pozos, desprotección de lagos y ríos y uso inadecuado de las presas; el uso inadecuado de agentes potabilizadores en el centro de distribución; un diseño inadecuado o mantenimiento insuficiente de la red de distribución; un mal cuidado de los sistemas de almacenamiento dentro del domicilio del destinatario final y la manipulación antihigiénica del agua antes de su uso.

Por todas estas razones, a pesar de que las aguas del subsuelo ofrecen un suministro natural en principio más puro, económico y satisfactorio, existe la posibilidad de que éstas se lleguen a contaminar ya sea por causas naturales o antropogénicas. Por esto, es

indispensable el buen manejo del agua, así como evitar la contaminación de suelos que pueda llegar a afectar los acuíferos cercanos.

Las áreas con mayores alteraciones en la calidad de las aguas subterráneas en México son la Comarca Lagunera, por la difusión de las sales arsenicales, así como el Valle de México y otros acuíferos en zonas urbanas, por la infiltración de lixiviados de desechos sólidos y descargas de agua residual (Goytia, 1998).

1.2 EL ARSÉNICO

El arsénico (As) es un elemento de frontera que está presente en el ambiente como un constituyente de los compuestos orgánicos e inorgánicos. Este elemento puede encontrarse en el medio ambiente en cualquiera de sus cuatro estados de oxidación (3-, 0, 3+ y 5+) dependiendo del pH, de los potenciales de oxidación (pE) y otros factores. Las propiedades de los compuestos del arsénico dependen de su estado de oxidación. En el cuadro siguiente se presenta un resumen de las propiedades principales del arsénico.

Cuadro 1. Propiedades del arsénico.

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Masa atómico del As metálico | 74.91 g/mol |
| Punto de ebullición del As metálico | 613°C |
| Punto de fusión del As metálico | 817 °C |
| Densidad del As metálico | 5.78 g/cm ³ |

El arsénico pentavalente existe en agua bajo condiciones oxidantes, mientras que el arsénico trivalente es más estable en ambientes reductores. Los estados de oxidación 0 y 3- solamente ocurren bajo condiciones fuertemente reductoras, por lo que son raros en ambientes naturales (García, 1997).

TRANSPORTE Y DESTINO

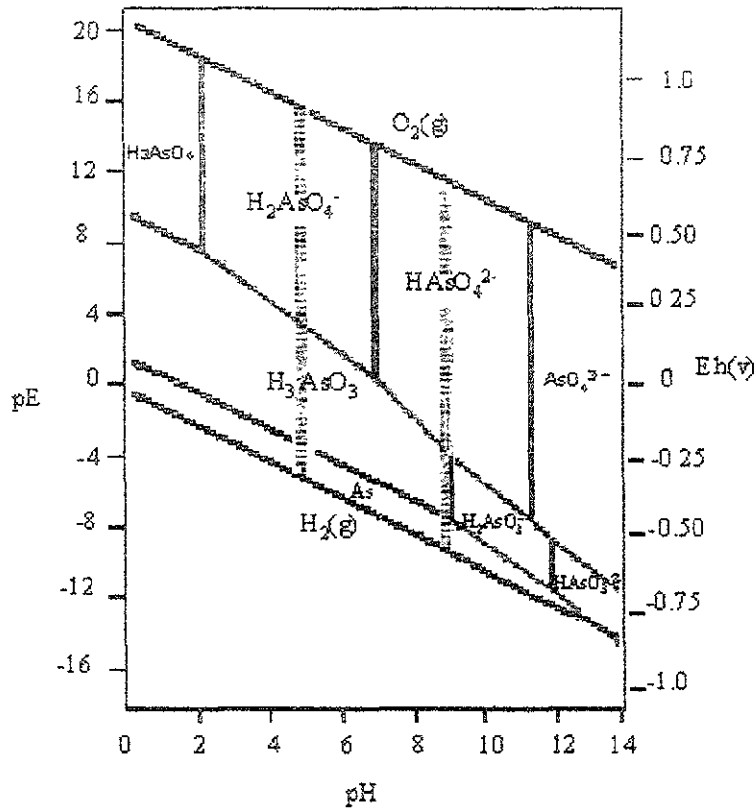
El arsénico posee cierto grado de movilidad en el medio ambiente, dependiendo de su forma química y de las propiedades del medio que lo rodea. En un acuífero, es importante

considerar la volatilización cuando la actividad biológica o las condiciones altamente reductoras producen arsinas o metilarsénicos. Los procesos de sorción por los sedimentos influyen considerablemente en el destino de estas sustancias químicas. Cierta número de organismos metabolizan al arsénico a compuestos orgánicos y con ello se incrementa su movilidad (Bowell, 1994).

A pH 5-8 las especies que predominan en condiciones oxidantes ($E_h = 0.2-0.5$ V) son $H_2AsO_4^-$ y $HASO_4^{2-}$, mientras que en condiciones reductoras ($E_h = 0-0.01$ V) la especie que predomina es H_3AsO_3 (ver Figura 4). En aguas con hierro, el arsénico puede movilizarse a valores de potencial de oxidación menores de 0.1V, como resultado de su liberación por la disolución de los oxihidróxidos de hierro que habían adsorbido y coprecipitado al As (V), el arsénico liberado en condiciones anaeróbicas es principalmente As (III), debido a la reducción del ion férrico a ion ferroso, el cual libera a su vez arsénico (V) que se reduce a As (III). La reducción de As (V) a As (III) favorece la movilización del arsénico debido a que el As(III) es más móvil (Pierce y Moore, 1982). La cantidad de arsénico liberado bajo estas condiciones es 10 veces más comparado con el arsénico libre en condiciones aeróbicas. (Nriagu, 1994).

La solubilidad del arsénico va a estar determinada, principalmente, por la concentración de manganeso (Mn), hierro (Fe) y calcio (Ca), contenida en el agua, ya que estos iones, al reaccionar con el arsénico, forman $Mn_3(AsO_4)_2$, $FeAsO_4$ y $Ca_3(AsO_4)_2$, complejos insolubles en agua. Debido a esto, todos aquellos aniones que compitan con el Fe, Mn y Ca por el sitio activo alteran la movilización del arsénico. Un ejemplo de ello son los iones fosfato, los cuales, a concentraciones de 3×10^{-3} M, evitan que el As sea adsorbido y coprecipitado con los iones metálicos, aumentando, de manera substancial, su concentración en las aguas (Clement y Faust 1981). En forma de síntesis se puede establecer que el arsénico incrementa su movilidad debido a su solubilización en condiciones de pH muy bajo, donde los iones metálicos son solubilizados, y pH muy alto, donde los iones hidróxido (OH^-) compiten por los sitios activos de los iones metálicos, así como en condiciones reductoras. De manera inversa, su solubilidad es mínima en condiciones oxidantes y de pH cercanos a la neutralidad (Bowell, 1994).

Figura 4. Diagrama del predominio de las especies de As en función del potencial redox (pE) y del potencial de hidrógeno (pH) para un sistema de As-H₂O a 25°C. La concentración total de As disuelta es 50 µg/L. El área con las barras verticales representa el pE-pH que comúnmente se encuentra en aguas naturales (Cullen, 1989).



FUENTES NATURALES Y ANTROPOGÉNICAS.

Fuentes naturales. En la naturaleza, el arsénico se encuentra libre y combinado en un gran número de minerales, generalmente, en forma pentavalente. Existen más de 150 minerales que lo contienen; algunos de éstos son:

- Arsenolita, (As₂O₃)
- Mispíckel, (FeS₂ • FeAs₂)
- Oropimento (As₂S₃)
- Rejalgar, (As₂S₂)
- Cobaltita (CoAsS)

En promedio, el contenido de arsénico en la corteza terrestre es de 2 mg/L. No obstante, su distribución es muy heterogénea. En los suelos con depósitos de sulfuros se ha encontrado concentraciones de hasta 8 000 mg/kg (Albert, 1985). El arsénico se encuentra frecuentemente en aguas naturales a las que llega por la erosión de rocas superficiales y volcánicas.

Los niveles de As más altos en rocas se encuentran en fosforitas y lutitas con valores promedio de 22 y 15 mg/L respectivamente; en calizas y areniscas con valor medio de 2.5 mg/L y en rocas ígneas con 1.5 mg/L en promedio (García, 1997).

Por lo común, las aguas superficiales tienen bajos contenidos de arsénico. En cambio, en los casos de vertientes calientes, dichas concentraciones pueden ser muy elevadas. Esto se ha observado, por ejemplo, en Japón, Nueva Zelanda y Estados Unidos y México (Albert, 1985, Ramos, 1996).

Fuentes antropogénicas. La mayor parte del arsénico que existe en el agua y en el ambiente proviene de la actividad humana. Los productos generados por el hombre incluyen el arsénico metálico, el pentóxido y el trióxido (As_2O_5) y (As_2O_3), los arseniatos de calcio y plomo, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$, los arsenicales orgánicos, etc.

Estas sustancias pasan al medio ambiente durante el empleo de arsenitos como insecticidas o herbicidas, en cultivos tan variados como la vid, el algodón, verduras, tomates o como antiparasitarios en baños para ovejas y cabras, etc. También se emplean arseniatos como esterilizantes del suelo, plaguicidas y como preservadores de maderas para estacas.

El arsénico metálico se usa en aleaciones de plomo y cobre y en la fabricación de semiconductores. En las fundidoras el As se desecha como desperdicio de la fundición. Debido a su frecuente presencia en los minerales, no es de extrañar que se produzcan descargas intensas de arsénico al ambiente a partir de los gases de chimeneas y líquidos de descarga industrial provenientes de fundiciones de minerales, especialmente los no ferrosos, tales como cobre, estaño y cobalto, entre otros.

También hay emisiones de As generadas en los hornos de las fábricas que usan carbón que contiene naturalmente este elemento, los hornos de productoras de vidrio que emplean este elemento para eliminar el tinte verdoso y por otros procesos de combustión.

La mayor cantidad de arsénico es utilizado como arsénico inorgánico en forma de arsenito y arsenato (Carrasco, 1992).

Dadas las variadas fuentes de arsénico, tanto naturales como antropogénicas, no resulta extraño que los vegetales y animales lo capten y que llegue al hombre a través del agua y los alimentos. En estudios realizados en Estados Unidos, se determinó que en la dieta promedio existen concentraciones de arsénico de entre 0.05 y 0.16 mg/kg (Albert, 1985).

Los usos de los compuestos de arsénico en medicina humana y veterinaria, en forma de arsenicales orgánicos, son una fuente adicional de exposición para el hombre. Los usos de estos productos en humanos han disminuido notablemente, no así las aplicaciones veterinarias.

EFFECTOS DE LA INTOXICACIÓN CON ARSÉNICO.

Las intoxicaciones con este metal pueden ser agudas o crónicas. La mayoría de las veces la que se presenta es de carácter crónico.

Efectos tóxicos agudos.

La intoxicación aguda es generalmente accidental o voluntaria y sus efectos son:

- a) Daño gastrointestinal severo con dolores, vómitos y diarrea.
- b) Vasodilatación e hiperhemia.
- c) Daño renal glomerular y tubular, con reducción del volumen urinario y anuria final.
- d) Depresión y parálisis de la respiración que frecuentemente causa la muerte.
- e) Crisis convulsivas y pérdida del conocimiento.
- f) Hipotermia
- g) Anormalidades cardíacas.

La dosis letal media de arsénico, especialmente inorgánico es baja (DL_{50} oral para ratas es de 8-48 mg/kg) y puede ocurrir la muerte dentro de las 48 horas después de la ingestión.

En el cuadro 2 se puede observar la dosis letal media, reportado por Bowen (Bowen,1979), de As en mamíferos (vía administración intravenosa) y la toxicidad del As en la dieta humana.

Cuadro 2. Toxicidad relativa del As en mamíferos, administración intravenosa y en la dieta (Bowen, 1979).

| Dosis letal media (LD ₅₀) en mamíferos, administración intravenosa (mg/kg de peso) | Dosis en la dieta humana mg/ día | |
|--|----------------------------------|--------|
| | Tóxico | Letal |
| 6 | 5-50 | 50-340 |

Algunas manifestaciones subagudas suelen ocurrir cuando el individuo se encuentra en ambientes con elevadas concentraciones de arsénico. Se destacan la dermatosis arsenical, con pápulas y ampollas que se ubican preferencialmente en las partes internas de los muslos, en axilas y en región escrotal.

Efectos crónicos.

Las manifestaciones crónicas son, desde el punto de vista epidemiológico, las más importantes porque son las que más frecuentemente se observan en poblaciones expuestas al arsénico. Estas manifestaciones se dan en varios órganos:

- A) Lesiones en la piel
- B) Lesiones en mucosas
- C) Lesiones en el sistema nervioso
- D) Alteraciones hematológicas.
- E) Alteraciones hepáticas
- F) Problemas cardiovasculares
- G) Efectos carcinogénicos
- H) Efectos teratogénicos y genéticos

La ingesta regular de arsénico en agua contaminada que contenga más de 0.1 mg/L de arsénico conlleva a señales claras de intoxicación por arsénico (Chakroborti et al, 1996). En este momento la EPA (Environmental Protection Agency) propuso una disminución del nivel

máximo permisivo de contaminación de 50 microgramos por litro a 10 microgramos por litro en agua potable (EPA, 2000).

La asociación americana para el tratamiento de aguas (American Water Works Association) dice que el beber agua en los Estados Unidos puede conducir a la ingestión de arsénico en concentraciones lo suficientemente elevadas como para aumentar el riesgo de desarrollar cáncer (ENN News Archive, 1999).

A personas que han bebido agua contaminada y que presentaron lesiones en la piel se les han hecho análisis en el cabello, uñas, orina y tejidos del hígado y se han encontrado elevadas concentraciones de arsénico en la gente que estuvo bebiendo dicha agua durante periodos largos de tiempo. Las manifestaciones clínicas más frecuentes son las lesiones en la piel (ver Figura 5), conjuntivitis, melanosis e hiperqueratosis. En casos severos gangrena en las extremidades y tumores malignos (Chakroborti, 1996).

Figura 5. Imagen de las lesiones en los pies provocadas por la ingesta regular de arsénico en agua potable, las concentraciones encontradas en dichos pozos oscilaron entre $(0.10 - 1.8 \text{ mg l}^{-1})^1$.



¹ Imagen extraída de Dipankar Das, et al. (1996) Arsenic groundwater in 6 districts of West Bengal, India. Environmental Geochemistry and Health, Vol. 18, pag 5-15.

TOXICIDAD DE LAS DIFERENTES ESPECIES DE ARSÉNICO.

Se sabe que el arsénico es transformado entre especies orgánicas e inorgánicas con relativa facilidad, en especies de diferentes grados de oxidación por acción química y biológica. La movilidad, biotransformación, disponibilidad y toxicidad dependen de la especie en que se encuentre el elemento. Las especies más tóxicas y abundantes son las inorgánicas, las arsinas, el arsenito (As (III)) y el arsenato (As (V)). Las especies orgánicas como la arsenobetaina, arsenoclorina, ion tetrametilarsónico ((CH₃)₄As⁺), el óxido de trimetilarsina ((CH₃)₃AsO o TMAO) y algunos arsenoazúcares no han sido reportados como tóxicos. Así pues, el orden de toxicidad de las especies de arsénico es: arsinas/arsenito/arsenato/ ácidos arseno-orgánicos como el ácido monometilarsónico (MMA) y dimetilarsínico (DMA) (Crompton, 1997).

La mayoría de los mamíferos metaboliza el arsénico inorgánico en ácido monometilarsónico (MMA) y dimetilarsínico (DMA). Se cree que la metilación ocurre vía la reducción del arsénico pentavalente a trivalente y la adición de un grupo metilo (Thompson, 1993). Las concentraciones de arsénico en la sangre de personas expuestas al arsénico vía agua potable, disminuye cuanto mayor sea la eficiencia de metilación (Concha et al., 1998).

PRESENCIA DE As EN LOS ACUÍFEROS DEL MUNDO.

Las especies predominantes encontradas en el agua son las inorgánicas As III y As V (Manning y Martens, 1997 y Howell et al., 1994). La revista Science publicó que dos millones de habitantes de la India beben agua con arsénico, de los cuales 200 mil presentaron síntomas de intoxicación por As (Janice y Ostrosky, 2000). Así mismo el arsénico proveniente de la explotación de los mantos acuíferos ha contaminado seriamente el ambiente en Asia (WHO, 2000). En 1961-85 Taiwan sufrió uno de los peores incidentes de contaminación por arsénico (0.1-1.8 mg/L) debido a la contaminación del pozo donde extraían el agua. Borgono y Greiber reportaron un problema similar en Antofagasta, Chile donde 100 000 habitantes estaban tomando agua con una alta concentración de arsénico (0.8 mg/L) durante 12 años (1959-1970). Esto provocó que la población presentara problemas dermatológicos relacionados con el consumo del arsénico. En la provincia de Córdoba al norte de Argentina se reportó un incidente similar (Chakroborti et al., 1996).

La lista es larga, ya que casos similares se han reportado en Ashanti Mine Ghana (Bowell et. al., 1994), Union Lake N.J (Rodie et. al., 1995), Tailandia (Janice y Ostrosky, 2000) e inclusive en México donde se calcula que 16 millones de individuos beben agua con concentraciones de As mayores a los límites permisibles por las normas correspondientes (Janice y Ostrosky, 2000). Como ejemplo de ello, en Zimapán, Hidalgo, se encontró que los residentes mostraron envenenamiento crónico por arsénico, el cual incluye cáncer de piel, riñones y enfermedades del hígado. El pozo de este lugar presentó una concentración de 1.1 mg/l que es una cantidad mucho mayor a la máxima permitida de 0.05 mg/L (Graber, 2000). Así mismo, estudios de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí revelaron que los niños de la comunidad Villa de la Paz en S.L.P tienen niveles de arsénico por encima de los límites establecidos por la Organización Mundial de Salud debido a la operación de una empresa minera (Pérez, 1999), se reportaron también altas concentraciones de As en las aguas del río Bravo que ha causado la mortandad masiva de peces (Notimex, 2000) y en la región Lagunera donde la gente estaba consumiendo agua con 0.41 mg/L de As (Chakraborti, 1996).

1.2 EL SELENIO

El selenio no se considera como un metal propiamente dicho, sino como un elemento límite, ya que se encuentra en el límite entre los metales y los no metales, es por esto, que posee características metálicas y no metálicas.

El selenio pertenece al grupo VI de la tabla periódica y es notablemente parecido al azufre en la mayoría de sus propiedades químicas. Sus estados de oxidación más importantes son: 2- (selenuro) , 0, 2+, 4+ (selenito) y 6+ (selenato).

Existe en varias formas alotrópicas: amorfa, cristalina, o roja y gris o metálica y forma un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos parecidos a los que forma el azufre. Reacciona con muchos metales y es de especial interés en química orgánica.

FUENTES NATURALES Y ANTROPOGÉNICAS.

El selenio se encuentra distribuido ampliamente sobre toda la superficie de la Tierra y es comúnmente encontrada en la roca sedimentaria. Se estima que el 58% de las rocas sedimentarias son lutitas, las cuales contienen concentraciones muy altas de selenio (Anderson et al.,1961).

Los niveles de selenio en los suelos varían grandemente en cada zona. Es por esto que los alimentos contienen una cantidad variable de dicho elemento, mayoritariamente en su forma orgánica.

Varias industrias descargan selenio en el aire, agua y suelos que están en contacto directo con ellas (contaminación antropogénica), ya que éste es utilizado ampliamente en la producción de pigmentos usados en plásticos, pinturas, esmaltes, tintas, hule, textiles, petróleo, agentes terapéuticos medicinales, como pigmento de vidrio rubí, decolorante para el vidrio verde, en las emulsiones fotográficas; así como en la manufactura de electrodos, fotoceldas de selenio y mezclas semiconductoras de fusión. El dióxido de selenio es el compuesto más usado en la industria, ya que es empleado como agente oxidante en la manufactura de medicinas y otros químicos; como catalizador en las síntesis orgánicas y como antioxidante en los aceites lubricantes (EPA,1998).

Por otro lado, frecuentemente se utiliza el selenio para hacer shampoos y lociones para la piel, siendo posible su absorción por la piel (ATSDR, 1989).

Las concentraciones de selenio en el agua potable son muy variables según la zona geográfica, pero por lo común se sitúan muy por debajo de 0.01 mg/L. La principal fuente de selenio para la población en general son alimentos como los cereales, la carne y el pescado. Las concentraciones en los alimentos son muy distintas según la zona geográfica en que éstos se producen (OMS,1995).

El selenio rara vez se le encuentra naturalmente en las aguas. Generalmente las concentraciones altas de este elemento son debidos a la contaminación industrial (SHAPO,1982). En aguas de lagos y ríos se han encontrado concentraciones de hasta 750 µg/L, mientras que en aguas subterráneas dicha cantidad disminuye de manera significativa

hasta un promedio de 0.7 µg/L (Crompton, 1997), sin embargo dicha concentración puede ser afectada por contaminaciones, ya sea de fuentes naturales o antropogénicas.

TOXICIDAD DEL SELENIO.

La clasificación del selenio ha sufrido diferentes cambios en las últimas décadas, de ser un elemento tóxico con posibles beneficios a bajas concentraciones, ahora es un elemento beneficioso con efectos tóxicos muy serios si se toma en exceso, ya que es extremadamente tóxico para el hígado (Francis, 1993).

Se ha reportado que el selenio es un micronutriente esencial para muchas especies incluyendo los humanos. La ingesta diaria recomendada es de 0.07 mg/d para los hombres, 0.055 mg/d para las mujeres y 8.7×10^{-4} mg/kg/día para los infantes (ASTDR, 1989).

Se ha descubierto que, durante el metabolismo del selenio en plantas y animales, se forman compuestos que previenen el cáncer. (Ganther, 1997). El selenio trabaja con la vitamina E sinérgicamente, ya que funcionan mejor como antioxidantes e inmunoestimulantes de manera conjunta que como lo harían individualmente; sin embargo, los mecanismos de acción no son, probablemente, los mismos. Estos dos nutrientes son parte del grupo antiedad debido a sus funciones antioxidantes que evitan que los tejidos sean oxidados por los radicales libres (Haas, 2000).

Sus efectos tóxicos pueden aparecer cuando la ingestión excede a la capacidad de eliminación, ya que el organismo humano no parece tener, dentro de ciertos límites, algunos mecanismos de regulación.

Aunque los mecanismos de la toxicidad no se han llegado a comprender del todo, se sabe que en ellos intervienen varios factores: por ejemplo; el selenio tiene una gran capacidad de reemplazar al azufre en ciertos tejidos (uñas, cabello, etc) y, como selenato, puede tener un efecto inhibitorio sobre muchas enzimas sulfhidríticas. Se sabe que la mayoría de los signos de toxicidad se pueden evitar con dietas que contengan un elevado porcentaje de proteínas.

La intoxicación aguda, por este elemento produce efectos nocivos sobre el sistema nervioso central como somnolencia, nerviosismo y en algunos casos, convulsiones.

Por ingestión, puede causar trastornos en el tracto digestivo, dermatitis, etc. En animales de experimentación, se han detectado daños en el hígado por ingestión de selenio. Estudios recientes han demostrado que el selenio causa fetotoxicidad y teratogénesis en seres humanos (Albert, 1985).

Estudios experimentales han examinado los efectos reproductivos de la exposición de selenio en animales. En general, en vitro y en vivo se ha encontrado que la selenometionina y el selenito son más teratogénicos que el selenato, con evidencias claras que la sensibilidad depende de la especie de la que se trate (Danielsson et al., 1990). El selenito y la selenocistamina a concentraciones de 5-250 mg/L presentan también propiedades prooxidativas (Stewart et al., 1999).

Es posible que personas que viven en áreas con altas concentraciones de selenio y que coman alimentos que hayan crecido en la localidad, ingieran cantidades tóxicas del mismo (Francis, 1993).

Muchas especies de aves, peces y crustáceos han demostrado una alta sensibilidad a los niveles elevados de selenio en aguas. Se ha encontrado en experimentos que utilizan al salmón como animal de prueba, que la exposición por 250 días de niveles de selenio de 40-50 $\mu\text{g/L}$ produce una reducción del volumen sanguíneo de los peces (Crompton, 1997). Así mismo, se han observado efectos adversos en estas especies a niveles tan bajos como 2 $\mu\text{g/L}$ de selenio inorgánico (Ohlendorf et al., 1986).

La dosis letal media de selenio vía peritoneal es de 1.3 mg/kg para los mamíferos, mientras que la ingesta tóxica para los humanos es de 5 mg/día (Alloway, 1984).

Aunque no está determinado el carácter cancerígeno del selenio, salvo en forma de sulfuro de selenio, los vertidos industriales que lleven selenio son altamente peligrosos, ya que las plantas acumulan selenio por encima de los valores tóxicos para los animales, por lo que es necesario controlar cuidadosamente los vertidos. Así mismo, se debe de evitar que la ingestión de selenio en las aguas potables sea mayor del límite admisible de 0.01 mg/L ya

que, como mencionamos antes, el agua se toma en cantidades considerablemente mayores a las cantidades de comida que ingerimos todos los días. Además, las especies más frecuentes encontradas en las aguas son las inorgánicas, cuya toxicidad es comparable con la toxicidad de los compuestos de arsénico inorgánico. Por otro lado, Vinceti reportó que la ingesta de selenato disuelto en aguas potables contaminadas (7-9 $\mu\text{g/L}$) durante un periodo de 16 años aumentó significativamente la cantidad de abortos espontáneos en Regio Emilia, al sur de Italia (Vinceti, 2000).

En México no se han realizado estudios acerca de la incidencia de selenio soluble en aguas tanto potables como de distribución, sin embargo, debido a las características de nuestras aguas y suelos, y a la alta actividad industrial, es necesario que se tome en cuenta ya que puede provocar problemas a largo plazo.

1.3 LEGISLACIÓN DE ARSÉNICO Y SELENIO EN AGUAS.

Para poder comenzar a hablar de la legislación, primero tenemos que definir que es un límite máximo permisible. Éste se define como la concentración máxima permisible de una sustancia tóxica en una matriz expresada como un porcentaje mensual (Crompton, 1997). El establecimiento de los límites ambientales está de acuerdo con las concentraciones que se han verificado en varias partes del mundo y con las cuales no se han detectado efectos en la salud de la población expuesta (Gálvao, 1987).

La Organización Mundial de la Salud, no establece límites máximos permisibles sino valores guías, los cuales se definen como la concentración de un componente que no supone un riesgo significativo para la salud del consumidor si éste bebe el agua durante toda su vida. Las sustancias que se encuentran seleccionadas en los valores guía se consideran potencialmente peligrosas para la salud humana y son aquellas que se detectan con relativa frecuencia en el agua potable y, algunas veces, se hallan en concentraciones relativamente elevadas (OMS, 1995).

En Estados Unidos la Agencia de Protección al Ambiente (EPA), divide a los contaminantes del agua potable en primarios y secundarios; los primarios son elementos potencialmente nocivos para la salud, entre éstos se encuentran el arsénico y el selenio; y los secundarios contienen elementos que pueden llegar a afectar el bienestar público y no la

sanidad pública, como el pH y los cloruros. Así mismo la EPA utiliza dos tipos de niveles, el nivel máximo de contaminación objetivo (MCLG) y el nivel máximo de contaminación (MCL). Éste último se define como la concentración a la cual el elemento en cuestión tiene un efecto adverso en la salud humana (Gray,1996).

INTERNACIONAL.

La inquietud por legislar a fin de mantener un ambiente sano es una necesidad y responsabilidad de los diferentes países. Algunos países se basan para legislar, en la calidad del cuerpo receptor o en los usos a que se destina su agua. Las legislaciones ambientales más reconocidas a nivel mundial son las dictadas por la Organización Mundial de la Salud, la Comisión de la Comunidad Europea (CE) y por las diferentes agencias ambientales de los Estados Unidos. En el cuadro 3 se muestran los valores establecidos por dichas agencias.

Cuadro 3. Valores guía y máximos establecidos para el agua potable por las diferentes organizaciones internacionales de arsénico y selenio.

| Parámetro | EPA ¹ | | USPHS ² | | OMS ³ | CE ⁴ |
|-----------|------------------|-----------|--------------------|--------------|------------------|-----------------|
| | MCGL | MCL | Valor guía | Valor límite | Valor guía | Valor límite |
| As | -- | 0.05 mg/L | 0.01mg/L | 0.05 mg/L | 0.01mg/L | 0.05 mg/L |
| Se | 0.05 mg/L | 0.05 mg/L | -- | 0.01 mg/L | 0.01 mg/L | 0.01 mg/L |

1 Fuente: Environmental Protection Agency, National Primary Drinking Water Regulations, 1999.

2 Fuente. Porras, 1978

3 y 4 Fuente: Gray, 1996

Los estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se usan universalmente y son la base para la legislación de la CE y de las organizaciones de Estados Unidos, tales como la Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA), el Servicio de Protección a la salud (USPHS) Y la Asociación Americana de Trabajos del Agua (AWWA).

Las normas americanas surgen de la Safe Drinking Water Act de 1974, que dirigió la Agencia de Protección al Medio Ambiente para establecer los estándares mínimos de calidad del agua potable (National Drinking Water Standards). La ley se creó para asegurar la

uniformidad y la consistencia del reglamento de la calidad del agua potable. Las enmiendas de 1986 y 1996 a la Ley exigieron a la Oficina de agua potable de la EPA la publicación de un nivel máximo de contaminación objetivo (MCGL) y de un nivel máximo de contaminación (MCL), de esta manera se conforman las leyes que vigilan y protegen la calidad del agua potable. Es importante mencionar que en este momento la EPA se encuentra revisando una propuesta para disminuir el nivel máximo de concentración del arsénico de 0.05 mg/L a 0.005 mg/L (EPA, 2000 b).

La Comisión de la Unión Europea establece al arsénico y al selenio como sustancias tóxicas y establece un límite máximo para cada uno.

MEXICANA.

En la legislación mexicana los valores límites de los contenidos de arsénico y selenio depende del uso al que esté destinada dicha agua. En este trabajo nos enfocamos a dos tipos de aguas: la de uso doméstico (potable) y la de uso industrial.

Agua para uso doméstico.

Para tal fin se tienen las normas que marca la Secretaría de Salud (SSA) el Reglamento de la Ley General de Salud en materia de control sanitario y el Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas dictado por la Comisión Nacional de Aguas (CNA).

El reglamento en materia de control sanitario en su Artículo 209 establece que " el agua potable es toda aquella cuya ingestión no cause efectos nocivos a la salud", y cuyo contenido en mg/L no excederá los límites permisibles que a continuación se expresan:

Contenido máximo de As total: 0.05 mg/L

Contenido máximo de Se total: 0.05 mg/L "

Así mismo, las normas oficiales mexicanas NOM-127-SSA1-1994 y NOM-014-SSA1-1993 reglamentan, respectivamente, los contenidos máximos permisibles en aguas para uso

y consumo humano y para agua purificada envasada, las cuales requieren que el nivel de arsénico no sea mayor de 0.05 mg/L, sin embargo, no menciona ningún nivel máximo permisible para selenio.

Por otro lado, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) publicó en 1989 un Criterio Ecológico de Calidad del Agua (CE-CCA-001-89) cuya función principal es el aprovechamiento racional y la prevención y control de la contaminación del agua, así como la protección de la flora y la fauna. Estos criterios son de carácter voluntario, al contrario de las normas y reglamentos que son de carácter obligatorio.

El nivel máximo permisible para fuentes de abastecimiento de agua potable es:

Para arsénico: 0.05 mg/L

Para selenio: 0.01 mg/L

La Comisión Nacional de Aguas, en su Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas, menciona los niveles máximos permisibles de contaminantes en cuerpos receptores para descargas de aguas residuales, el cual establece una tolerancia máxima de contenido de arsénico y selenio en aguas de abastecimiento de agua potable (DA y DI) de:

Arsénico: 0.05 mg/L

Selenio: 0.01 mg/L

Este reglamento habla más bien de los cuerpos receptores para aguas residuales, sin embargo, establece que "las sustancias tóxicas", como el selenio y el arsénico, "no deberán estar en concentraciones tales que conviertan el agua del cuerpo receptor en inadecuada para el uso específico a que se destinen". Así pues, de manera indirecta, está regulando que el agua potable, para que sea adecuada para su uso, deberá cumplir con las especificaciones de calidad que en este reglamento se dictamina.

Agua para uso industrial.

Los requerimientos de calidad del agua en la industria es de gran complejidad, siendo muy amplia y variada no sólo por el tipo de industria sino también porque una misma fábrica puede utilizarla para diferentes actividades. Sin embargo, no hay que olvidar que dichas industrias pueden ser alimentarias, y éstas deberán utilizar agua con la misma calidad que los sistemas de distribución del agua potable.

Las concentraciones máximas permisibles de As y Se en aguas de uso industrial de acuerdo al Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas son:

Para arsénico: 5 mg/L.

Para selenio: 0.05 mg/L

Otros usos.

En México existen diversos niveles máximos permisibles dependiendo del uso al que esté destinado el agua, el resumen de estos valores se encuentra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Niveles máximos permisibles de arsénico y selenio en aguas en función de sus usos*.

| Elemento | Riego agrícola | Uso pecuario | Uso recreativo (contacto primario) |
|-----------------|-----------------------|------------------------|---|
| As | 5 mg/L | 1 mg/L | 1 mg/L |
| Se | 0.05 mg/L | 0.05 mg/L ¹ | 0.1 mg/L |

* Datos del Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas

¹ Dato proveniente de los Criterios Ecológicos de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (no existe un límite en el Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas).

1.4 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (AAS).

FUNDAMENTOS TEÓRICOS².

La espectroscopía de absorción atómica es una técnica analítica que se basa en la capacidad que tienen los átomos libres (en estado basal) de excitarse cuando se hace incidir en ellos radiaciones de una determinada longitud de onda. Un átomo se encuentra en estado basal cuando su nivel de energía es el más bajo (E_0).

Si a un átomo se aplica energía de una magnitud apropiada, ésta será absorbida por él e inducirá que el electrón exterior sea promovido a un orbital menos estable o "estado excitado" en un proceso conocido como absorción atómica. Este proceso se ilustra en la siguiente figura:

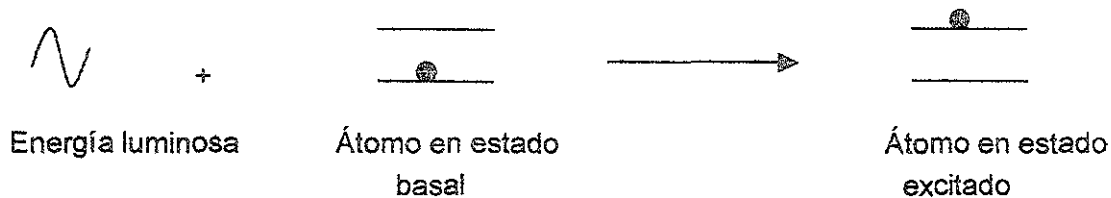


Figura 6. Proceso de la absorción atómica

La característica de interés en las mediciones por absorción atómica es la cantidad de energía (radiación electromagnética), a una longitud de onda determinada, que se absorbe, cuando pasa a través de una nube de átomos. Conforme se incrementa el número de átomos en el paso de la luz, aumentará la cantidad de energía absorbida. Se puede efectuar una determinación cuantitativa del analito presente midiendo la cantidad de energía absorbida.

² Beaty R.D. (1979) Conceptos, instrumentación y técnicas de espectrofotometría por absorción atómica. U.S.A, Perkin-Elmer, 7-13 pags.

El espectrómetro de absorción atómica (AAS) es un instrumento que se utiliza para la cuantificación de elementos como el As y Se de muestras en solución. El uso de fuentes especiales de luz y la selección cuidadosa de la longitud de onda permite la determinación cuantitativa específica de estos elementos individuales, en la presencia de otros.

La nube de electrones se produce por la aplicación de energía térmica a la muestra para disociar los compuestos químicos en átomos libres. La aspiración de una solución de la muestra dentro de una flama alineada con el rayo de luz, sirve para este propósito. Bajo condiciones apropiadas de la flama, muchos átomos permanecerán en estado basal y podrán absorber luz de longitud de onda apropiada, proveniente de una fuente de luz.

La luz, a la longitud de onda de resonancia, de intensidad inicial I_0 , se enfoca sobre la flama que contiene átomos en estado basal. La intensidad inicial de la luz disminuye en una cantidad determinada por la concentración de los átomos en la flama. Posteriormente, la luz se dirige al detector, donde se mide la intensidad de luz disminuida I . La cantidad de luz absorbida se determina por comparar I_0 con I .

Para definir la cantidad de luz absorbida se emplean diferentes términos:

Transmitancia (T): razón de la intensidad final o I (que incide en el detector) con respecto a la intensidad inicial (I_0).

$$T = I/I_0$$

Porcentaje de transmisión (%T): transmitancia expresada en términos de porcentaje

$$\%T = 100 \times (I/I_0)$$

Porcentaje de absorción (%A): complemento del porcentaje de transmisión y define el porcentaje de luz inicial que es absorbida en la flama.

$$\%A = 100 - \%T$$

Absorbancia (A): término para caracterizar la absorción de luz en la espectrometría de absorción atómica, pues esta cantidad guarda una relación lineal con la concentración. Es el logaritmo del recíproco de la transmitancia.

$$A = \log (I_0/I) = \log (1/T)$$

La absorbancia se relaciona con la concentración mediante la ecuación de la ley de Lambert-Beer:

$$A = abc$$

En donde A es la absorbancia; a es el coeficiente de absortividad y es una constante; b es la longitud del paso de luz ocupado por la celda de absorción; c es la concentración de las especies absorbentes en la celda de absorción. La ecuación establece que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de las especies absorbentes para ciertas condiciones instrumentales dadas.

Esta conducta de proporcionalidad directa entre absorbancia y concentración, es observada en absorción atómica. Cuando la absorbancia de soluciones patrón conteniendo concentraciones conocidas del analito se miden y se grafican, los resultados de las absorbancias con respecto a la concentración presentan un intervalo de trabajo con comportamiento lineal.

Después de que se ha establecido el intervalo de trabajo, se realiza una curva de calibración con la cual se puede medir la absorbancia de soluciones de concentración desconocida y determinar su concentración interpolando en la curva de calibración. En la instrumentación moderna, la calibración se puede hacer en el instrumento para proporcionar una lectura directa de la concentración desconocida.

Un AAS está formado por cinco componentes principales:

- Fuente de radiación.
- Sistema de atomización
- Monocromador
- Detector
- Sistema de lectura.

SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRUROS³.

El espectrómetro de absorción atómica puede ser acoplado a un sistema de generación de hidruros, el cual reduce el tiempo de análisis y mejora considerablemente los límites de detección. Ofrece una gran sensibilidad para elementos formadores de hidruros volátiles, como el As y Se, en límites de detección de $\mu\text{g/L}$ (Beaty, 1979).

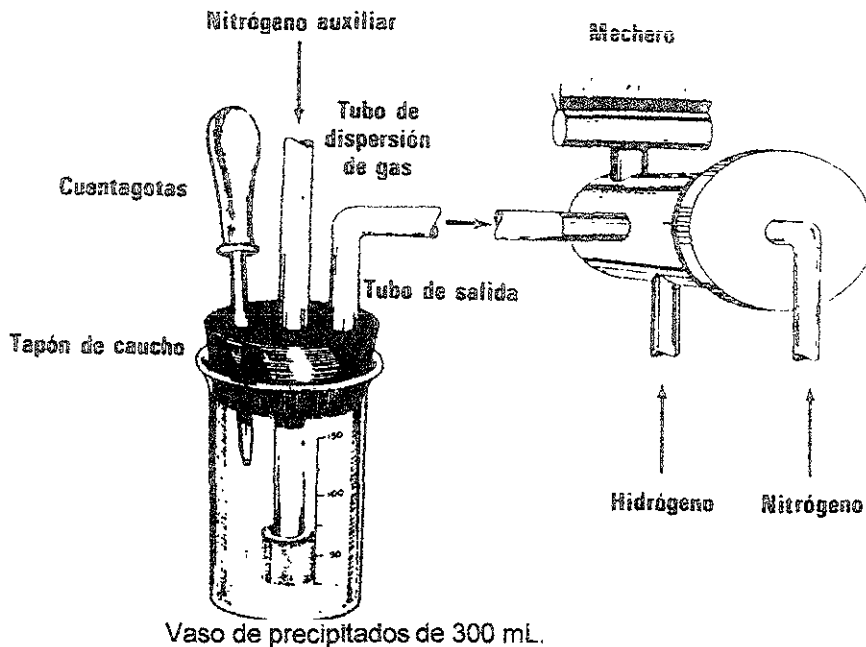
Existen dos métodos: el método manual de generación de hidruros y el método de flujo continuo recomendado especialmente para selenio.

Método manual de generación de hidruros - AAS.

Este método es aplicable a la determinación de arsénico y selenio por transformación de los mismos en sus hidruros con reactivo borohidruro sódico y aspiración en un atomizador de absorción atómica. El ácido arsenioso (As III) y el ácido selenioso (Se IV), se convierten instantáneamente en sus hidruros volátiles con el reactivo borohidruro de sodio en solución ácida. Los hidruros se purgan continuamente con argón o nitrógeno (ver Figura 7) en un atomizador apropiado de un espectrómetro de absorción atómica y se convierten en los átomos de la fase gaseosa. El reductor borohidruro de sodio, por una rápida generación de los hidruros de los elementos hace que sea mínima la dilución de los hidruros por el gas portador y proporciona una determinación rápida y sensible. La determinación de arsénico total requiere que todos los compuestos de arsénico inorgánico estén en el estado de As (III), ya que el pico de absorción atómica de arsina es normalmente un cuarto o un tercio más bajo para As (V) cuando se compara con As (III). Las formas orgánicas e inorgánicas de arsénico se oxidan primero a As (V) por digestión con ácidos. El As (V) se reduce entonces cuantitativamente a As (III) con yoduro de sodio o potasio antes de la reacción con borohidruro de sodio.

³ American Public Health Association (1992) Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, Ediciones Díaz de Santos, 3-47 a 3-56 pags.

Figura 7. Celda manual de reacción para producir hidruros de As y Se (American Public Health Association, 1992).



El ácido selénico (Se VI) no se reduce perceptiblemente con borohidruro sódico. Para determinar el selenio total por absorción atómica y borohidruro de sodio se reduce primero el Se (VI) formado durante el procedimiento de digestión a Se (IV). El rendimiento de la reacción depende de la temperatura, el tiempo de reducción y de la concentración de HCl.

INTERFERENCIAS.

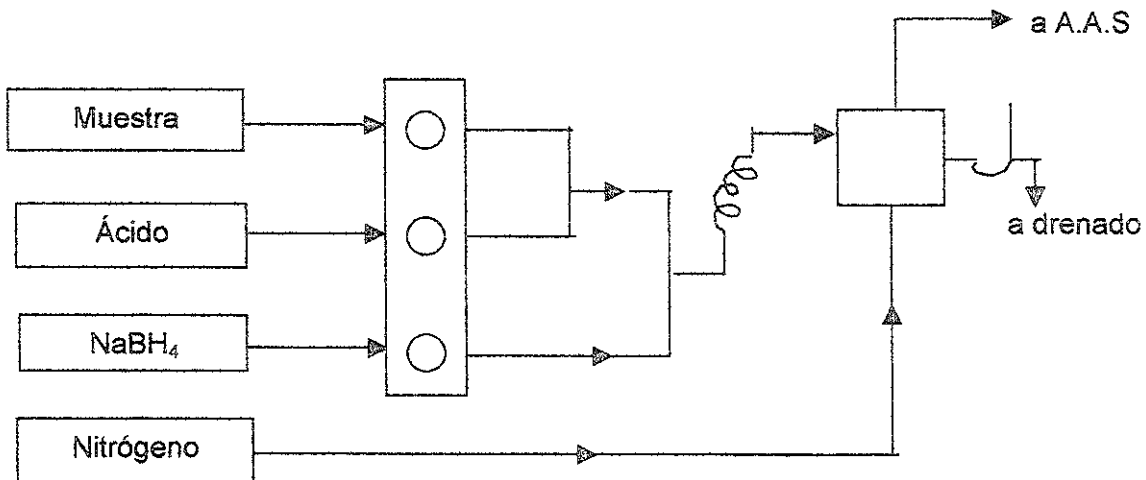
Las interferencias son mínimas, ya que los hidruros de As y Se se separan de la solución que contiene la mayoría de las sustancias que pueden interferir. Concentraciones bajas de metales nobles (aproximadamente 100 $\mu\text{g/L}$ de Ag, Au, Pt, Pd, etc), concentraciones de cobre, plomo y níquel de 1 mg/L o mayores y concentraciones entre 0.1 y 1 mg/L de elementos que forman hidruros (Bi, Sb, Sn y Te) pueden suprimir la respuesta de los hidruros de As y Se. La interferencia por metales de transición depende en buena medida de la concentración de HCl. Las interferencias son menos pronunciadas con HCl 4 a 6 N que con concentraciones bajas. Los nitritos también suprimen la respuesta instrumental

para ambos elementos. Concentraciones elevadas de yoduro interfieren la determinación de Se por reducción de este elemento a su forma elemental, debido a esto no se debe utilizar material de vidrio que haya sido empleado para reducir As (V) con yoduro para la determinación de Se.

Método continuo de generación de hidruros - AAS

El generador continuo de hidruros ofrece las ventajas de sencillez de funcionamiento, reproducibilidad excelente, bajos límites de detección y alta capacidad de volumen de muestra. Su fundamento es el mismo que el método manual de generación de hidruros y su esquema se encuentra en la figura 8.

Figura 8. Esquema de un generador continuo de hidruros.



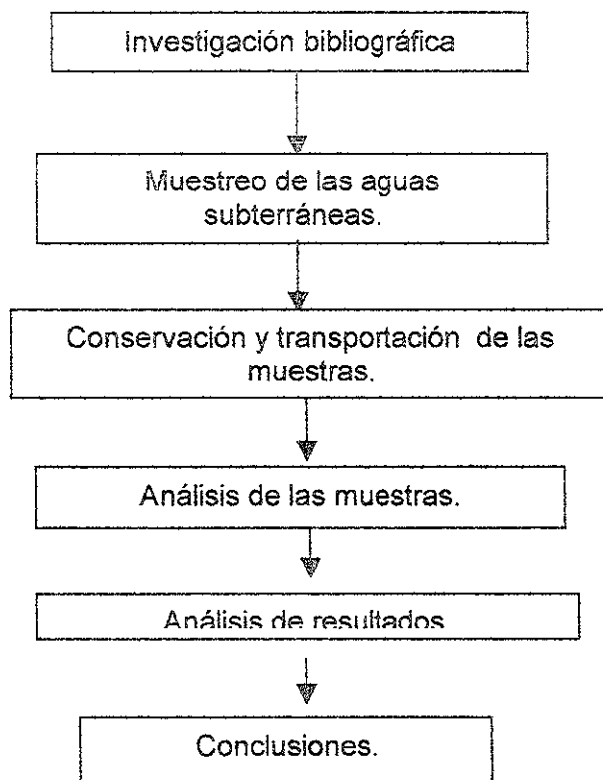
INTERFERENCIAS.

El cloro libre en el ácido clorhídrico es una interferencia corriente, pero de difícil diagnóstico. El cloro oxida al hidruro y puede contaminar el generador de hidruros, impidiendo así las recuperaciones en cualquiera de las condiciones. Cuando se detecta la interferencia, o mejor, antes de emplear cada nueva botella de HCl, elimínese el cloro haciendo burbujear helio durante 3 horas.

Un exceso de oxidante (peróxido, persulfato o permanganato) proveniente de la digestión de selenio total puede oxidar el hidruro. El nitrito es un componente traza común en aguas naturales y residuales, y puede reducir la recuperación de seleniuro de hidrógeno del Se (VI) por encima de un 50% a niveles tan bajos de nitrito como 10 µg/L. Cuando se sospecha esta interferencia, se puede añadir sulfanilamida después de la acidulación de la muestra. La reacción entre nitrito y sulfanilamida elimina por completo el efecto de la interferencia.

II. METODOLOGÍA.

2.1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

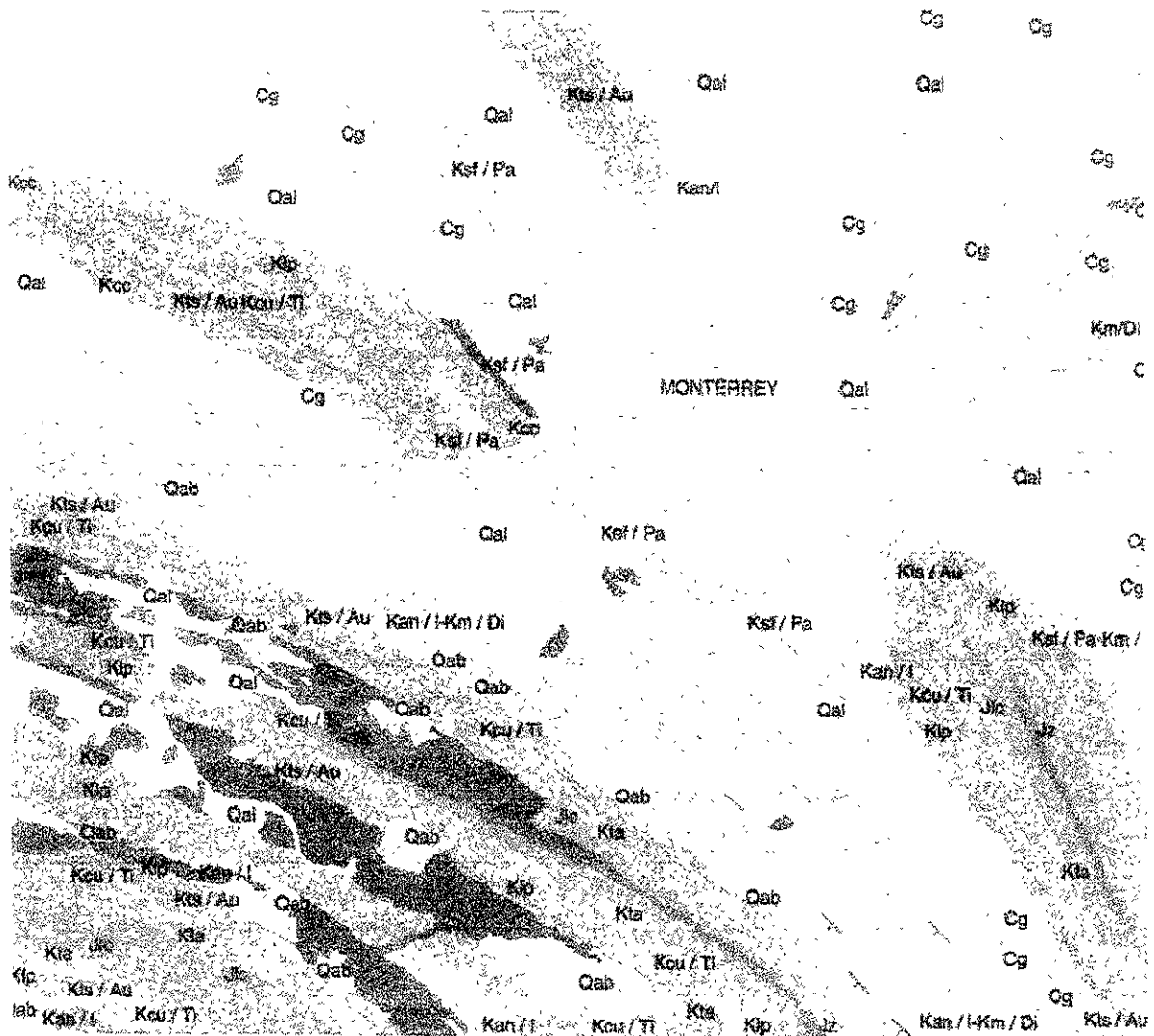


2.2 MEDIO GEOGRÁFICO DEL SITIO DE MUESTREO.

La ciudad de Monterrey se localiza en los denominados llanos de San Nicolás-Monterrey, los cuales forman parte de una cuenca semicerrada y abierta hacia el NE y que está limitada por los cerros de La Silla y Mitras.

En la actualidad, la zona metropolitana de Monterrey ocupa 3 diferentes regiones fisiográficas: el valle, las montañas de media altura y las montañas de gran altura. La geología regional se caracteriza por la presencia de rocas calizas y lutitas del cretácico que afloran en las montañas. Sobre las rocas del cretácico existen conglomerados del terciario. El valle de Monterrey está formado por depósitos de material aluvial (aluvión) y coluvial del cuaternario, el cual se formó debido a la erosión de las rocas madres y el subsiguiente transporte (ver figura 9).

Figura 9. Mapa geológico de la ciudad de Monterrey.



FUENTE: Padilla y Sánchez, R. J. (1982). Carta Detenal, hoja Monterrey Muñoz Hedz., Benito (1988). (Modificada según Michalzik, 1988)

GEOLOGÍA

- Abanicos aluviales - Qab
- Aluvión - Qal
- Conglomerados - Cg
- Fm Méndez / Difunta - Km / Di
- Fm San Felipe / Parras - Ksf / Pa
- Fm Agua Nueva / Indidura - Kan / I
- Fm Cuesta del Cura - Kcc

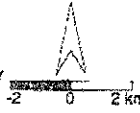
- Fm Tamaulipas Sup. / Aurora - Kts / Au
- Fm La Peña - Klp
- Fm Tamaulipas Inf / Cupido - Kcu / Ti
- Fm Taraises - Kta
- Fm La Casita - Jlc
- Fm Zuñiga - Jz
- Fm Minas Viejas (yesos) - Jmv
- Indeterminada

LEYENDA

- Área urbana
- Carretera
- Ferrocarril
- Río

SÍMBOLOS GEOLÓGICOS

- Anticlinal
- Anticlinal recumbente
- Buzamiento
- Contacto geológico
- Falla de cabalgamiento
- Sinclinal



Esta litología es de gran interés para este estudio debido a que en la literatura se ha reportado que las lutitas (aluminosilicatos) y calizas (carbonato de calcio) , pueden contener cantidades considerables de selenio y arsénico:

- El intervalo de concentraciones de As encontradas en lutitas es de 3.0 – 490.0 mg/kg (Welch, et. al, 1988)
- El intervalo de concentraciones de arsénico en rocas calizas varía de 0.1 a 204 mg/kg (Welch, et. al, 1988)
- El promedio de selenio en lutitas va desde 0.24 mg/kg (lutitas del paleozoico en Japón), hasta 277 mg/L (lutitas del pérmico en Wyoming.)⁴

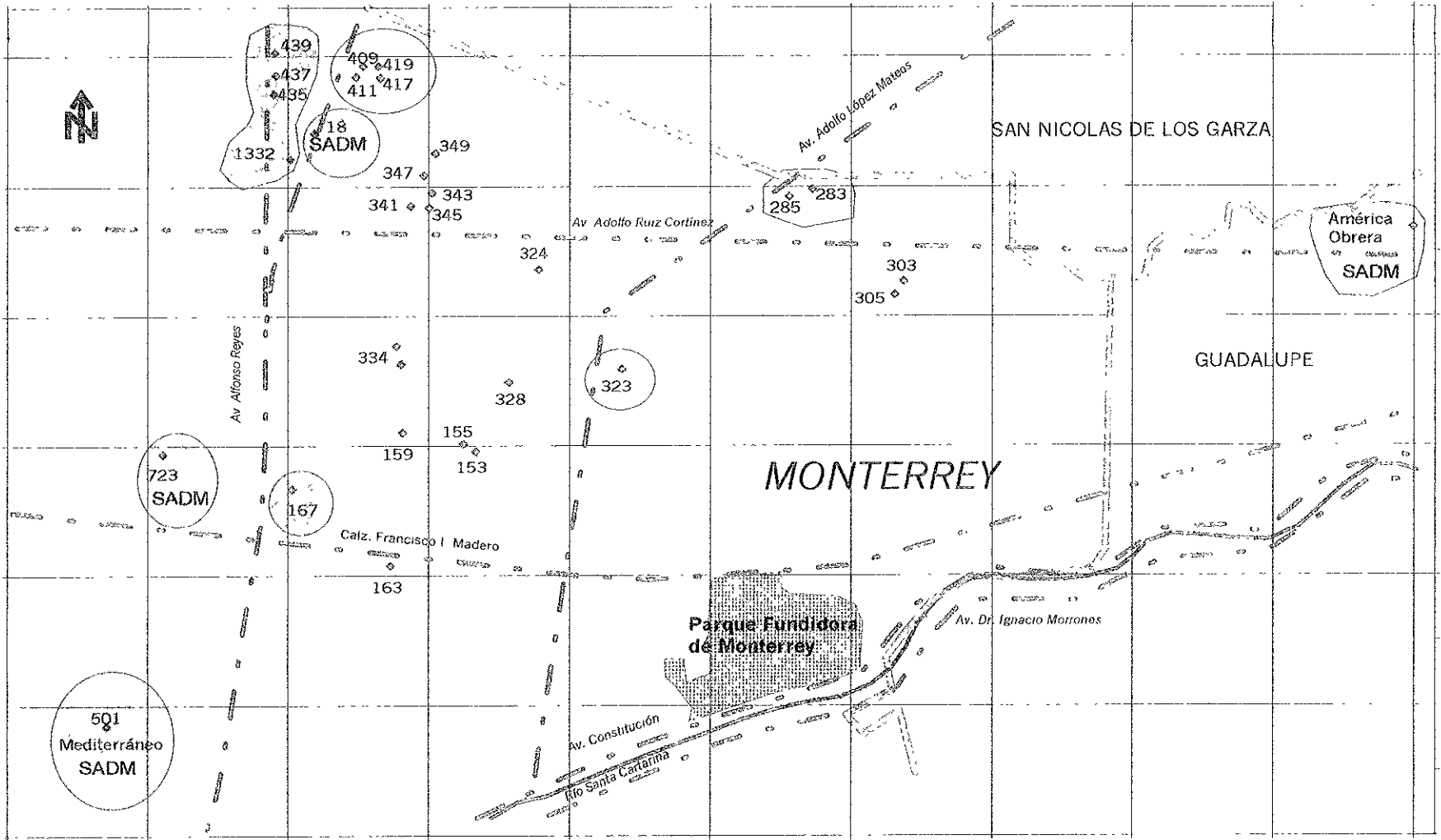
En el área metropolitana de Monterrey existen más de 1800 pozos (CNA, 1997), los cuales se hayan localizados en zonas industriales, de recreación y habitacionales. En este estudio se muestrearon 30 pozos localizados tanto en la zona industrial como en sus alrededores (Figura 10).

La profundidad de los niveles estáticos de las aguas subterráneas oscila entre los 18 y 20 m y la dirección del flujo es de SW a NE (CNA, 1998).

En la región el clima predominante es cálido seco con temperaturas medias anuales de 21.9°C para el periodo registrado de 1986-1990; para este mismo periodo se registra una precipitación promedio de 638.46 mm³/año y una evaporación promedio de 1941.13 mm³/año (Observatorio meteorológico de Monterrey).

⁴ Lakin y Davidson, 1967. Citado en <http://books.nap.edu/books/0309033756/html/10.html>

Figura 10. Ubicación de los 30 pozos en un mapa de la zona metropolitana de Monterrey y su clasificación dependiendo de su uso.



-  Pozos de aguas de servicio
-  Pozos del sistema de agua potable
-  Industria alimenticia
-  Pozos de uso industrial

ESCALA APROXIMADA: 1 : 35 000

2.3 MUESTREO.

Según Keith (Keith, 1992) el objetivo del coleccionar muestras para su análisis es la obtención de una porción pequeña e informativa de la población que está siendo investigada. El problema de muestrear aguas es que son muy heterogéneas, es por esto que es muy difícil obtener muestras realmente representativas.

Para realizar un muestreo adecuado se seleccionaron cuidadosamente los lugares para la toma de muestras, de tal manera que sean las más representativas posibles del área de estudio. Dicha área se seleccionó tomando en cuenta la existencia de agua subterránea de diferentes usos, ubicados en zonas con y sin desarrollo industrial, lo cual permitirá inferir la influencia de la actividad del hombre y la litología en la calidad de las aguas subterráneas. Los pozos a muestrear fueron seleccionados a partir del inventario de pozos realizado por CNA en 1997 (CNA, 1997) en el área metropolitana de la ciudad de Monterrey.

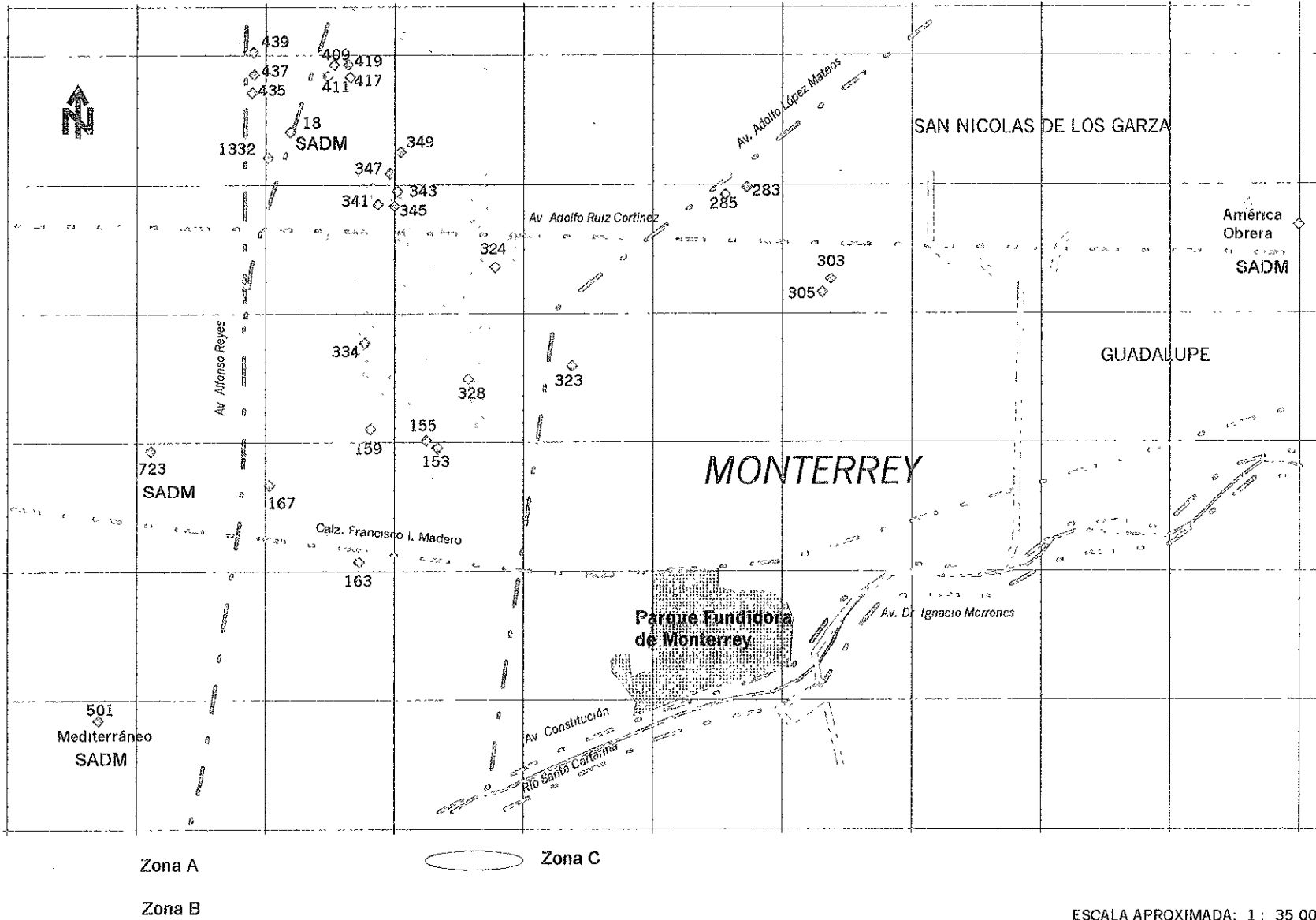
Dentro de los 30 pozos que se seleccionaron se encontró la siguiente distribución:

- 4 pozos del Sistema de Abastecimiento de agua potable de CNA.
- 13 pozos de agua de uso industrial de 6 empresas diferentes.
- 7 pozos de agua de uso industrial alimenticio de 3 empresas diferentes.
- 6 pozos de agua para uso de hoteles, parques y apartamentos (servicios).

Para comprender e interpretar más fácilmente los resultados, se dividió el área de muestreo en 3 zonas principales (ver Figura 11):

- La zona A conformada por pozos de uso industrial.
- La zona B conformada por pozos de uso industrial y alimenticio.
- La zona C que contiene pozos de servicios y de abastecimiento de agua potable.

Figura 11. Ubicación de los pozos por zonas.



ESCALA APROXIMADA: 1 : 35 000

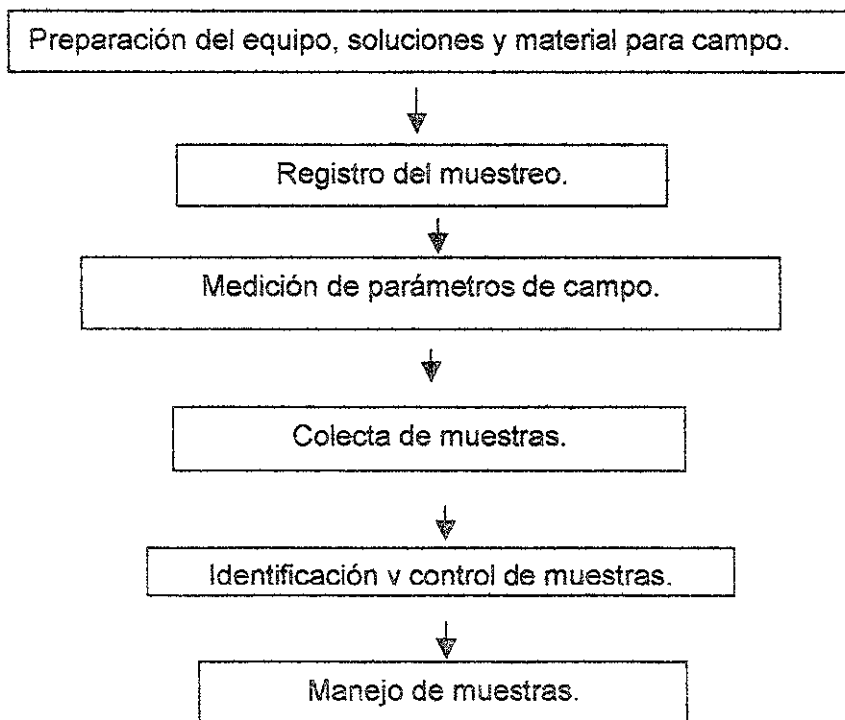
La densidad del muestreo fue determinada por la accesibilidad de los pozos seleccionados.

El purgado de los pozos antes de la recolección de muestra fue imprescindible, ya que así se eliminó el agua estancada que se encontraba dentro de la tubería del pozo.

El volumen de agua por muestra se determinó en función del tipo y número de análisis a realizar con base en la recomendación de la NOM-014-SSA1-1993 (Ver Anexo 1). Los frascos fueron limpiados perfectamente y sumergidos en ácido nítrico al 10% para eliminar la materia orgánica.

Para tener la mayor exactitud posible, el tiempo transcurrido entre la recolección y el análisis fue el mínimo, ya que las concentraciones de las sustancias pueden modificarse entre el muestreo y el análisis como consecuencia del recipiente o por procesos químicos, físicos y biológicos dentro de la muestra

DIAGRAMA DE FLUJO SEGUIDO PARA EL MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.



MÉTODO DE MUESTREO DE AGUAS⁵.

Equipo

Bomba de agua de flujo pequeño

Conductímetro marca Conductronic modelo CL8

Potenciómetro portátil marca Hach modelo EC10

Reactivos

Ácido nítrico (HNO₃) concentrado, pureza 64.9%, densidad 1.397 g/mL (25°C)

Agua bidestilada y desionizada (nanopura)⁶

Detergente libre de fosfatos

Material

Cinta métrica

Cubeta de plástico

Envases de plástico inertes al agua de 1 L y de 500 con tapas del mismo material

Filtro Millipore 45 µm

Goteros

Geles para hielera

Hieleras

Jeringas de plástico con adaptador para filtro

Probeta de 1 litro

Sonda eléctrica graduada cada metro

Termómetro (0-100°C)

⁵ Metodología proveniente de CNA, 1999 y la Norma Oficial Mexicana NOM-010-SSA1-1993.

⁶ Toda el agua referida en este trabajo como bidestilada y desionizada (nanopura) corresponde al tipo I especificado en : ASTM. Specification for reagent water. Anual Book of ASTM Standars, Vol 11.01 con la clave D1193.

Preparación de soluciones

◦ *Solución de ácido nítrico (10%)*

En la cubeta de plástico, perfectamente limpia, se colocaron 10 L de agua de la llave. Utilizando la probeta, se vació lentamente 2 L de ácido nítrico concentrado en la cubeta, se agregó otros 8 L de agua y se mezcló perfectamente.

Actividades previas al muestreo

1. *Revisión del equipo.* Se revisó el funcionamiento del equipo para los análisis en campo, en este caso el equipo fue el potenciómetro portátil y el conductímetro.
2. *Preparación de envases.* Los envases se lavaron perfectamente con detergente libre de fosfatos y se enjuagaron con agua. Se dejaron en un baño de ácido nítrico (10%) durante 24 horas y se enjuagaron con agua nanopura mínimo 3 veces. Se dejaron secar y se guardaron en cajas de cartón.

Registro del muestreo

1. *Localización y determinación de coordenadas del sitio de muestreo.*

Se llevó un mapa de localización de los sitios a muestrear y se asignó una clave a cada pozo.

2. *Medición del nivel del agua.*

Esta medición se realizó en los pozos donde había la posibilidad de colocar la sonda eléctrica. En cada caso se midió el nivel estático y el dinámico. El dinámico se midió después de 5 minutos de echar a andar la bomba. La medida se tomó a partir del borde interior del ademe hasta el contacto con el agua subterránea.

3. *Purgado del sitio de muestreo.*

El purgado consiste en extraer el agua que ha estado durante algún tiempo en contacto con el entorno del pozo y que, debido principalmente a la interacción química con los materiales constructivos del ademe, su calidad no es ya representativa del acuífero. Para purgar los pozos se dejó correr el agua aproximadamente 10 minutos para asegurarnos que el agua que contenían las tuberías había sido vaciada totalmente.

Medición de parámetros de campo

En campo se realizó la medición de la temperatura, la conductividad eléctrica y el pH (ver metodología en el Anexo 2). Estos datos se tomaron después del purgado del pozo.

Colecta de muestras

- 1) Se tomó un poco del agua que se iba a analizar, se cerró el envase y se agitó fuertemente para enjuagar.
- 2) Se desechó esa agua y se repitió la operación tres veces.
- 3) Se llenó el envase con la muestra, cuidando que no quedaran burbujas de aire dentro del frasco.
- 4) Se filtró la mitad del agua contenida en el envase de 1 L con la jeringa que contiene el filtro Milipore (45µm) y se transfirió dicha agua al envase de 500 mL.
- 5) Se agregaron 20 gotas (aproximadamente 1 mL) de ácido nítrico concentrado al envase de 0.5 L, se tapó, cuidando que no quedaran burbujas de aire en el interior del envase y se etiquetó.
- 6) Se eliminó el agua contenida en el envase de 1 L y se llenó nuevamente cuidando que no quedaran burbujas de aire en el interior.

Identificación y control de muestras

Para la identificación de las muestras se etiquetaron los frascos y envases con la siguiente información:

Código de la muestra

Fecha y hora del muestreo

Nombre del técnico responsable

Identificación del sitio de muestreo

Temperatura ambiente y temperatura del agua

pH

Conductividad eléctrica

Tipo de análisis a efectuar

Técnica de preservación empleada

Observaciones

Manejo y transporte de muestras

Las muestras tomadas se colocaron en la hielera con los geles previamente congelados. La temperatura se encontraba entre los 4°-10°C. Se transportaron en cajas de cartón, en posición vertical, evitando al máximo su agitación.

El análisis se realizó antes de que transcurrieran 7 días, el cual es la mitad del tiempo máximo de almacenamiento permitido según la NOM-010-SSA1-1993.

2.4 Análisis de las muestras.

Una vez que la muestra fue tomada, conservada y transportada al laboratorio, el análisis deberá ser realizado con base en procedimientos ya establecidos y probados. La metodología para la determinación de la concentración de los contaminantes fue seguida con el mayor cuidado posible, ya que, los errores más frecuentes en los estudios de aguas se llevan a cabo durante el análisis de los mismos. Para cerciorarnos de esto, se siguió un estricto control de calidad, ya que es una parte fundamental de todo programa de análisis, en especial porque los resultados se van a comparar con las normas vigentes. Existen otros métodos para cuantificar arsénico y selenio, sus fundamentos, ventajas y desventajas se encuentran resumidos en el Anexo 1 (ver cuadro A.1).

Por razones de tiempo, se instaló un laboratorio provisional cerca del lugar de muestreo. En este lugar se desarrollará el método para determinar bicarbonatos y nitratos solubles, ya que su concentración varía en cuestión de horas.

Los métodos de análisis se escogieron en función del límite de detección y cuantificación deseado, de su reproducibilidad, de la disponibilidad de equipo, del costo del material empleado y de las posibles interferencias que podría presentar durante su desarrollo.

2.4.1 Determinación de los iones mayores, pH y conductividad eléctrica del agua.

La metodología utilizada para cuantificar a los iones mayores (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , Mg^{2+} , PO_4^{3-} , NO_3^-) el pH y la conductividad eléctrica se encuentra en el Apéndice 2.

2.4.2 Determinación de elementos trazas.

Determinación de arsénico⁷.

EQUIPO

Espectrómetro de Absorción Atómica Marca Varian, Modelo SpectrAA 110.

Lámpara de cátodo hueco de arsénico codificada.

Computadora marca Dell con el programa SpectrAA.

Generador de hidruros de flujo continuo (Varian VGA 77).

- Bomba peristáltica, capilares de transferencia y conectores, espiral de reacción, separador gas/líquido, celda de absorción de cuarzo

Campana extractora de gases

Parrilla de calentamiento

MATERIAL

Agitador de vidrio

Espátula

Matraces volumétricos de 10, 25, 50 y 100 mL

Pipetas volumétricas de 1, 2, 5 y 10 mL

Pipetas automáticas (100-1000 μ L, 0.5-5 mL, 2-10 mL)

Piseta

Plumón marcador para vidrio

Probeta de 250 mL

Puntas para pipetas automáticas

Recipientes de polietileno con tapa

Vasos de precipitados de 250 mL

Vaso de precipitados de 1000 mL

REACTIVOS

Acetileno y nitrógeno grado absorción atómica con reguladores apropiados.

Agua bidestilada y desionizada (nanopura)

Agua destilada

Aire comprimido y filtrado.

Ácido clorhídrico (HCl) concentrado (pureza 37%) marca J.T. Baker

Ácido nítrico (HNO₃) concentrado, pureza 64.9%, densidad 1.397 g/mL (25°C), marca J.T Baker

Borohidruro de sodio (NaBH₄), grado analítico

Clorhidrato de hidroxilamina (NH₂OH.HCl), grado analítico

Estándar acuoso certificado comercial de arsénico (1000 mg/L), marca Accutrace Reference Standard AA03N-5.

Estándar acuoso certificado DMR-8e, CENAM, (187.68 ±6.65 µg As/L)

Hidróxido de sodio (NaOH), grado analítico

Yoduro de potasio (KI), grado analítico

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES

◦ *Solución de HCl al 50% (v/v)*

Se tomó, con una probeta graduada, 250 mL de ácido clorhídrico concentrado y se vertieron lentamente en un vaso de precipitados que contenía 250 mL de agua bidestilada y desionizada.

◦ *Solución de KI (20% p/v)*

Se pesaron aproximadamente 20 g de KI, se colocaron en un vaso de precipitados con 50 mL de agua, y se agitó. Se vació el contenido del vaso en un matraz aforado de 100 mL y se llenó hasta la marca con agua nanopura.

⁷ Moffett J. (1988) The determination of arsenic in non-silicate geological ore samples using a vapor generation accessory. Australia, A.A. Instruments at work, No. 78, 4 pp.

- *Solución de $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ (20% p/v)*

Se pesaron aproximadamente 20 g de $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ que fueron colocados en un vaso de precipitados con 50 mL de agua y se agitó hasta disolución. Se vació el contenido del vaso en un matraz aforado de 100 mL y se llenó hasta la marca con agua bidestilada y desionizada.

- *Solución de NaBH_4 (0.6%) en NaOH al 0.5%*

En un matraz volumétrico de 100 mL con aproximadamente 10 mL de agua bidestilada y desionizada, se disolvieron aproximadamente 0.5 g de NaOH ; se pesaron aproximadamente 0.6 g de NaBH_4 y se disolvieron en la solución preparada de NaOH ; se llenó hasta la marca con agua bidestilada y desionizada

- *Solución de HNO_3 0.2%*

En un matraz aforado de 1000 mL se vació aproximadamente 200 mL de agua bidestilada y desionizada. Se agregó lentamente 2 mL de ácido nítrico concentrado y se llenó con agua bidestilada y desionizada hasta el aforo.

- *Solución madre de Arsénico*

Se utilizó el estándar acuoso certificado comercial de arsénico (1000 mg/L), marca Accutrace Reference Standard AA03N-5.

- *Solución intermedia de As (10 mg/L)*

Se colocó 1 mL de la solución madre de As en un matraz volumétrico de 100 mL y se llenó hasta la marca con HNO_3 al 0.15%.

- *Soluciones estándares de As (1 mg/L)*

Se colocaron 5 mL de la solución estándar intermedia de As en un matraz volumétrico de 50 mL y se llenó hasta la marca con HNO_3 0.2%.

- *Solución para verificación de la calibración*

Se utilizó el estándar certificado DMR-8e (CENAM) $187.68 \pm 6.65 \mu\text{g As/L}$. Se tomó 1 mL de dicho estándar y se llenó a un volumen final de 25 mL con HNO_3 0.2% (concentración final aproximada = $7.5 \mu\text{g/L}$)

▫ *Preparación de la muestra control de laboratorio*

En un matraz aforado de 25 mL se colocó 20 mL de HNO₃ 0.2%. Se agregó 0.2 mL de la solución estándar de 1 mg/L y se llevó hasta la marca con la solución 0.2% de HNO₃. Se le realizó el mismo pretratamiento y análisis que al resto de las muestras.

PROCEDIMIENTO

Pretratamiento de muestras y estándares

1. Se tomó una alícuota de 20 mL de muestra y se vertió en un matraz volumétrico de 50 mL (todas las muestras se hicieron por duplicado).

NOTA: Si los niveles de concentración de As eran mayores al intervalo de trabajo, se realizó una dilución mayor de la muestra original con HNO₃ 0.2%, dicho factor de dilución fue considerado en los cálculos de la concentración final.

2. Para la curva de calibración se realizaron los cálculos para preparar 25 mL de los estándares de 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 y 15.0 µg/L a partir de la solución de 1 mg/L de As, y se llenaron el aforo con HNO₃ 0.2%. Se vaciaron 20 mL de cada estándar a matraces volumétricos de 50 mL y se les adicionó la misma cantidad de HCl concentrado, clorhidrato de hidroxilamina y yoduro de potasio que se menciona en el paso 4. Se llenaron hasta el aforo con agua nanopura.
3. **Muestras adicionadas:** A la alícuota de 20 mL de muestra se le adicionó 0.4 mL de un estándar de 1 mg/L a cada una de las muestras marcadas como adicionadas y se siguió con el paso 4.
4. Se adicionó 4 mL de HCl concentrado, 5 mL de NH₂OH.HCl (20%) y 2.5 mL de KI (20%) y se llevó al aforo de 50 mL con agua nanopura.
5. **Estándar para la verificación de la curva de trabajo.** Se tomó 1.35 mL del estándar certificado DMR-8e (187.68 ±6.65 µg As/L), el cual se colocó en un matraz aforado de 10 mL que se llenó hasta el aforo con HNO₃ 0.2%. Dicha solución se vació, entonces, en un matraz aforado de 25 mL, y se adicionó 2 mL de HCl concentrado, 2.5 mL de NH₂OH.HCl y 1.25 mL de KI (20%). La concentración final fue de 10.1 µg/L.

Establecimiento de las condiciones del EAA.

- Longitud de onda: 193.7 nm;
- Ancho de ventana: 0.5 nm.
- Corrector de fondo: Lámpara de deuterio.
- Tiempo de retardo: 40 seg.
- Número de lecturas por solución: 3.
- Calentar la lámpara 30 minutos antes de operar el equipo.

Acondicionamiento del generador de hidruros:

- Canal ácido: HCl (50%)
- Canal reductor: NaBH_4 (0.6%) y NaOH (0.5%)
- Flujo de los canales ácido y reductor: 1 mL/min
- Flujo del canal de la muestra: 7 mL/min
- Gas de arrastre: Nitrógeno
- Calentar la celda de absorción durante 10 min. antes de iniciar las determinaciones.

Lectura de arsénico por espectrofotometría de absorción atómica (EAA)-generador de hidruros.

- 1) Se introdujo el capilar de toma de muestra del generador de hidruros en la solución a cuantificar.
- 2) Se tomaron 3 lecturas de dicha solución.
- 3) Se limpió la punta del capilar con papel absorbente.
- 4) Se introdujo el capilar de toma de muestra en agua destilada durante unos 30 segundos, y se secó la punta.
- 5) Se anotaron los resultados en la bitácora correspondiente.

NOTA: La pendiente de la curva se verificó cada cinco muestras con el estándar para la verificación de la curva de trabajo. Se realizó duplicado de todas las muestras.

CÁLCULOS

Los valores de la concentración de As se tomaron directamente del equipo ya que tiene un programa que da la concentración a partir de la interpolación de la curva de calibración. Se aplicó el factor de dilución para el cálculo de la concentración final en mg/L.

$$\text{mg As /L} = C * F$$

Donde:

C = concentración en mg/L

F = factor de dilución (F = 20 mL / mL de alícuota)

Determinación de selenio⁸.

EQUIPO

Espectrómetro de Absorción Atómica Marca Varian, Modelo SpectrAA 110.

Lámpara de cátodo hueco de selenio codificada.

Programa SpectrAA.

Generador de hidruros de flujo continuo (Varian VGA 77).

- Bomba peristáltica, capilares de transferencia y conectores, espiral de reacción, separador gas/líquido, celda de absorción de cuarzo
- Flujo del gas acarreador: 100 mL/min.

Aire comprimido y filtrado.

Acetileno y nitrógeno grado absorción atómica con reguladores apropiados.

Computadora con monitor

Campana extractora de gases

Parrilla de calentamiento

MATERIAL

Matraces volumétricos de 100 mL

Pipetas volumétricas de 1, 2, 5 y 10 mL

Pipetas automáticas (100-1000 μ L, 0.5-5 mL, 2-10 mL)

Piseta

Plumón marcador para vidrio

Puntas para pipetas automáticas

⁸ Standard Methods for the Examination of Water of Wastewater. (1993) Seventeenth Edition. APHA. AWWA. WPCF.

Recipientes de polietileno con tapa

Tubos de ensayo

Vasos de precipitado

REACTIVOS

Agua bidestilada y desionizada (nanopura)

Ácido clorhídrico (HCl) concentrado (37%) marca J.T. Baker

Ácido nítrico (HNO₃) concentrado, pureza 64.9%, densidad 1.397 g/mL (25°C), marca J.T Baker

Estándar acuoso certificado comercial de selenio (1000 mg/L), marca Accutrace Reference Standard AA51N-1.

Sulfanilamida, grado analítico

Borohidruro de sodio (NaBH₄), grado analítico

Hidróxido de sodio (NaOH), grado analítico

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES

- *Solución de sulfanilamida (2.5% p/v)*

Se disolvió aproximadamente 2.5 g de sulfanilamida en agua nanopura, adicionando algunas gotas de HCl concentrado para facilitar la disolución. Se aforó a 100 mL con agua nanopura.

- *Solución reductora para el generador de hidruros*

En un matraz volumétrico de 100 mL con aproximadamente 10 mL de agua nanopura, se disolvió 0.5 g de NaOH. Se pesó 0.6 g de NaBH₄ y se disolvió en la solución preparada de NaOH; llenando hasta la marca con agua nanopura

- *Solución de HNO₃ 0.2%*

En un matraz aforado de 1000 mL se vació aproximadamente 200 mL de agua bidestilada y desionizada. Se agregó lentamente 2 mL de ácido nítrico concentrado y se llenó con agua bidestilada y desionizada hasta el aforo.

◦ *Solución madre de selenio*

Se utilizó el estándar acuoso certificado comercial de selenio (1000 mg/L), marca Accutrace Reference Standard AA51N-1.

◦ *Solución intermedia de Se (10 mg/L)*

Se tomó con una pipeta automática 1 mL de la solución madre de Se y se vació en un matraz volumétrico de 100 mL y se llevó a la marca con HNO₃ 0.2%.

◦ *Solución estándar de Se (1 mg/L)*

Se colocaron 5 mL de la solución estándar intermedia de Se en un matraz volumétrico de 50 mL y se llenó hasta la marca con HNO₃ 0.2%.

◦ *Solución estándar de Se para la verificación de la curva de trabajo (10 µg/L)*

Se tomaron 250 µL de la solución estándar de Se de 1 mg/L y se colocó en un matraz aforado de 25 mL y se llenó con HNO₃ 2%.

▪ *Preparación de las muestras adicionadas*

Se adicionaron 0.2 mL del estándar de 1 mg/L a 10 mL de las muestras correspondientes y se les hizo el pretratamiento a partir del punto 2.

PROCEDIMIENTO

Pretratamiento de muestras y estándares

1. Se tomó una alícuota de 10 mL de muestra, la cual fue vertida en un tubo de ensayo (todas las muestras se hicieron por duplicado).
2. Se adicionaron 10 mL de HCl concentrado (37%) y 0.2 mL de sulfanilamida (2.5%).
3. A partir de la solución estándar de Se de 1 mg/L (mg/L) se prepararon los estándares para la curva de calibración llenándolos hasta el aforo de 10 mL con HNO₃ 0.2%. Se les adicionó 10 mL de HCl concentrado y 0.2 mL de sulfanilamida (2.5%) de tal manera que la concentración final fuera de 3, 5, 10, 15 y 20 µg/L.
4. Se calentaron las muestras en el baño de agua (85°C) durante 30 minutos y se dejaron enfriar.

NOTA: Cuando los niveles de concentración de Se de algunas muestras se encontraron por encima del intervalo de trabajo, se colocó una alícuota menor de las muestras problema en matraces aforados de 10 mL llenando hasta la marca con HNO_3 0.2%. El contenido del matraz se vació en un tubo de ensayo y se continuó con los puntos 2 y 4. En estos casos se anotó en la bitácora el factor de dilución para realizar los cálculos de la concentración final.

Preparación del equipo

Establecimiento de las condiciones del EAA.

- Longitud de onda: 196.0 nm;
- Ancho de ventana: 1.0 nm.
- Corrector de fondo: Lámpara de deuterio.
- Tiempo de retardo: 40 seg.
- Número de lecturas por solución: 3.
- Se calentó la lámpara 30 minutos antes de operar el equipo.

Acondicionamiento del generador de hidruros:

- Canal ácido: HCl (50%)
- Canal reductor: NaBH_4 (0.6%) y NaOH (0.5%)
- Flujo de los canales ácido y reductor: 1 mL/min
- Flujo del canal de la muestra: 7 mL/min
- Gas de arrastre: Nitrógeno
- Calentar la celda de absorción durante 10 min. antes de iniciar las determinaciones.

Lectura de selenio por espectrofotometría de absorción atómica (EAA)-generador de hidruros

- 1) Se introdujo el capilar de toma de muestra del generador de hidruros en la solución.
- 2) Se tomaron 3 lecturas de la solución.
- 3) Se limpió la punta del capilar con papel absorbente.
- 4) Se introdujo el capilar de toma de muestra en agua destilada durante unos 30 segundos, y se secó la punta.
- 5) Las determinaciones fueron realizadas por duplicado.
- 6) Se anotaron los resultados en la bitácora correspondiente.

NOTA: La pendiente de la curva se verificó cada cinco muestras con la solución estándar para la verificación de la curva de calibración

CÁLCULOS

Los valores de la concentración de selenio se tomaron a partir de la interpolación que realiza el equipo en la curva de calibración para dar la concentración de cada una de las muestras (C). Se aplicó el factor de dilución para el cálculo de la concentración final en mg/L.

$$\text{mg Se /L} = C * F$$

Donde:

C = concentración en mg/L

F = factor de dilución (20.2 mL/ mL de alícuota)

2.4.3 Control de calidad de los métodos analíticos⁹.

Quantificación de As y Se

1. Todos los datos de control de calidad se conservaron para una fácil referencia e inspección en las bitácoras correspondientes.
2. Por cada lote de muestras procesadas (20 muestras), se incluyó un blanco. El blanco del método se define como la matriz libre del analito a cuantificar, preparado y tratado de la misma manera que el resto de las muestras. El blanco es utilizado para detectar contaminación que pueda ocurrir durante el proceso analítico (EPA, 1998). El blanco del método se preparó usando un volumen de agua tipo I (bidestilada y desionizada) igual al volumen especificado en el método de preparación y luego se llevó a través de los pasos apropiados del proceso analítico de acuerdo a lo establecido en la descripción experimental. El blanco fue aceptable si su valor era menor que el límite de detección

⁹ Environmental Protection Agency (1998) Test methods for evaluating solid waste physical-chemical methods. U.S.A, CD-ROM, versión 1.0, 3ª edición, Capítulo 7, pag. 1-19.

del método (LDM) ($L.D.M_{As} = 1 \mu\text{g/L}$ y $L.D.M_{Se} = 1 \mu\text{g/L}$). Si el blanco del método no era aceptable entonces se volvía a correr otro blanco y si aún es inaceptable, entonces, todas las muestras después del último blanco del método aceptable eran preparadas nuevamente y reanalizadas.

3. Por cada lote de muestras procesadas, se incluyó una muestra control del laboratorio la cual contenía el analito correspondiente y se preparó de la misma manera que las muestras. El límite de aceptación establecido fue de ± 10 del valor adicionado. Si la muestra control del laboratorio no era aceptable, la muestra se corría una vez más, si aún así era inaceptable, entonces, todas las muestras después de la última muestra de control del laboratorio aceptable eran preparadas nuevamente y reanalizadas.
4. Muestra adicionada y su duplicado (MS/MSDs): Por cada lote de 20 muestras se adicionó una cantidad conocida del analito correspondiente, a una muestra y se realizó su duplicado. El límite establecido de aceptación fue de $\pm 20\%$ del valor adicionado (porcentaje de recuperación que es igual a:

$$100 * (\text{valor medido de la muestra adicionada} - \text{valor medido de la muestra no adicionada}) / \text{valor conocido de lo adicionado a la muestra adicionada}$$

Debido a que la recuperación no fue menor al 85% o mayor al 115%, no se utilizó el método de adiciones estándar en todas las muestras del lote.

Para evaluar la precisión (entre duplicados) se calculó la diferencia porcentual relativa (RPD) con la fórmula:

$$RPD = 100 * ((x_1 - x_2) / ((x_1 + x_2) / 2)).$$

El valor de aceptación fue de $\pm 10\%$.

Cuantificación de iones mayores.

La exactitud de los análisis de los iones mayores se determinó utilizando una combinación de los criterios siguientes:

- Condición de electroneutralidad (balance de cargas).

Donde el error en el balance de cargas se calculó utilizando la siguiente expresión (CNA,1999):

$$\left[E = \frac{\Sigma \text{ cationes} - \Sigma \text{ aniones}}{\Sigma \text{ cationes} + \Sigma \text{ aniones}} \right] * 100$$

E corresponde al porcentaje de error en el balance de cargas y las unidades de los aniones y de los cationes son meq/L. El error máximo que se permitió fue de 10% (CNA, 1999) por ser agua con alta concentración de sales.

- Relación entre la suma de aniones (o cationes) y la conductividad eléctrica.

Donde a partir de la conductividad eléctrica se estimó la suma de aniones y cationes, en meq/L, mediante la siguiente relación (Appelo, 1993):

$$\Sigma \text{ cationes} = \Sigma \text{ aniones} = CE/100$$

CE corresponde a la conductividad eléctrica de la muestra de agua en $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los aniones y los cationes están en meq/L. El error máximo que se permitió fue de 10% (CNA, 1999).

El balance de cargas se encuentra en el Apéndice 2.

Para precisión (entre duplicados) el valor de aceptación fue de $\pm 10\%$ de la diferencia porcentual relativa (RPD) calculado con la fórmula:

$$RPD = 100 * ((x1-x2)/((x1+x2)/2)).$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 RESULTADOS

3.1.1 pH y conductividad eléctrica

Se determinó el pH y la conductividad eléctrica de 30 muestras en las tres diferentes zonas A, B y C mencionadas en la sección 2.3. Los valores de pH y conductividad eléctrica (C.E.) se reportan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y pH de las aguas subterráneas a 25°C.

| pozo | uso del agua | Zona* | pH | C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$ |
|------------|------------------|-------|------|------------------------------|
| 18 | agua potable | C | 6.31 | 915 |
| 723 | agua potable | C | 6.91 | 1114 |
| AM. OBRERA | agua potable | C | 6.62 | 1473 |
| 501 | agua potable | C | 6.87 | 806 |
| 153 | industrial | A | 6.63 | 1382 |
| 155 | industrial | A | 6.75 | 1625 |
| 159 | industrial | A | 6.83 | 1054 |
| 303 | industrial | B | 7.58 | 1267 |
| 305 | industrial | B | 7.52 | 1238 |
| 324 | industrial | A | 6.77 | 1215 |
| 328 | industrial | A | 7.01 | 1316 |
| 334 | industrial | A | 7.2 | 1384 |
| 341 | industrial | A | 7.08 | 1676 |
| 343 | industrial | A | 6.65 | 1304 |
| 345 | industrial | A | 6.61 | 2030 |
| 347 | industrial | A | 6.58 | 923 |
| 349 | industrial | A | 6.79 | 1008 |
| 283 | Ind. alimentaria | B | 6.42 | 1258 |
| 285 | Ind. alimentaria | B | 6.59 | 1217 |
| 323 | Ind. alimentaria | B | 6.91 | 1220 |
| 409 | Ind. alimentaria | C | 7.11 | 1066 |
| 411 | Ind. alimentaria | C | 7.03 | 1068 |
| 417 | Ind. alimentaria | C | 7.3 | 1199 |
| 419 | Ind. alimentaria | C | 6.72 | 1087 |
| 163 | servicios | C | 6.93 | 975 |
| 167 | servicios | C | 6.86 | 1215 |
| 435 | servicios | C | 6.45 | 1133 |
| 437 | servicios | C | 6.95 | 1077 |
| 439 | servicios | C | 7.22 | 1017 |
| 1332 | servicios | C | 6.76 | 1027 |

* Las zonas se mencionan en la sección 2.3 (Figura 11)

3.1.2 Iones mayores

Se cuantificó los siguientes iones mayores en las diferentes muestras de agua: bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, sodio, potasio, calcio y magnesio (ver cuadro 6).

Cuadro 6. Iones mayores encontrados en muestras de agua subterránea.

| pozo | uso del agua | HCO ₃ ⁻ _{ac} mg/L | Cl ⁻ _{ac} mg/L | SO ₄ ²⁻ _{ac} mg/L | NO ₃ ⁻ _{ac} mg/L | Na ⁺ _{ac} mg/L | K ⁺ _{ac} mg/L | Ca ²⁺ _{ac} mg/L | Mg ²⁺ _{ac} mg/L |
|------------|------------------|---|---------------------------------------|---|--|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| 18 | agua potable | 411.85 | 46.16 | 95.55 | 42.5 | 24 | 1.7 | 130.85 | 22 |
| 723 | agua potable | 349.92 | 75.19 | 135.05 | 82.8 | 31 | 1.3 | 141.16 | 26.6 |
| AM. OBRERA | agua potable | 371.59 | 130.78 | 292.35 | 49.37 | 49 | 1.4 | 220.79 | 33.6 |
| 501 | agua potable | 340.63 | 31.02 | 66.15 | 29.67 | 25 | 1 | 97.66 | 19 |
| 153 | industrial | 348.37 | 55.34 | 236.8 | 59.3 | 56 | 3.3 | 220.43 | 21 |
| 155 | industrial | 373.14 | 102.61 | 283.3 | 58.7 | 81 | 2.3 | 191.37 | 26.05 |
| 159 | industrial | 359.21 | 70.47 | 105.75 | 34.3 | 22 | 1 | 171.35 | 20.9 |
| 303 | industrial | 383.98 | 67 | 373.25 | N.R | 66 | 2.4 | 167.41 | 35.96 |
| 305 | industrial | 319.57 | 74.2 | 205.65 | N.R | 27 | 1.3 | 177.13 | 30.9 |
| 324 | industrial | 377.79 | 91.57 | 174.6 | 46.94 | 67 | 2.4 | 147.59 | 28.5 |
| 328 | industrial | 368.5 | 64.25 | 177.05 | 97.42 | 30 | 1.1 | 174.92 | 27.38 |
| 334 | industrial | 306.57 | 121.59 | 191 | 51.36 | 43 | 1 | 176.74 | 29.3 |
| 341 | industrial | 410.3 | 134.25 | 375.8 | 51.81 | 140 | 1.6 | 168.41 | 30.5 |
| 343 | industrial | 433.53 | 112.91 | 180.1 | 32.55 | 155 | 0.8 | 112.73 | 23.7 |
| 345 | industrial | 396.37 | 151.32 | 324.15 | 65.75 | 126 | 1.5 | 190.31 | 36.8 |
| 347 | industrial | 362.3 | 54.34 | 106.65 | 40.52 | 30 | 1.6 | 129.82 | 26.64 |
| 349 | industrial | 373.14 | 62.91 | 126.05 | 30.55 | 51 | 1.3 | 135.92 | 29.05 |
| 283 | Ind. alimentaria | 328.24 | 91.07 | 233.85 | 77.05 | 26 | 0.6 | 195.38 | 33.11 |
| 285 | Ind. alimentaria | 334.43 | 77.55 | 221 | 83.69 | 19 | 0.3 | 178.36 | 29.66 |
| 323 | Ind. alimentaria | 318.95 | 57.57 | 160 | 94.54 | 29 | 3.1 | 154.42 | 25.5 |
| 409 | Ind. alimentaria | 346.82 | 59.8 | 96.3 | 28.56 | 21 | 1 | 173.39 | 24.6 |
| 411 | Ind. alimentaria | 359.21 | 86.6 | 71.1 | 22.8 | 20 | 1 | 128.56 | 25.7 |
| 417 | Ind. alimentaria | 354.56 | 80.9 | 76.4 | 24.8 | 48 | 1.1 | 163.52 | 23.4 |
| 419 | Ind. alimentaria | 331.34 | 64.52 | 127.75 | 23.25 | 31 | 1 | 153.71 | 25.4 |
| 167 | servicios | 334.43 | 70.47 | 136 | 74.39 | 17 | 0.9 | 157.28 | 29 |
| 435 | servicios | 383.98 | 60.55 | 113.2 | 44.94 | 27 | 2 | 140.61 | 25.71 |
| 437 | servicios | 263.21 | 100.00 | 123.75 | 5.98 | 62 | 1.6 | 104.62 | 16.60 |
| 439 | servicios | 383.98 | 42.43 | 77.15 | 34.1 | 24 | 1.1 | 123.23 | 24.4 |
| 1332 | servicios | 343.72 | 50.87 | 92.05 | 51.36 | 25 | 2 | 125.14 | 25.5 |

3.1.3 Arsénico y selenio

Se realizó la cuantificación de arsénico y selenio (elementos de frontera), en las muestras de agua del área metropolitana de Monterrey. En el cuadro 7 se presenta la profundidad de los pozos y las concentraciones de As y Se.

Cuadro 7. Resultados del contenido de As y Se en las aguas subterráneas muestreadas en el área metropolitana de Monterrey (R.P.D = diferencia porcentual relativa).

| pozo | uso del agua | prof. m | T(°C) | Se mg/L | R.P.D % | As mg/L | R.P.D % |
|------------|------------------|---------|--------|--------------|---------|--------------|---------|
| 18 | agua potable | 47.8 | 26 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 723 | agua potable | 80 | 28 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| AM. OBRERA | agua potable | | 26 | 0.017 | 0.2 | <0.0025 | N.D |
| 501 | agua potable | | 24 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 153 | industrial | 26.7 | 26.5 | 0.010 | -2.09 | <0.0025 | N.D |
| 155 | industrial | 26.7 | 27 | 0.014 | 2.96 | <0.0025 | N.D |
| 159 | industrial | 45 | 26 | 0.005 | 6.25 | 0.007 | 0.85 |
| 303 | industrial | 83 | 26 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 305 | industrial | 83 | 27 | 0.004 | 7.56 | <0.0025 | N.D |
| 324 | industrial | 55 | 28 | 0.155 | 6.47 | 0.155 | 1.71 |
| 328 | industrial | 87 | 27 | 0.032 | -0.58 | <0.0025 | N.D |
| 334 | industrial | | 27 | 0.531 | 1.01 | 0.006 | -1.8 |
| 341 | industrial | | 28 | 2.415 | 2.36 | 3.081 | -1.24 |
| 343 | industrial | 102 | 30 | 1.164 | 0.3 | 1.125 | -2.29 |
| 345 | industrial | 46 | 30 | 2.678 | 0.85 | 0.050 | -7.99 |
| 347 | industrial | 100 | 34 | 0.003 | 0.796 | 0.010 | -1.77 |
| 349 | industrial | 90 | 34 | <0.003 | N.D | 0.012 | 4.2 |
| 283 | Ind. alimentaria | 65 | 27 | 0.133 | 2.02 | <0.0025 | 6.83 |
| 285 | Ind. alimentaria | 61 | 25 | 0.080 | 1.3 | <0.001 | N.D |
| 323 | Ind. alimentaria | | 27 | 0.007 | -1.26 | 0.005 | -0.57 |
| 409 | Ind. alimentaria | 47 | 28 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 411 | Ind. alimentaria | 50 | 27.5 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 417 | Ind. alimentaria | 100 | 28 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 419 | Ind. alimentaria | 70.1 | 28 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 163 | servicios | 48 | 28 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 167 | servicios | 70 | 27 | 0.003 | 2.07 | 0.004 | 1.85 |
| 435 | servicios | 50 | 29 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 437 | servicios | 50 | 28 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 439 | servicios | | 28 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |
| 1332 | servicios | 50 | 27 | <0.003 | N.D | <0.0025 | N.D |

Continuación del Cuadro 7

| pozo | uso del agua | prof. m | T (°C) | Se mg/L | R.P.D % | As mg/L | R.P.D % |
|--|--------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 159+ | Muestra adicionada | - | - | .014 | -3.14 | .014 | 2.49 |
| PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN: Se = $(100 \times (0.014 - 0.005)) / 0.01 = 90\%$ As = $(100 \times (0.014 - 0.007)) / 0.008 = 87.5\%$ | | | | | | | |
| 323+ | Muestra adicionada | | | .017 | 2.17 | .012 | -6.45 |
| PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN: Se = $(100 \times (0.017 - 0.007)) / 0.01 = 100\%$ As = $(100 \times (0.012 - 0.005)) / 0.008 = 87.5\%$ | | | | | | | |

N.D = No determinado

La calidad de los resultados se aseguró mediante el uso del plan de control de calidad mencionado en el capítulo 7. La diferencia porcentual relativa, R.P.D, de los resultados de la cuantificación de arsénico y selenio, no fue superior al $\pm 10\%$ (ver cuadro 7). Esto refleja que la precisión se encontró dentro de los parámetros establecidos por la agencia de protección al ambiente de Estados Unidos (EPA, 1998). Así mismo, mediante el uso del blanco del método se evitó las contaminaciones durante el proceso analítico. La muestra para la verificación de la curva de calibración nos permitió obtener un dato exacto. Las muestras adicionadas reportadas en el cuadro 5, mostraron niveles de recuperación superiores al 87.5%, lo cual indica que las interferencias de matriz no fueron significativas.

3.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

3.2.1 Conductividad eléctrica y pH del agua.

El valor promedio del pH es de 6.83 con un valor máximo de 7.58 y mínimo de 6.31 (Cuadro 5), lo que indica que, prácticamente, las aguas profundas son neutras y que las sales que contienen no se hidrolizan y permanecen como cationes, principalmente de calcio y sodio, y aniones derivados de ácidos fuertes (sulfatos, cloruros) y bicarbonatos (Cuadro 6).

A diferencia del pH, en la conductividad eléctrica se observan variaciones notables al comparar los pozos de agua potable con los de la industria y servicio (Cuadro 5). En zonas no

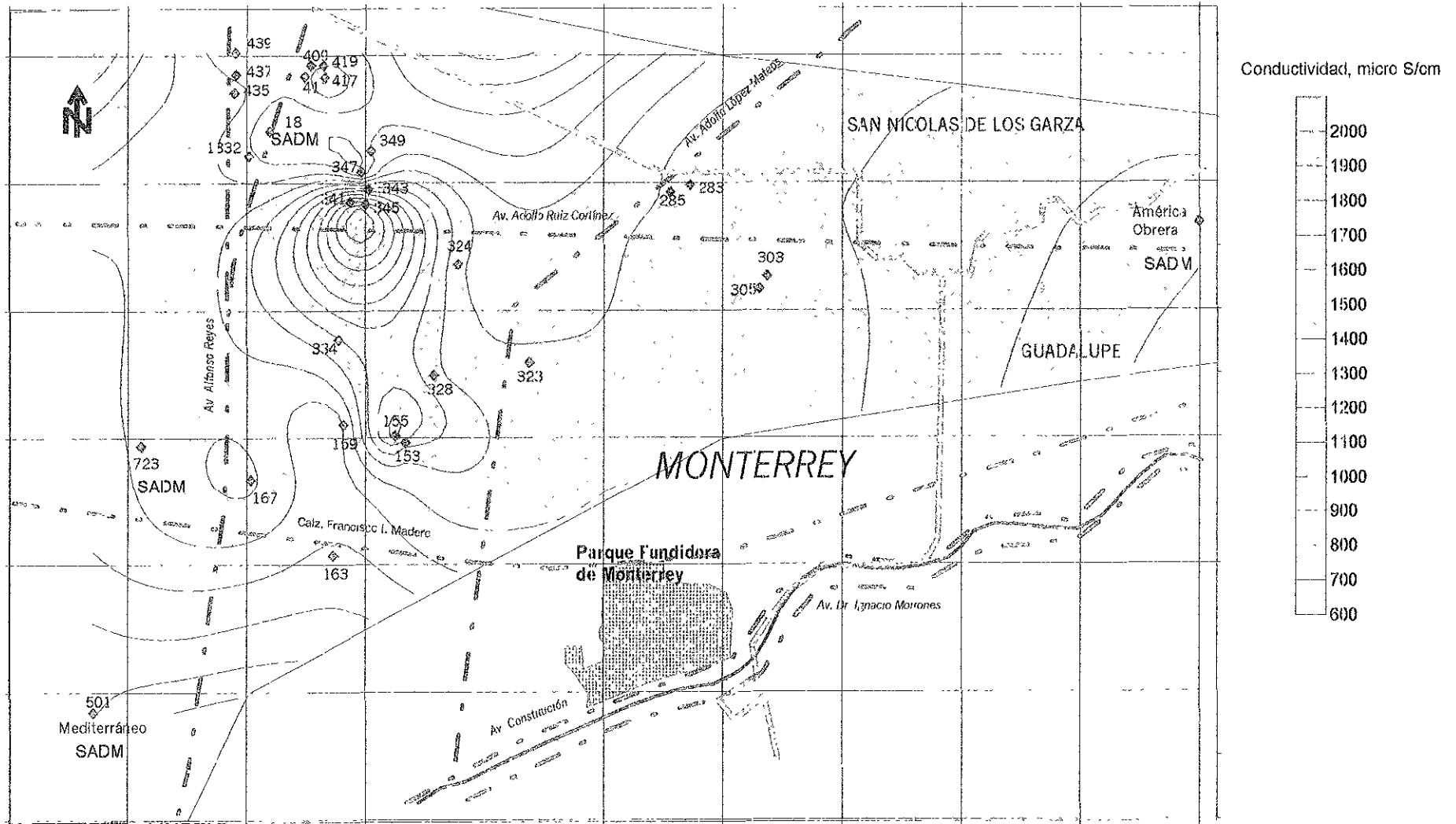
alteradas por la actividad humana, la conductividad eléctrica aumenta con dirección al flujo, ya que el agua va disolviendo los minerales del subsuelo lentamente (Freeze, 1979), sin embargo, en la zona de estudio se observa que en la zona industrial A existe una alta conductividad que disminuye muy lentamente en dirección al flujo (Figura 12), lo que constituye una evidencia de la influencia de los procesos industriales sobre la calidad del agua subterránea.

Es posible que en las plantas industriales se hayan hecho obras que han afectado la capa de arcilla que protege el acuífero de esa zona (comunicación personal con M. en C. Francisco Martín Romero) o se reinyecten drenajes directamente al acuífero.

A partir de los datos de C.E. obtenidos, se construyó un mapa de conductividades eléctricas utilizando como herramienta el programa Surfer versión 7.0 de la compañía Golden Software, el cual permitió trazar un mapa de superficie mediante el uso del interpolador de la mínima curvatura (Fig. 12). Este mapa muestra claramente el comportamiento anómalo, ya que en lugar de aumentar la conductividad en dirección noreste (dirección del flujo), los valores más altos se encuentran concentrados en la zona industrial oeste (Zona A).

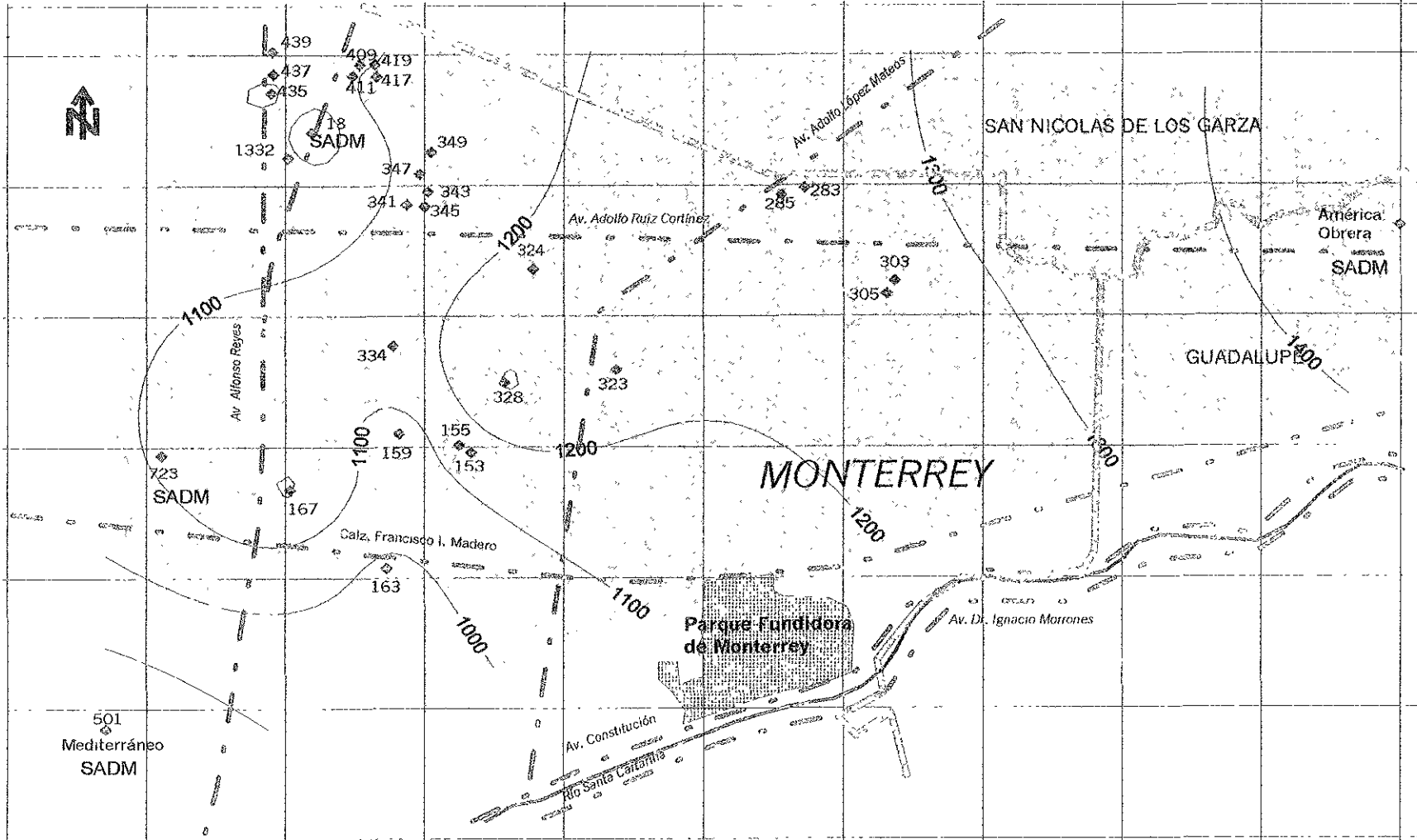
Para comprobar la influencia de las industrias en la calidad del agua se construyó un segundo mapa de conductividades eléctricas (Figura 13) sin tomar en cuenta los pozos localizados dentro de la zona industrial oeste y se obtuvo una configuración donde se observa que las conductividades eléctricas aumentan en dirección del flujo. El comportamiento observado en este segundo mapa de conductividades, es comparable al presentado en el estudio regional de CNA en 1997.

Figura 12. Distribución de conductividades eléctricas en las aguas subterráneas del municipio de Monterrey.



ESCALA APROXIMADA: 1 : 35 000

Figura 13. Distribución de las conductividades eléctricas ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en las aguas subterráneas del municipio de Monterrey (eliminando los pozos de la Zona A), observe que las conductividades eléctricas se encuentran escritas en las isólinas.



ESCALA APROXIMADA 1 : 35 000

3.2.2 Iones mayores

En el cuadro 6 se muestran las concentraciones de bicarbonatos, nitratos, potasio, calcio y magnesio solubles de los pozos de agua.

Para poder clasificar a las aguas se utilizó el diagrama de Piper (figura 14), el cual, de acuerdo a la concentración de iones mayores (sulfatos, cloruros, calcio, magnesio, bicarbonatos y sodio) clasifica a las aguas. Los pozos de la zona C contienen agua bicarbonatada cálcica, ya que predominan los iones cálcicos y bicarbonatos en su composición química. Esto concuerda con las características litográficas del área, e indica que dichas aguas no se encuentran afectadas por la actividad industrial de la zona.

El agua de los pozos localizados en la zona A presentan mayores concentraciones de sulfatos y sodio (Cuadro 6). Los mayores valores de sulfatos están concentrados dentro de la zona industrial oeste (zona A), donde se encuentran las mayores concentraciones de As y Se, sin embargo, hacia la parte este del presente estudio (Zona B, Fig. 11), los valores altos de sulfatos en las muestras de aguas no están correlacionados con la presencia de As y Se (Figuras 15 y 16). Con base en este análisis, se puede plantear que los sulfatos no están relacionados directamente con la presencia de As y Se.

Las mayores concentraciones de sodio y cloruros se concentran solamente dentro de la zona A, lo cual coincide con las más altas concentraciones de Se y As (Figuras 17, 18, 19 y 20), lo cual indica una buena correlación entre estos parámetros y los elementos de frontera.

En forma general y utilizando el diagrama de Piper (Figura 14), las aguas muestreadas se clasifican en 3 tipos:

- 1) Aguas impactadas por la actividad industrial, las cuales concuerdan con las características naturales de las aguas bicarbonatadas cálcicas (ver estrellas azules Figura 14).
- 2) Aguas impactadas por la actividad industrial que presentan concentraciones anormales de sodio y cloruro, elementos altamente correlacionados con selenio y arsénico (ver diamantes rojos Fig 14).
- 3) Aguas resultantes de la mezcla de las anteriores (ver puntos verdes y estrellas moradas de Fig 14).

Figura 14. Diagrama de Piper para las muestras de aguas subterráneas de Monterrey, Nuevo León.

LEYENDA

◊ Pozos relacionados con posibles fuentes puntuales de As y/o Se dentro la zona industrial

☆ Pozos fuera de la influencia de la zona industrial (a diferentes distancias de la posible fuente)

☆ Pozos influenciados por la zona industrial, (muy cerca de las posibles fuentes de As y Se) pero no se localizan en la dirección del flujo

○ Pozos influenciados por la zona industrial, se localizan en dirección del flujo después de las posibles fuentes puntuales de As y Se

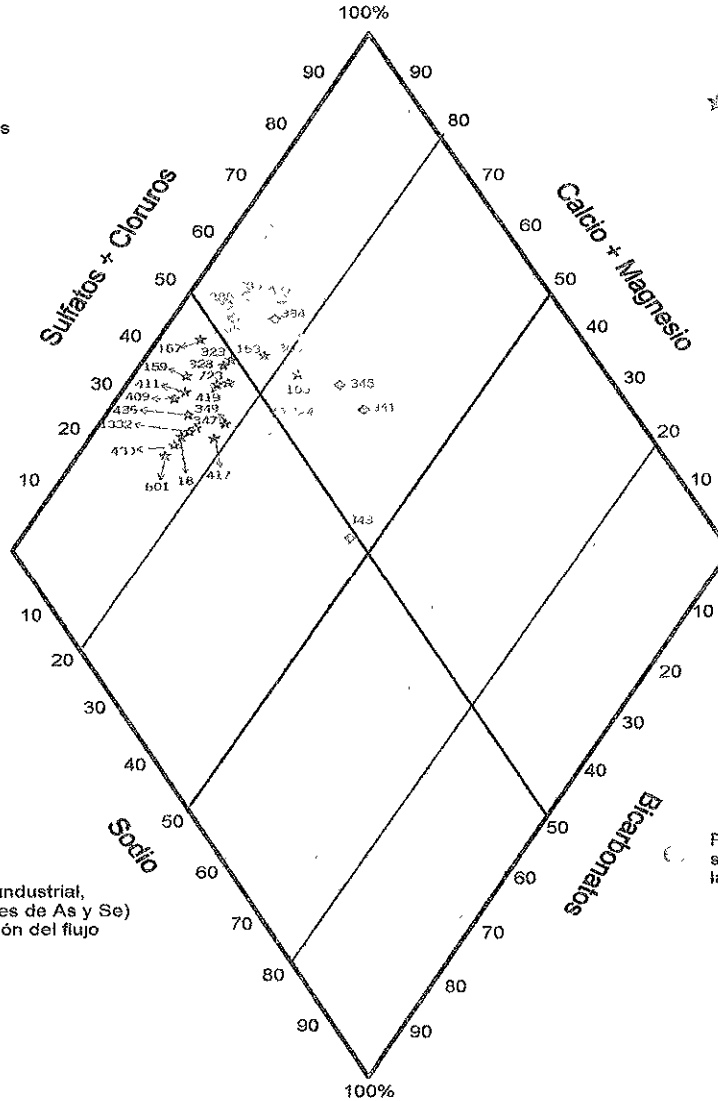


Figura 15. Distribución de arsénico y sulfatos en las aguas subterráneas del municipio de Monterrey.

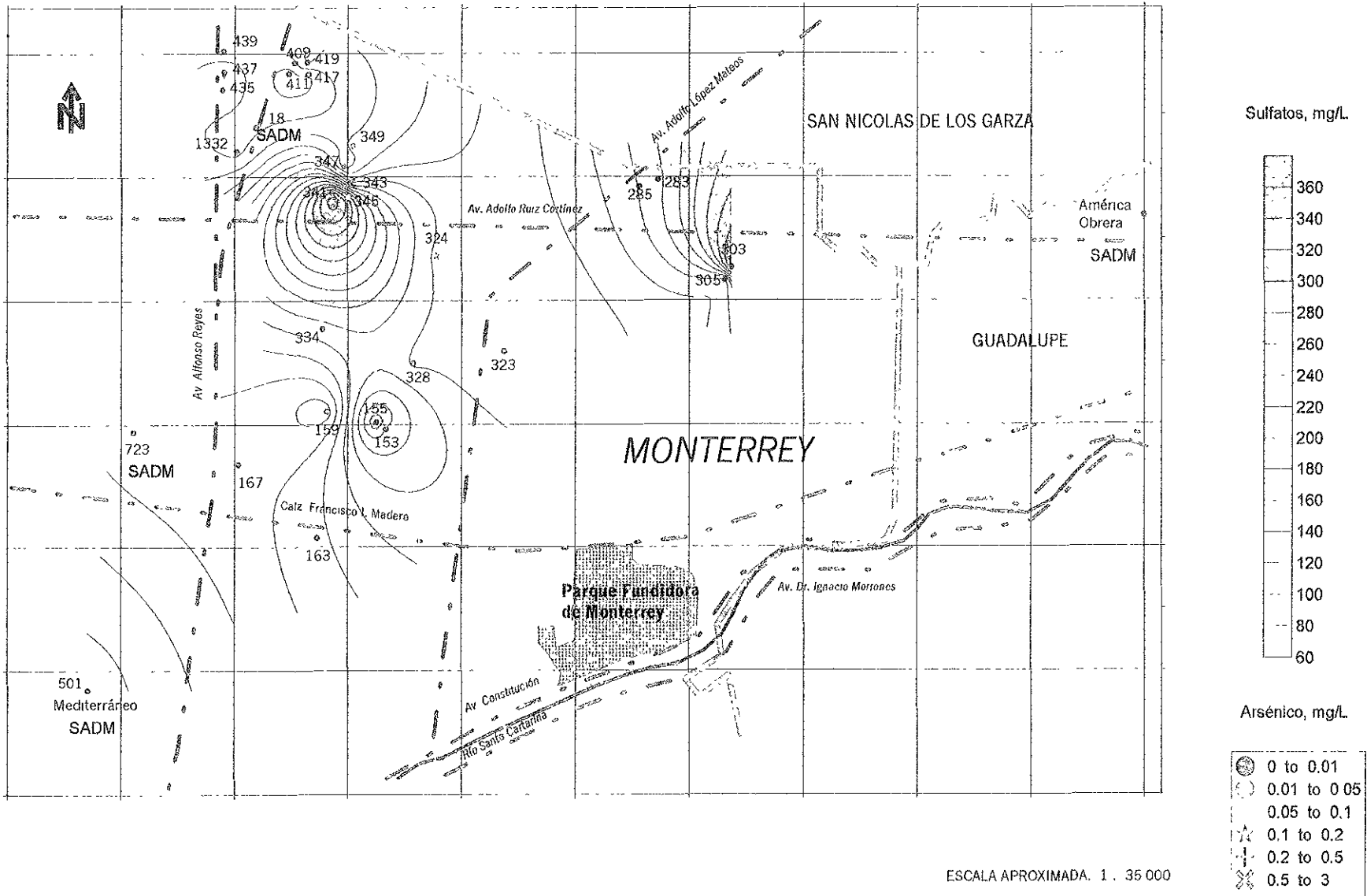
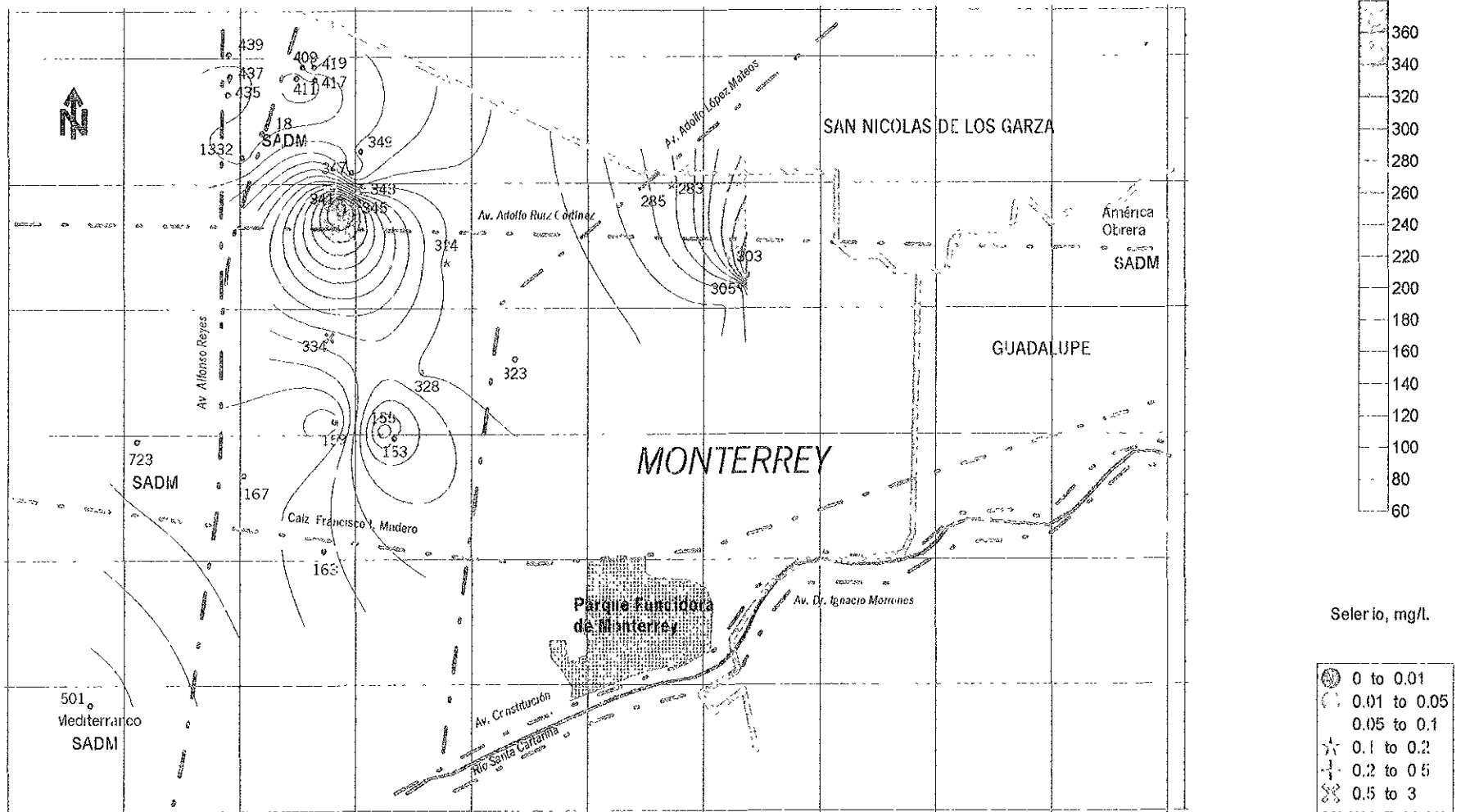


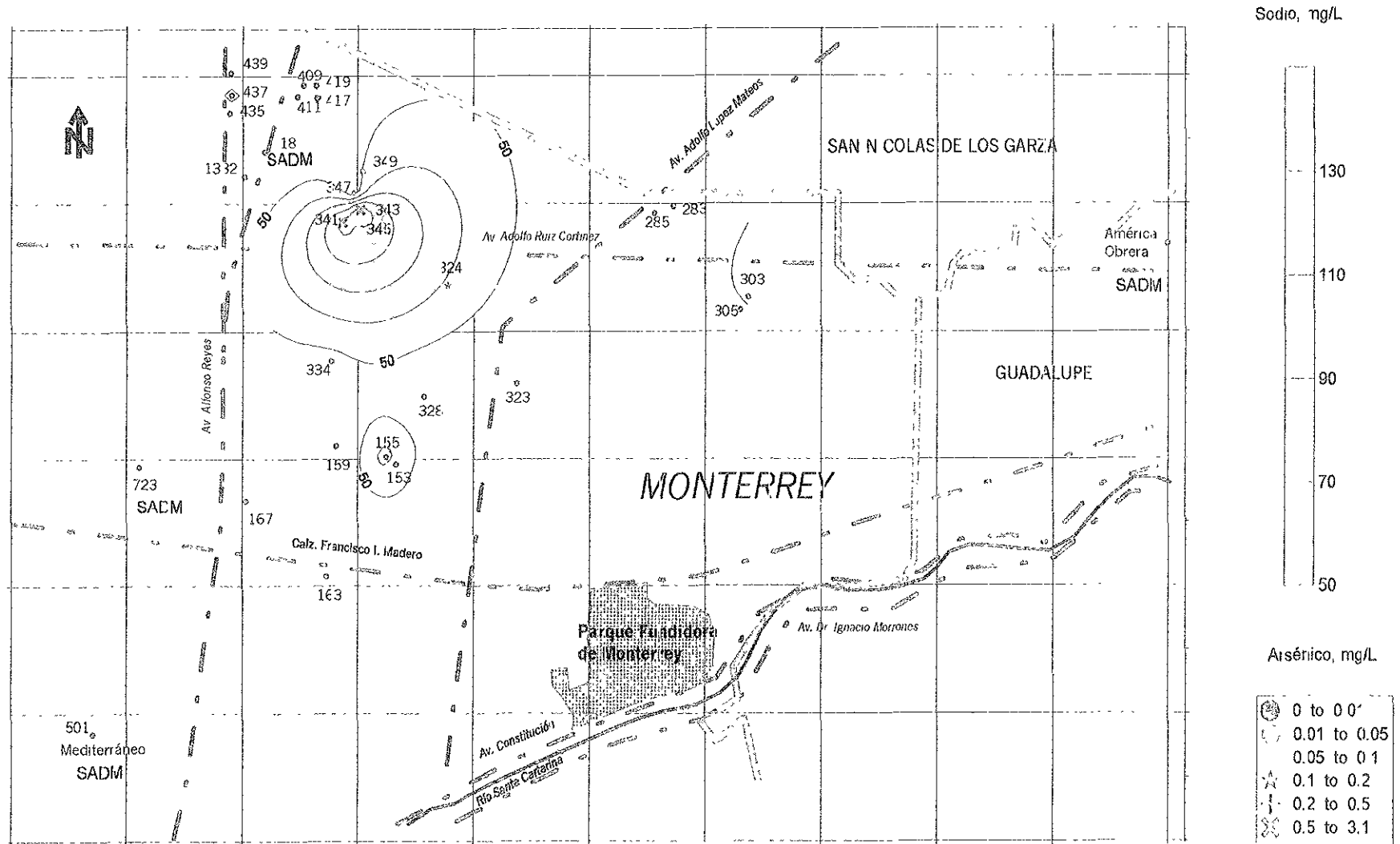
Figura 16. Distribución de selenio y sulfatos en las aguas subterráneas del municipio de Monterrey.,

Sulfatos, mg/L.



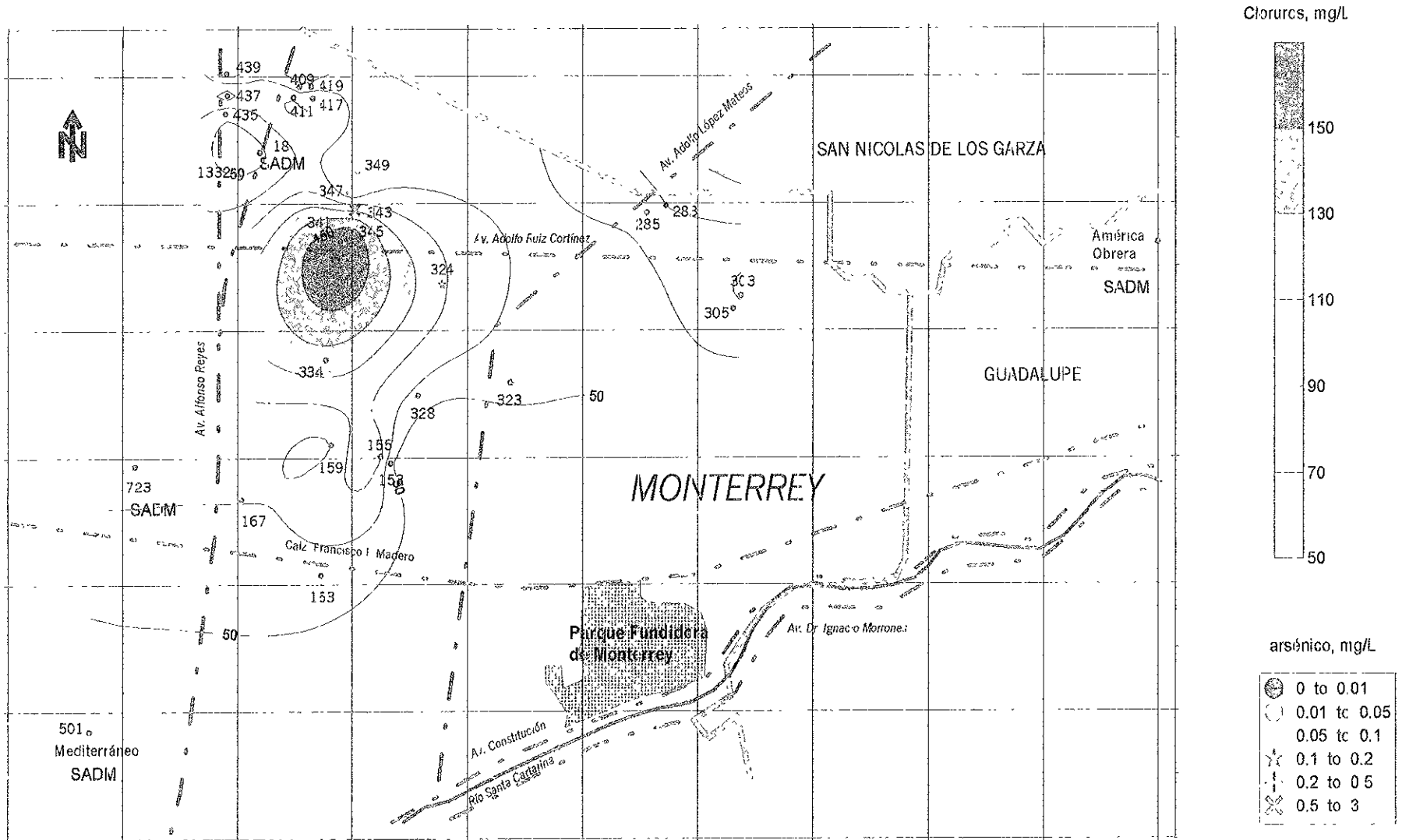
ESCALA APROXIMADA: 1 : 35 000

Figura 17. Distribución de arsénico y sodio en las aguas subterráneas del municipio de Monterrey.



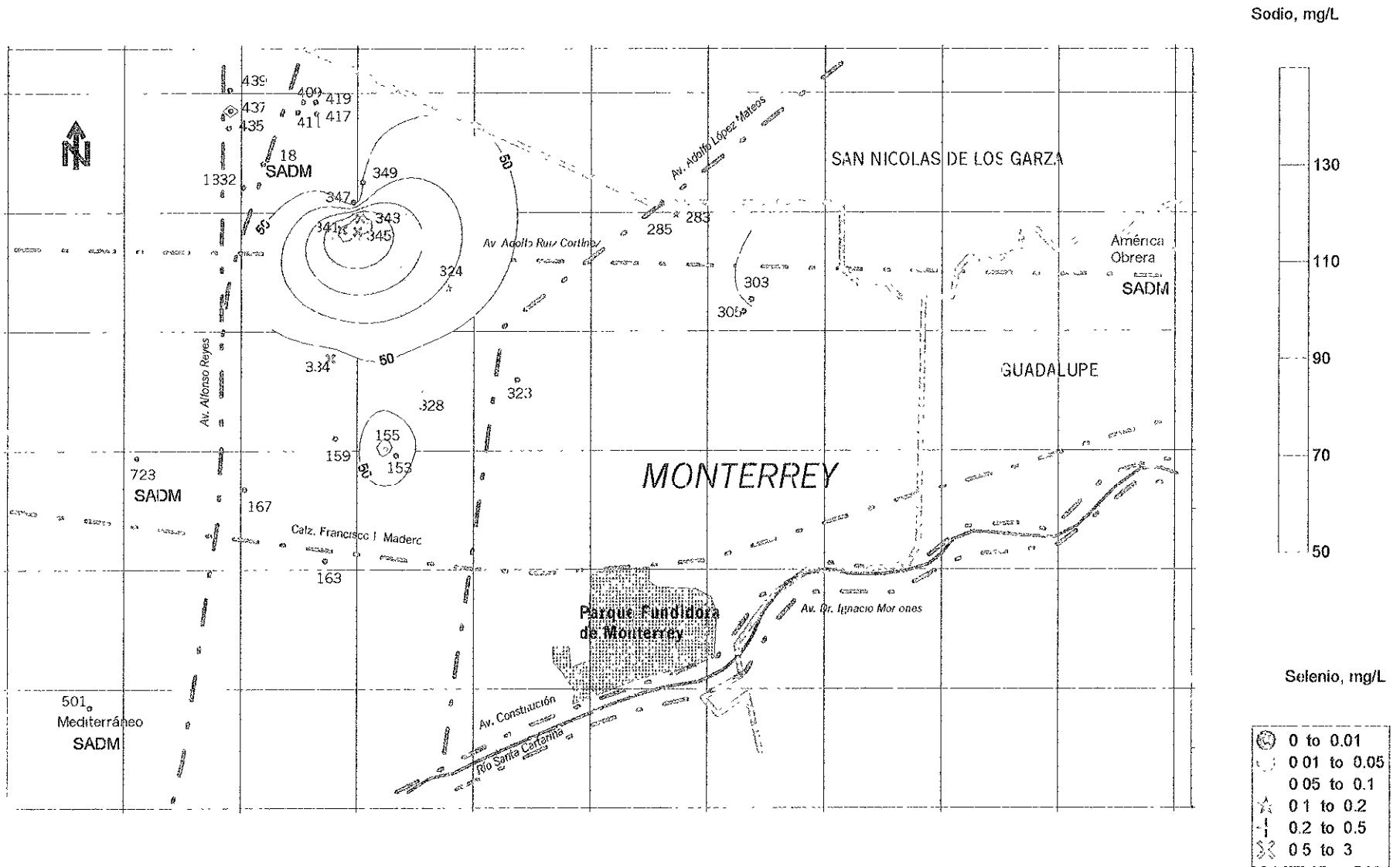
ESCALA APROXIMADA: 1 : 35 000

Figura 18. Distribución de arsénico y cloruros en las aguas subterráneas del municipio de Monterrey.



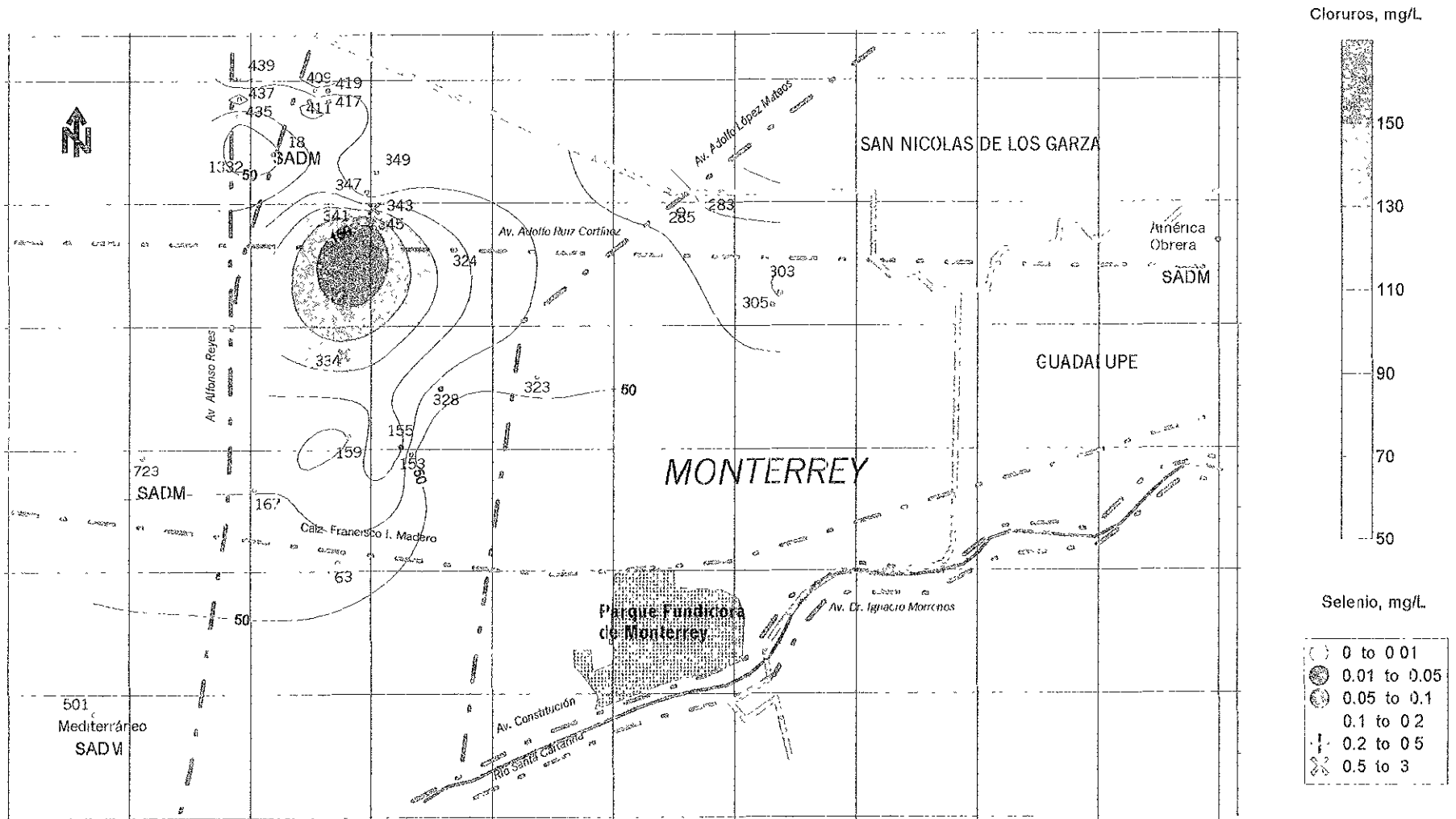
ESCALA APROXIMADA: 1 : 35 030

Figura 19. Distribución de sodio y selenio en las aguas subterráneas del municipio de Monterrey.



ESCALA APOXIMADA: 1 : 35 000

Figura 20. Distribución de cloruros y selenio en las aguas subterráneas del municipio de Monterrey.



ESCALA APROXIMADA. 1 : 35 000

3.2.3 Arsénico y selenio

Los resultados de los análisis de arsénico y selenio en las muestras de aguas subterráneas (Cuadro 7) indican que los pozos utilizados para abastecimiento de agua potable, perteneciente al Servicio de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), presentan concentraciones por debajo del límite permisible (0.05 mg/L) en el Reglamento de la Ley General de Salud en materia de control sanitario para agua potable.

Los pozos con mayores concentraciones de arsénico se encuentran en la zona industrial A (ver Figura 21). De los 11 pozos muestreados en esta zona, 3 (324, 341 y 343) presentan concentraciones superiores a 50 µg/L (0.155, 3.081 y 1.125 mg/L respectivamente). Al ser, dichos pozos de uso industrial, no representan directamente un riesgo a la salud, sin embargo, su presencia indica que la actividad industrial está impactando directamente la calidad de las aguas subterráneas. Por otro lado, las aguas de los pozos de las zonas B y C tienen concentraciones de arsénico menores a 0.005 mg/L, lo cual indica que la litología del lugar no es determinante en la presencia de estos elementos en el agua subterránea.

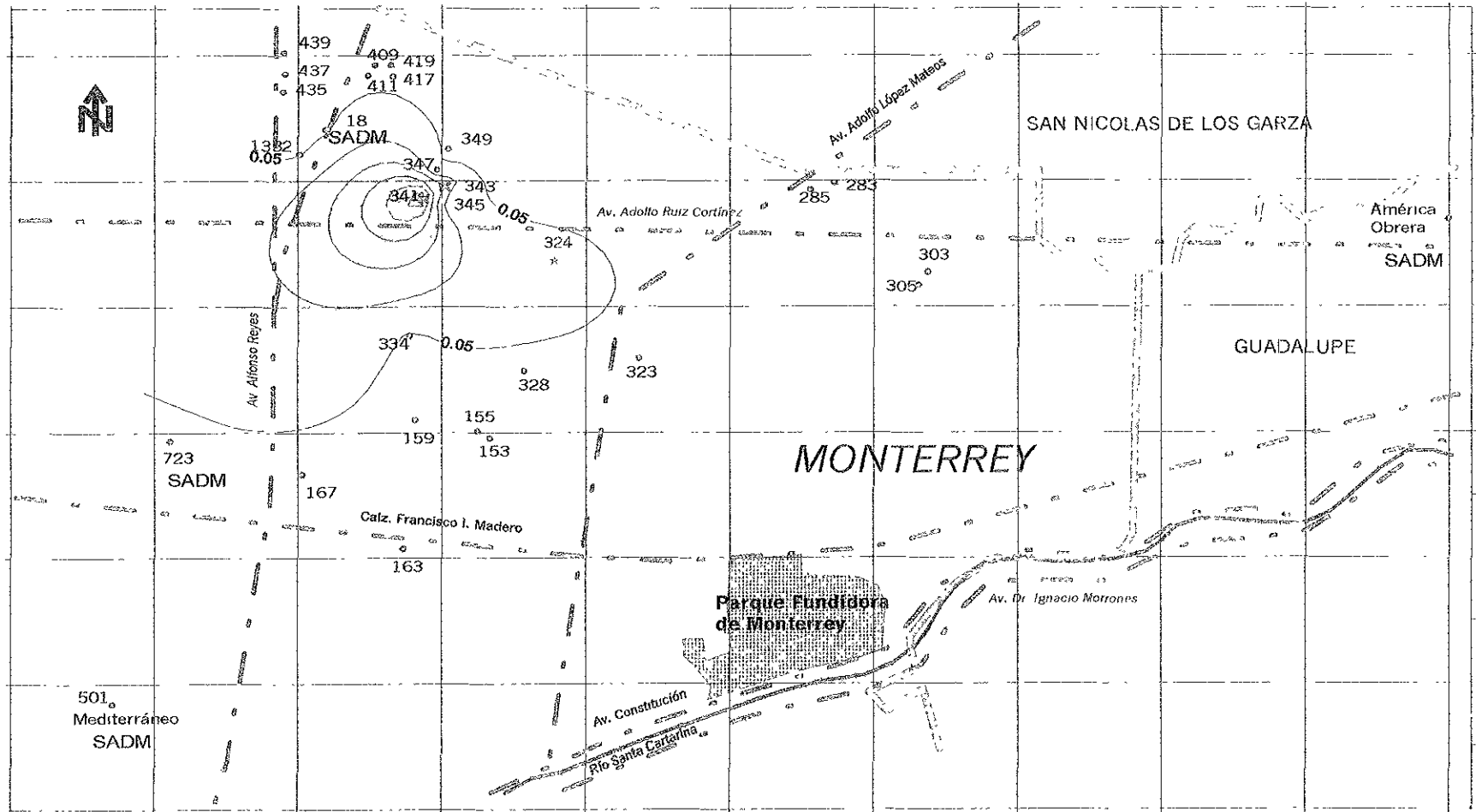
De manera similar al comportamiento de la conductividad eléctrica, las concentraciones más altas de arsénico y selenio en la zona muestreada se localiza en el área industrial A, lo que demuestra una influencia de las actividades humanas sobre la calidad del agua subterránea de esta zona.

Como se puede ver en el mapa de distribución del arsénico en las aguas subterráneas de Monterrey (Figura 21), la estela formada por el arsénico no ha avanzado significativamente en dirección del flujo, representada con una coloración verde de diferentes intensidades dependiendo de la concentración. Así mismo, las concentraciones de arsénico fuera de esta estela no sobrepasa los 50 µg/L.

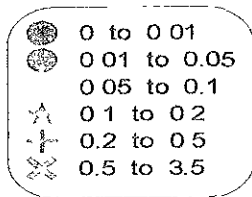
El transporte del arsénico es bajo debido a que la velocidad del acuífero es baja. Se puede realizar una estimación de la velocidad del acuífero con los cálculos que se muestran a continuación:

- 1) Los factores que afectan el transporte del soluto a través de un acuífero se determinan con la ecuación 1.

Figura 21. Distribución del arsénico en aguas subterráneas del municipio de Monterrey.



Arsénico, mg/L



ESCALA APROXIMADA: 1 : 35 000

$$T_{\text{sol}} = \text{Vel}_{\text{ac}} + F_{\text{ret}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde T_{sol} es el transporte de soluto, Vel_{ac} es la velocidad del acuífero y F_{ret} son los factores de retención del soluto.

2) La velocidad del acuífero va a depender de la conductividad hidráulica (K) y del gradiente hidráulico (I) de acuerdo a la siguiente relación:

$$\text{Vel}_{\text{ac}} = K * I \quad (\text{Ecuación 2})$$

Freeze (Freeze,1979) ha reportado que en el tipo de rocas predominantes en esta zona (lutitas y calizas fracturadas) se ha encontrado una conductividad hidráulica entre 10^{-9} y 10^{-5} m/s. Así mismo utilizando los datos generados por la Comisión Nacional de Aguas en 1998 (CNA,1998) se puede estimar que el gradiente hidráulico de la zona metropolitana de Monterrey es de aproximadamente 0.006. Para calcular el valor estimado de la conductividad hidráulica en un año se realiza la siguiente conversión:

$$K \text{ (m/año)} = 10^{-5} \text{ m/s} * 3600 \text{ s/h} * 24 \text{ h/día} * 365 \text{ días/año}$$

$$K = 315.36 \text{ m/año}$$

Con estos datos se puede calcular la velocidad de flujo aproximada de las aguas subterráneas a partir de la ecuación 2, donde:

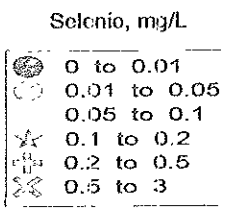
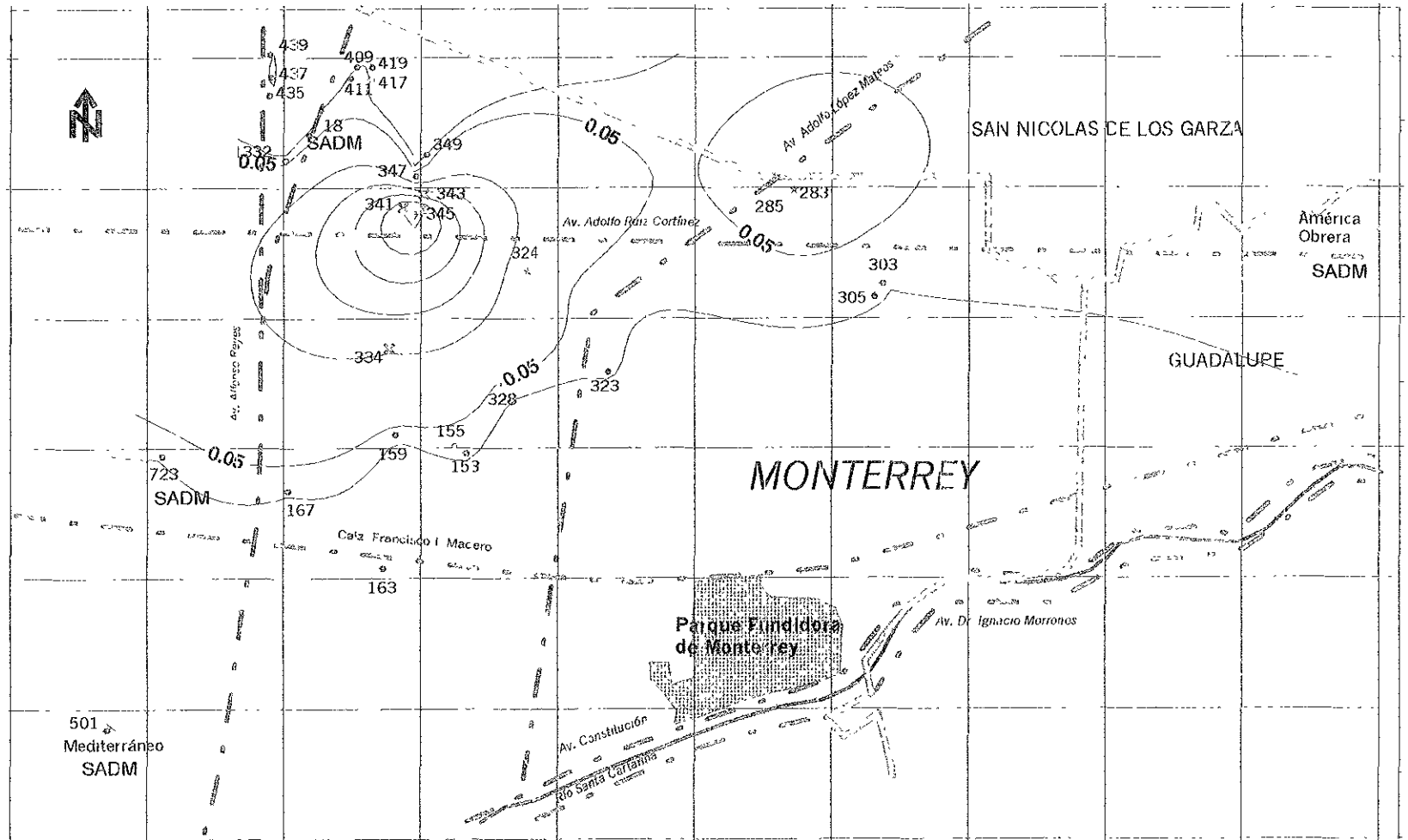
$$\text{Vel}_{\text{ac}} = 315.36 \text{ m/año} * 0.006$$

$$\text{Vel}_{\text{ac}} = 1.9 \text{ m/año}$$

El comportamiento del selenio en las aguas subterráneas es similar al del arsénico, 5 de 11 pozos de la zona A contienen concentraciones de selenio superiores a 0.05 mg/L en un intervalo desde 0.155 hasta 2.415 mg/L. La estela de distribución, representada con tonalidades amarillas de diferente intensidad (Figura 22), se encuentra concentrada en un área ligeramente más extensa que la encontrada para arsénico.

A diferencia del arsénico, en la zona B se encontraron dos pozos (núm. 283 y 285) con niveles superiores a 0.05 mg/L, localizados aproximadamente a 1750 m del área impactada (ver figura 22). Esta agua se utiliza en la industria alimentaria. Los datos indican que el agua extraída de los pozos de ésta contiene concentraciones de selenio (0.133 y 0.080 mg/L respectivamente) superiores a las establecidas por el Reglamento de la Ley General de Salud en materia de control sanitario para agua potable.

Figura 22. Distribución del selenio en las aguas subterráneas del municipio de Monterrey.



ESCALA APROXIMADA: 1 : 35 000

No es posible que el selenio que se encontró en estos pozos provenga de la zona oeste (zona A), ya que a pesar de que se encuentran en dirección del flujo (noreste), la profundidad de éstos es mayor (65 y 61 m) que la de los pozos afectados (ver Cuadro 7), lo cual indica que esta agua pertenece a otro acuífero, ya que la dirección del flujo siempre es de profundidades menores a profundidades mayores.

Con base en las observaciones de campo, se puede considerar que estos pozos están afectados por las industrias de la zona este, por ejemplo las que producen productos cerámicos ya que Fetter (Fetter, 1993) menciona que durante la fabricación de cerámica se puede llegar a liberar selenio al ambiente. Sin embargo, para definir la fuente puntual de contaminación se requiere de un estudio complementario.

Los pozos fuera del área afectada registraron concentraciones de selenio máximas de 0.017 mg/L, por lo cual se puede concluir que la litología del lugar no está aportando concentraciones considerables de selenio al acuífero. En consecuencia, ninguno de los pozos de agua potable presentaron concentraciones superiores al límite máximo establecido (0.05 mg/L) por la Ley General de Salud en materia de control sanitario para agua potable.

En conclusión, las mayores concentraciones de As y Se se encontraron en los pozos 341 (As= 2.415 mg/L y Se = 3.081 mg/L) , 343 (As= 1.164 mg/L y Se= 1.125 mg/L) y 345 (Se= 2.678 mg/L) pertenecientes a una industria productora de vidrio. Dichos pozos pueden estar relacionados con las posibles fuentes puntuales de As y Se dentro de la zona A. Estos elementos de frontera son empleados como decolorantes del vidrio verde (Albert, 1985 y EPA, 1998), es por esto, que si los residuos generados no son correctamente almacenados y la capa de arcilla que protege al acuífero es afectada se puede llegar a las aguas subterráneas.

IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En este estudio se logra concluir lo siguiente:

- El método de espectrofotometría de absorción atómica-generador de hidruros resultó adecuado para evaluar aguas profundas que contienen arsénico, ya que el límite de detección fue de 0.8 $\mu\text{g/L}$ y el límite de cuantificación fue de 2.5 $\mu\text{g/L}$, concentraciones por debajo de lo que exige la legislación internacional y nacional. Este método puede aplicarse a cualquier tipo de agua y digestiones de sólidos porque no se presentan interferencias de matriz.
- El método de espectrofotometría de absorción atómica-generador de hidruros también resultó adecuado para evaluar aguas profundas que contienen selenio, ya que el límite de detección fue de 1 $\mu\text{g/L}$ y el límite de cuantificación fue de 3 $\mu\text{g/L}$. Estos límites permiten cumplir con la legislación nacional e internacional. Así mismo, este método puede aplicarse a cualquier tipo de agua y digestiones de sólidos porque no se presentan interferencias de matriz.
- Al aplicar un plan de control de calidad durante el desarrollo de la técnica experimental se logra asegurar la validez de los resultados para poder compararlos con la legislación existente.
- La revisión documental evidenció que existen omisiones en las normas que supervisan la calidad del agua para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994) y la del agua purificada envasada (NOM-041-SSA1-1993), ya que no se reporta un nivel máximo permisible para selenio. Debido a esto no se encontró una congruencia con el reglamento en materia de control sanitario de la Ley General de Salud donde se especifica un nivel máximo permisible para selenio en aguas potables de 0.050 mg/L. Así mismo, la reglamentación de la concentración máxima permitida de As y Se en aguas de uso industrial alimentario es necesario, ya que los productos que son producidos pueden llegar a contener altas cantidades de estos elementos de frontera y, por tanto, el problema se extiende de un nivel local a uno general.
- Con respecto a los estudios realizados en México, no se encontró ninguno donde se haya cuantificado selenio que, a pesar de ser un elemento esencial para la vida, también puede ocasionar problemas de salud si su ingestión excede a la capacidad de eliminación en el organismo humano.

En el área de estudio se encontró que:

- De los 30 pozos muestreados, 7 presentaron concentraciones de selenio superiores a 0.05 mg/L y 3 presentaron concentraciones de arsénico superiores a 0.05 mg/L. En los pozos no afectados por la zona industrial la concentración máxima encontrada de arsénico fue de 0.005 mg/L y de selenio fue 0.017 mg/L, lo cual indica que la litología del lugar no está afectando la calidad del agua y, por tanto, el arsénico así como el selenio son de origen antropogénico.
- Al realizar los mapas de superficie, se encontró que la conductividad se comporta de manera anómala dentro la zona industrial oeste (zona A). Así mismo, se encontraron altas concentraciones de sodio y de cloruro en esta área asociadas a las mayores concentraciones de arsénico y selenio, por lo que se concluye que, el agua subterránea está siendo afectada localmente por la actividad industrial desarrollada en la zona A. En esta área se detectaron cuatro fuentes puntuales de contaminación (pozos núm. 341, 333, 344 y 345).
- Las aguas que no están afectadas por la actividad del hombre son del tipo bicarbonatada cálcica.
- Se encontraron dos pozos de agua en la zona B, cuyo uso es industrial alimentario, con concentraciones de Se superiores a 50 µg/L (nivel máximo permisible en agua potable). Para localizar la fuente de selenio en esta agua se requiere de un estudio más amplio de esta zona.
- El agua de cinco pozos de la zona industrial A, para uso industrial, presentaron valores de Se superiores a la tolerancia máxima estipulada en el Reglamento para la prevención y control de la contaminación de agua.
- La estela de As y Se a partir del área industrial oeste (zona A) ha avanzado muy poco, lo que evidencia una velocidad muy baja del flujo de agua, lo cual nos indica que el problema está localizado.
- Estudios realizados de la litología de esta área muestran que existe una capa de arcilla impermeable que protege al manto freático del lugar, dicha capa posiblemente fue removida por la misma actividad industrial en donde se encuentran las posibles fuentes puntuales de As y Se durante la construcción de sótanos, pozos de absorción, etc. Estas industrias deben identificar el sitio donde se ha afectado la capa de arcilla que protege al manto freático para que la lixiviación de estos elementos se detenga.

- En lo que respecta al agua de consumo humano, no se encontraron concentraciones de Se y As superiores al valor máximo permisible dictado por las legislaciones mexicanas.

RECOMENDACIONES.

Se necesita complementar la legislación mexicana de salud para que se incluyan análisis que son necesarios, sobre todo en zonas donde el arsénico y el selenio pueden encontrarse en cantidades significativamente altas por las características naturales (hidrotermales, desérticas) o por la actividad antropogénica (industrial, minera) de la región.

Para que esto se pueda lograr, se necesitan laboratorios a nivel regional que tengan el equipo necesario y las condiciones propicias para realizar estos análisis, sobre todo si en esa zona existen pozos de uso y consumo humano o de uso para la industria alimentaria.

Considerando que la toxicidad de selenio no ha sido estudiada en México se deberían realizar pruebas toxicológicas para conocer a que niveles causan problemas con base en la dieta típica del mexicano.

En México no existe una separación entre la industria alimentaria y las demás, esto puede ocasionar que los productos elaborados en dichas empresas se encuentren contaminados por elementos como el arsénico y el selenio. Así pues, es necesario que el agua de uso industrial alimentario extraída en zonas donde existe el riesgo de contaminación con arsénico y selenio se mantenga en monitoreo constante para evitar que contenga niveles superiores a los permisibles por la norma de agua potable.

El agua de pozos de industrias alimentarias que contengan niveles superiores a los permisibles por la norma de agua potable debe ser mezclado con agua no afectada en proporciones tales que se reduzcan las concentraciones de arsénico y selenio a un nivel máximo de 50 µg/L. Otra opción es someter el agua de dichos pozos a tratamientos adecuados que logren disminuir las concentraciones de As y Se. Los métodos más efectivos recomendados para la disminución de As en agua (Mc Junkin, 1986) son:

- Oxidación antes del tratamiento requerido
- Precipitación con sulfato férrico, pH 6-8

- Precipitación con sulfato de aluminio, pH 6-7
- Ablandamiento mediante cal-sosa sobrante

Los métodos más efectivos recomendados por Mc Junkin para la disminución de Se en agua son:

- Intercambio iónico
- Ósmosis inversa
- Coagulación con sulfato férrico, pH 6-7 para Se (IV)

Así mismo, es necesario realizar análisis de la cantidad de As y Se en los productos producidos con dicha agua, ya que pueden llegar a contener altas cantidades de estos elementos de frontera y, por tanto, el problema no sólo sería a nivel local, sino de todas las personas que consumen esos alimentos.

Es de vital importancia evitar que las aguas subterráneas sean impactadas por las actividades humanas, por lo que debe protegerse la fuente. Ésta protección debe hacerse de manera responsable mediante la construcción y el uso de almacenes y confinamientos adecuados para los materiales que contengan dichas sustancias tóxicas sin afectar las protecciones naturales que impiden el paso de contaminantes al manto acuífero.

Es recomendable realizar la especiación del elemento a estudiar, ya que su movilidad, biotransformación y toxicidad dependen del estado de oxidación del mismo. Es por esto, que para futuros estudios en la zona se recomienda utilizar un método de especiación que permita diferenciar la especie que se encuentra en predominancia en la zona.

En zonas donde el agua potable de buena calidad es escasa, se recomienda emplear aguas tratadas para usos no asociados con el consumo humano o animal. Así mismo, cuando se advierta la existencia de una situación potencialmente peligrosa, deben tomarse en consideración el riesgo para la salud, la disponibilidad de otras fuentes y la posibilidad de aplicar medidas correctivas apropiadas antes de decidir si es o no aceptable el abastecimiento de que se trata.

BIBLIOGRAFÍA.

- Albert L.A. (1985) Curso básico de toxicología ambiental. México, ECO-OMS, 372 pp.
- Alfasi Z.B (1994) Determination of trace elements. New York, Balaban Publishers, 205-207 pags.
- Alloway B.J, Ayres D.C (1984) Chemical principles of environmental pollution. New York, Blackie Academic and Professional, 395 pp.
- American Public Health Association (1992) Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, Ediciones Díaz de Santos, 3-1 a 3-188 pag.
- American Water Works Association (1975) Water quality and treatment. E.U.A, Mc. Graw Hill, 3a edición, 1-51 pag.
- Anderson R. K., Thompson M., Cubard E. (1986) Selective reduction of arsenic species by continuous hydride generation. Analyst, Octubre, Vol. 3, 1153-1158 pag.
- Appello C.A J., Postma D. (1993) Geochemistry, groundwater and pollution. Rotterdam, Balkema, 35 pag.
- Armienta M.A, Rodríguez R (1995) Evaluación del riesgo ambiental debido a la presencia de As en Zimapán Hidalgo. Instituto de Geofísica, México, UNAM, 182 pp.
- Agency for Toxic substances and Disease Registry (1989) Toxicological profile for selenium, U.S. Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, 7 pp.
- Beaty R.D (1979) Conceptos, instrumentación y técnicas de espectrofotometría por absorción atómica. U.S.A, Perkin-Elmer, 70 pp.
- Bowen, J.R. (1994) Sorption of arsenic by iron oxides and oxyhydroxides in soils. Applied Geochemistry, Vol. 9, 279-286 pag.
- Bowen R.J, Morley N.H. Din V.K. (1994) Arsenic in ground water in six districts of West Bengal, India. Applied Geochemistry, Vol. 9, pag 15-22.
- Bowen H.J.M. (1979) The environmental chemistry of the elements. Academic Press, Londres, 256 pp.
- Carrasco M.C. (1992) Contaminación de aguas. España, Sistema Medio Ambiente, Grefol-La Ley, Vol II, III 1- III 87, pag.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (1994). Transporte, destino toxicidad de constituyentes que hacen peligrosos a un residuo. México, CENAPRED, 171 pp.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE QUÍMICA

- Chakroborti D et al. (1996) Arsenic in ground water in six districts of West Bengal, India. Environmental Geochemistry and Health, Vol. 18, pag 5-15.
- Clement W.H., Faust S. D. (1981) The release of arsenic from contaminated sediments and muds. Journal of Environmental Science and Health, A16, 87-122 pag.
- Comisión Nacional del Agua (1997) Integración del inventario de agua subterránea y actividades de carácter geohidrológico en el acuífero de la zona Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, C.N.A, D.F. México, 183 pp.
- Comisión Nacional del Agua (1998) Estudio de simulación hidrodinámica de los acuíferos de la zona metropolitana de la ciudad de Monterrey, N.L. Gerencia de aguas subterráneas, C.N.A, D.F., México, 152 pp.
- Comisión Nacional de Aguas (1999) Guía de muestreo de agua subterránea. México, C.N.A, 55 pp.
- Concha, G., Vogler, G., Nermell, B., Vahter, M. (1998) Metabolism of inorganic arsenic in children with chronic high arsenic exposure in northern Argentina. Environmental Health Perspectives, Vol. 106, 355-359 pag.
- Crompton T.R. (1997) Toxicants in the aqueous ecosystem. New York, John Wiley and sons, 384 pp.
- Cullen W.R., Relmer K.H. (1989) Arsenic speciation in environment. Chemical Reviews, Vol. 89, No. 4, 713-764 pag.
- Danielsson B.R, Danielson M, Khayat A, Wide M. (1990) Comparative embryotoxicity of selenite and selenate: uptake in murine embryonal and fetal tissues and effects on blastocysts and embryonic cells in vitro. Toxicology, Vol. 63, 123-136 pag.
- Del Razo L.M, Arellano, M.A, Cebrian, M.E. (1990) The oxidation states of arsenic in web water from a chronic arsenicism area of Northern México. Environmental Pollution, Vol. 64, 143-153 pag.
- Environmental Protection Agency (1992) Quality control. U.S.A, E.P.A, Capítulo 1, Julio, 1a. Revisión, 31 pp.
- Environmental Protection Agency (1998) Quality control. CD-ROM, Versión 1.0, 3ª edición, Segunda revisión, pag. 1-19.
- Fetter C.W. (1993) Contaminant Hydrogeology. New York, Macmillan Publishing Company, pag. 8.
- Freeze R.A.,Cherry J.A. (1979) Groundwater. U.S.A, Prentice Hall, 589 pp.
- Frost, R.R, Griffin, R.A. (1977) Effect of pH on adsorption of Arsenic and Selenium form landfill leachate by clay minerals. Soil Science Society American Journal, Vol. 41, 53-57 pag.

- Galvão L.A., Corey G. (1987) Arsénico. México, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, 70 pag.
- Ganther H.E, Lawrence R.J (1997) Chemical transformation of selenium in living organisms. Improved forms of selenium for cancer prevention. Tetrahedron, Vol. 53, Vol. 36 pp, 12299-12310 pag.
- García E. A. (1997) Distribución y especiación de arsénico en sedimentos fluviales del río toliman en Zimapán, Hgo. Tesis de maestría, Instituto de Geofísica, UNAM, México D.F, 81 pp.
- Goytia L.V.M. (1998) Evaluación del contenido de arsénico en fuentes de abastecimiento de agua potable en la zona de Andocutín, Gto. Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM, México D.F, 147 pp.
- Gray N.F. (1996) Calidad del agua potable, España, Acribia, 365 pp.
- Howard A.G, Arbab-Zavar M.H. (1981) Determination of inorganic arsenic (III) and arsenic (V), methylarsenic and dimethyl species by selective hydride evolution atomic-absorption spectroscopy. Analyst, Vol. 100, pag 213-220.
- Hutchinson T. C, Meema K.M. (1996) Lead, mercury, cadmium and arsenic in the environment. New York, John Wiley and Sons, 360 pp.
- Keith L.H. (1992) Environmental sampling and analysis. E.U.A, Lewis Publishers, 143 pp.
- Kruus P., Demmer M., McCaw Kierstan (1991) Chemicals in the environment. Canada, Polyscience Publications Inc, pag. 62
- Mangus F. B (1993) Toxic substances in the environment. New York, John Wiley and Sons, 360 pp
- Manning B.A, Martens D.A. (1997) Speciation of arsenic (III) and arsenic (V) in sediment extracts by high-performance liquid chromatography-hydride generation atomic absorption technique for arsenic speciation. Journal of Environmental Quality, Vol. 20, 96-100 pag.
- Mc Junkin F.E. (1986) Agua y salud humana. México, Limusa, 220 pp.
- Murgía Vaca E. (1981) Contaminación de aguas. Facultad de Ingeniería, México, UNAM, 175 pp.
- Nriagu Jerome O. (1994) Arsenic in the environment. New York, John Wiley and Sons, Vol. 1, pag 1-15.
- Ohlendorf H.M, Hoffman D.J, Saki M.K, Aldrich T.W. (1986) Embryonic mortality and abnormalities of aquatic birds: apparent impacts of selenium from irrigation drainwater. Science of the Total Environment, Vol. 52, 49-63 pag.

- Organización Mundial de la Salud. (1980) Criterios de salud ambiental 6. Washington D.C, Organización Panamericana de la Salud, 287 pp.
- Organización Mundial de la Salud (1991) Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Lima Perú, OMS, 2ª edición, pag. 1.
- Organización Mundial de la Salud (1995) Guías para la calidad del agua potable. Ginebra, Organización Mundial de la Salud, 220 pp.
- Pierce M.L., Moore C.B. (1982) Adsorption of arsenite and arsenate on amorphous iron hydroxide. Water Research, Vol. 16, 1247-1253 pag.
- Prasad A. S. (1993) Essential and toxic trace elements in human health and disease: an update. New York, Wiley-Liss, 181-190 pag.
- Porras M.J, Thauvin J.P. (1978) Aguas subterráneas. Madrid, CIFCA, 81 pp.
- Ramos L. J.A (1996) Parámetros estructurales que controlan la hidrodinámica de las aguas subterráneas en el área de Zimapán Hgo. Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM, México D.F, 65 pp.
- Rodie A, Gerits J.P., Azcue J.M. (1995) Biochemical pathways of arsenic in lakes. Environmental Reviews, Vol. 3, 304-317 pag.
- Tebbutt T.H. (1997) Fundamentos de control de la calidad del agua. México, Limusa, 1997, 239 pp.
- Thompson, D.J. (1993) A chemical hypothesis for arsenic methylation in mammals. Chemical Biology Interact. Vol. 88, 89-114 pag.
- SAHOP (1982) Manual de normas de calidad para agua potable, México, SAHOP, 125 pp.
- SEDUE (1983) II Reunión regional sobre legislación ambiental. Contaminación por aguas. Septiembre, México, SEDUE, 135 pp.
- Stewart M.S, Spallholz J.E, Nelder K.H, Pence B.C. (1999) Selenium compounds have disparate abilities to impose oxidative stress and induce apoptosis. Free Radical Biology and Medicine, Vol. 26, No. 1-2, Enero, 42-28 pag
- Usami M, Tabata H, Ohno Y. (1999) Effects of ascorbic acid on selenium teratogenicity in cultured rat embryos. Toxicology Letters, Vol. 105, 123-128 pag.
- Villareal G.C. (1995) Atlas de Monterrey. México, Universidad Autónoma de Nuevo Leon, 1ª edición, pag. 33-43.
- Vinceti M, Cann C. I, Calsolari E. (2000) Reproductive outcomes in a population exposed long-term to inorganic selenium via drinking water. The Science of the Total Environment, Vol 250, Abril, pag 1-7.

- Welch, A., Lico, M. y Hughes J. (1988) Arsenic in groundwater of the western United States. Groundwater, No. 3, Vol. 26.
- Willhite CC. (1993) Selenium teratogenesis. Species-dependent response and influence on reproduction. Annual New York Academy of Sciences, Vol. 678, 169-177 pag.
- World Health Organization (1987) Environmental Health Criteria: Selenium. Génova, W.H.O, 120 pp.
- Xu H., Allard B., Grimval A. (1988) Influence of pH and organic substance on the adsorption of As (V) on geologic materials. Water, Air and Soil Pollution, Vol. 40, 293-305 pag.

LEGISLACIÓN MEXICANA.

Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. México, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Diario Oficial de la Federación, 2-diciembre-1989.

NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en el sistema de abastecimiento de agua público y privado. México. Secretaría de Salud, Diario Oficial de la Federación, 12-agosto-1994, 14-20 (segunda sección) pag.

NOM-041-SSA1-1993. Bienes y servicios. Agua purificada envasada. Especificaciones sanitarias. México, Secretaría de Salud, Diario Oficial de la Federación, 24-marzo-1995, 14-65 pag.

NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. México. Secretaría de Salud, Diario Oficial de la Federación, 18-enero-1996, 41-46 (primera sección) pag.

Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Productos y Servicios, Secretaría de Salud , Diario Oficial de la Federación, 18-enero-1988.

Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas. México, Comisión Nacional de Aguas, Bases jurídicas de la comisión nacional del agua. Cap. II, 1991.

PÁGINAS ELECTRÓNICAS.

- Environmental Protection Agency (2000a) Selenium sulfide, Integrated Risk Information System.
www.epa.gov/ngispgm3/iris/subst/0458.htm
- Environmental Protection Agency (2000b) Arsenic, 22-junio-2000.
<http://www.epa.gov/safewater/agua/estableciendo.html>

- Graber Phyllis Jensen (2000). Bates college geology students make a difference in Mexico. Bates News. Tel. 207-786-6330

www.bates.edu/now/news/newsrelease/N356.html

- Hass E. M (2000) Staying healthy with nutrition: the complete guide to diet and nutritional medicine celestial arts.

www.healthy.net/asp/templates/book.asp?PageType=Book&ID=207

- World Health Organization, Regional Office for South-East Asia, New Delhi. (28-02-2000) Arsenic in drinking water and resulting arsenic toxicity in India and Bangladesh. Pub. No. SEA/EH/505

www.bicn.com/acic/infobank/whoarec.html

- Yager J. y Ostrosky P. (28-02-2000) Arsénico: un carcinógeno humano paradójico. Publicación de Elsevier.

www.biomedicas.unam.mx/html/period97/sep5.htm

PERIÓDICOS.

NOTIMEX (25-04-1997) El Nacional: "Altos índices de contaminación en el río Bravo"

Pérez Diana Teresa. (01-06- 1999) La crónica de hoy: "Niños de San Luis Potosí, contaminados con plomo y arsénico a causa de la actividad de una empresa minera"

ENN News Archive (25-03-1999) "Arsenic levels in drinking water too high, study finds"
Environmental News Network.

ANEXO 1. Comparación de los diferentes métodos de de cuantificación de arsénico y selenio

A continuación se enlistan los fundamentos principales así como las ventajas y desventajas de los métodos de cuantificación de arsénico y selenio en aguas.

Cuadro A.1. Fundamentos, mventajas y desventajas de las diversas metodologías de cuantificación de arsénico y selenio en aguas.

| Método | Ventajas | Desventajas |
|--|--|--|
| Métodos colorimétricos | | |
| Método de dietilditiocarbamato de plata (para As) | Instrumentación poco costosa Mantenimiento poco costosa Específico para As | Lento Poco sensible Laborioso Alto volumen de muestra (35 mL) Altas interferencias de matriz |
| <i>Fundamento: Se basa en la reducción del arsénico inorgánico a arsina, AsH₃, la cual reacciona con acetato de plomo y dietilditiocarbamato de plata para dar un complejo colorido que se determina a 520 nm en un espectrómetro de U.V¹⁰.</i> | | |
| Método del tinte de HgBr ₂ (para As) | Poco equipo. Bajo costo | Baja precisión Baja exactitud Laborioso Lento Adecuado únicamente para determinaciones cualitativas o semicuantitativas. |
| <i>Fundamento: Se basa en la liberación de arsinas mediante una solución ácida de zinc. Dicha arsina reacciona con acetato de plomo y bromuro mercúrico para producir un complejo de color pardo amarillo que se mide sobre tiras de papel de ensayo¹¹.</i> | | |
| Método colorimétrico para selenio | Instrumentación poco costosa Bajas interferencias de matriz Específico para Se Mantenimiento poco costoso | Laborioso Baja sensibilidad Requiere de pretratamiento |
| <i>Fundamento: Se basa en la reacción del selenito con el 2,3-diaminonaftaleno para producir un compuesto piaselelol de color brillante y fuertemente fluorescente, que se extrae con ciclohexano y se mide por colorimetría¹².</i> | | |
| Espectroscopia de absorción atómica (EAA) | | |
| EAA- Flama | Simple | Sensibilidad limitada |

¹⁰ American Public Health Association (1992) Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, Ediciones Díaz de Santos, 3-83 a 3-84 pags.

¹¹ American Public Health Association (1992) Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, Ediciones Díaz de Santos, 3-85 pag

¹² American Public Health Association (1992) Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, Ediciones Díaz de Santos, 3-154 pag.

| | | |
|--|---|---|
| | Rápido Alta precisión Preparación de muestra simple | Requiere mucha muestra (25 mL) Altas interferencias de matriz |
| EAA- Horno de grafito | Necesita poca muestra Rápido Simple Bajos límites de detección (As: 1 µg/L, Se: 2 µg/L) ¹³ | As forma compuestos volátiles a altas temperaturas. Interacción de los elementos con el grafito. Altas interferencias de matriz |
| EAA- GH | Excelente sensibilidad Pocas interferencias Rápido Bajos límites de detección (2 µg/L) ¹⁴ Amplio intervalo de trabajo | Se requiere de pretratamiento de la muestra. Equipo costoso |
| Espectroscopia de emisión atómica (AES) | | |
| ICP | Análisis multielemental Bajas interferencias de matriz | Instrumento y mantenimiento costoso Altas interferencias espectrales Límites de detección altos (As: 50 µg/L y Se: 75 µg/L) ¹⁵ |
| AES-flama | Bajo costo Bajas interferencias espectrales | Altas interferencias de matriz |
| <i>Fundamento:</i> Estas metodologías se basan en la característica que tiene el átomo de emitir la energía radiante equivalente a la cantidad de energía inicialmente absorbida en el proceso de excitación cuando éste regresa a su configuración basal. La concentración del analito es directamente proporcional a la intensidad de la luz emitida a la longitud de onda del elemento por determinarse ¹⁶ | | |

¹³ American Public Health Association (1992) Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, Ediciones Díaz de Santos, 3-38 pag.

¹⁴ American Public Health Association (1992) Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, Ediciones Díaz de Santos, 3-50 pag.

¹⁵ American Public Health Association (1992) Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, Ediciones Díaz de Santos, 3-61 pag.

¹⁶ Beaty R.D. (1979) Conceptos, instrumentación y técnicas de espectrofotometría por absorción atómica. U.S A, Perkin-Elmer, 7-13 pags.

Técnicas electroquímicas

| | | |
|--------------|--|--|
| Polarografía | Bajos límites de detección (1ppm para As) ¹⁷ Alta reproducibilidad Permite la especiación de ambos elementos Puede determinar varios iones en la misma disolución. | Requiere pretratamiento de la muestra Altas interferencias de matriz Equipo costoso Mantenimiento costoso |
|--------------|--|--|

Fundamento: Se basa en la relación que existe entre la intensidad de corriente y la concentración del analito, mediante la aplicación de un potencial.

| | | |
|-----------------------------|--|---|
| Voltametría de redisolución | Alta sensibilidad Bajos límites de detección (1µg/L para As y Se) ¹⁸ Alta reproducibilidad Permite la especiación de ambos elementos Bajas interferencias | Requiere pretratamiento de la muestra Equipo costoso |
|-----------------------------|--|---|

Fundamento: Este método se basa en la preconcentración del metal en el electrodo, ya que al aplicar un potencial específico forma amalgamas o se absorbe en el electrodo. Posteriormente se aplica un barrido de potencial en el que se redisuelve. La corriente producida en el proceso de redisolución es proporcional a la concentración de las especies en la solución original.

¹⁷ Ferri D.;Buldini P.L.;Zini Q. (1980) Differential pulse polarographic determination of inorganic and organic arsenic in natural waters. Mikrochimica Acta, Vol. I, 71-78 pag.

¹⁸ Metrohm (1990) Determination of the total As concentration by stripping voltammetry at the rotating gold electrode. Application Bulletin, No. 226/e, 10pp.

Bond S.B; Briggs M.H; Hughes H.C. (1983) Stripping voltammetry determination of selenium in biological materials by direct calibration. Analytical chemistry, No. 55, 2076-2082 pag.

NORMA OFICIAL MEXICANA. NOM-014-SSA1-1993 "PROCEDIMIENTOS SANITARIOS PARA EL MUESTREO DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PUBLICOS Y PRIVADOS"

FILIBERTO PEREZ DUARTE, Director General de Salud Ambiental, por acuerdo del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, con fundamento en los artículos 39 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 38, fracción II, 45, 46 fracción II y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 8o fracción IV y 25 fracción V del Reglamento Interior de la Secretaría de Salud.

INDICE

- 0 Introducción
- 1 Objetivo y campo de aplicación
- 2 Referencias
- 3 Definiciones
- 4 Material, reactivos y equipo de muestreo
- 5 Preparación de envases para toma de muestra
- 6 Procedimiento para toma de muestra
- 7 Manejo de muestra
- 8 Identificación y control de muestras
- 9 Selección de puntos de muestreo
- 10 Bibliografía
- 11 Observancia de la norma
- 12 Vigencia
- Apendice normativo

0 Introducción

Esta Norma Oficial Mexicana ofrece una guía detallada para el muestreo de agua para uso y consumo humano en los elementos de un sistema de abastecimiento, en los cuales es necesario establecer vigilancia y control en la calidad del agua.

Es necesario aclarar, que siendo las instalaciones de los diferentes sistemas de abastecimiento de una gran diversidad, en ocasiones es necesario aplicar criterios propios por parte del personal de muestreo, para cumplir con los requisitos sanitarios presentados en esta Norma

1 Objetivo y Campo de Aplicación

Esta Norma establece los procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en los sistemas de abastecimiento públicos y privados, incluyendo aspectos bacteriológicos y físico-químicos, así como criterios para manejo, preservación y transporte de muestras.

2 Referencias

NOM-AA-89/1 "Protección al Ambiente, Calidad del Agua-Vocabulario Parte 1".

NOM-AA-89/2 "Protección al Ambiente, Calidad del Agua -Vocabulario Parte 2"

NOM-BB-14 "Clasificación y Tamaños Nominales para Utensilios de Vidrio Empleados en Laboratorio".

NOM-Z-1 "Sistema General de Unidades de Medida - Sistema Internacional de Unidades (SI)".

NOM-Z-13 "Guía para la Redacción, Estructuración y Presentación de las Normas Oficiales Mexicanas"

3 Definiciones

3.1 Muestreo.- Las actividades desarrolladas para obtener volúmenes de agua en un sitio determinado del sistema de abastecimiento, de tal manera que sean representativos, con el propósito de evaluar características físicas, químicas, y/o bacteriológicas.

3.2 Sistema de abastecimiento.- El conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obras de captación, plantas cloradoras, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, cárcamos de bombeo, líneas de conducción y red de distribución

4 Material, Reactivos y Equipo de Muestreo

4.1 Envases para toma de muestra.

4.1.1 Para análisis bacteriológico.- Frascos de vidrio de boca ancha con tapón esmerilado o tapa roscada, o frascos de polipropileno; resistentes a esterilización en estufa o autoclave o bolsas estériles con cierre hermético y capacidad de 125 ó 250 ml.

4.1.2 Para análisis físico-químico.- Envases de plástico o vidrio inertes al agua de 2 l de capacidad como mínimo, con tapones del mismo material que proporcionen cierre hermético.

4.1.3 El material del envase, así como el volumen de muestra requerido y el método de preservación para la determinación de los diferentes parámetros, deben ser los señalados en el Apéndice "A" Normativo.

4.2 Termómetro con escala de -10 a 110°C.

4.3 Potenciómetro o comparador visual para determinación de pH.

4.4 Comparador visual para determinación de cloro residual.

4.5 Hielera con bolsas refrigerantes o bolsas con hielo.

4.6 Agua destilada o desionizada.

4.7 Solución de hipoclorito de sodio con una concentración de 100 mg/l.

4.8 Torundas de algodón

5 Preparación de Envases para Toma de Muestras

5.1 Para análisis bacteriológico

5.1.1 Toma de muestra de agua sin cloro residual.- Deben esterilizarse frascos de muestreo en estufa a 170° C, por un tiempo mínimo de 60 min o en autoclave a 120° C durante 15 min. Antes de la esterilización, con papel resistente a ésta, debe cubrirse en forma de capuchón el tapón del frasco.

5.1.2 Toma de muestra de agua con cloro residual.- Deben esterilizarse frascos de muestreo en estufa a 170° C, por un tiempo mínimo de 60 min o en autoclave a 120° C durante 15 min, los cuales deben contener 0.1 ml de tiosulfato de sodio al 3% por cada 125 ml de capacidad de los mismos. Debe colocarse un papel de protección al tapón del frasco en forma similar a la indicada en 5.1.1.

5.2 Para análisis físico-químico.- Los envases deben lavarse perfectamente y enjuagarse a continuación con agua destilada o desionizada.

6. Procedimiento para Toma de Muestra

6.1 Para análisis bacteriológico.

6.1.1 En bomba de mano o grifo del sistema de distribución.

El agua de los grifos debe provenir directamente del sistema de distribución. No debe efectuarse toma de muestra en grifos que presenten fugas entre el tambor y el cuello, ya que el agua puede correr por la parte exterior del grifo y contaminar la muestra. Deben removerse los accesorios o aditamentos externos como mangueras, boquillas y filtros de plástico o hule antes de tomar la muestra.

6.1.1.1 Debe limpiarse el orificio de salida con una torunda de algodón impregnada de solución de hipoclorito de sodio con una concentración de 100 mg/l.

6.1.1.2 Debe dejarse correr el agua aproximadamente 3 min o hasta asegurarse que el agua que contenían las tuberías ha sido vaciada totalmente.

6.1.1.3 Cerca del orificio de salida, deben quitarse simultáneamente el tapón del frasco y el papel de protección, manejándolos como unidad, evitando que se contaminen el tapón, o el papel de protección, o el cuello del frasco.

6.1.1.4 Debe mantenerse el tapón hacia abajo para evitar contaminación y procederse a tomar la muestra sin pérdida de tiempo y sin enjuagar el frasco; se debe dejar el espacio libre requerido para la agitación de la muestra previa al análisis (aproximadamente 10% de volumen del frasco). Efectuada la toma de muestra, deben colocarse el tapón y el papel de protección al frasco.

6.1.2 En captación de un cuerpo de agua superficial o tanque de almacenamiento.

6.1.2.1 Deben lavarse manos y antebrazos con agua y jabón,

6.1.2.2 Debe quitarse el papel de protección evitando que se contamine, y

6.1.2.3 Sumergir el frasco en el agua con el cuello hacia abajo hasta una profundidad de 15 a 30 cm, abrir y enderezar a continuación con el cuello hacia arriba (en todos los casos debe evitarse tomar la muestra de la capa superficial o del fondo, donde puede haber nata o sedimento y en el caso de captación en cuerpos de agua superficiales, no deben tomarse muestras muy próximas a la orilla o muy distantes del punto de extracción); si existe corriente en el cuerpo de agua, la toma de muestra debe efectuarse con la boca del frasco en contracorriente. Efectuada la toma de muestra debe colocarse el tapón, sacar el frasco del agua y colocar el papel de protección.

En el caso de tanques de almacenamiento, si no es posible la toma de muestra como se indica en este punto, debe procederse como se menciona en 6.1.3.

6.1.3 En pozo profundo.

6.1.3.1 Si el pozo cuenta con grifo para toma de muestra, debe procederse como en 6.1.1.

6.1.3.2 Si el pozo no cuenta con grifo para toma de muestra, debe abrirse la válvula de una tubería de desfogue, dejarse correr el agua por un mínimo de 3 min. y a continuación se procede como en 6.1.1.3 y 6.1.1.4.

6.1.4 En pozo somero o fuente similar.

6.1.4.1 Cuando no es posible tomar la muestra con la extensión del brazo, debe atarse al frasco un sobrepeso usando el extremo de un cordel limpio.

6.1.4.2 Deben quitarse simultáneamente el tapón y el papel de protección, manejándolos como unidad, evitando que se contaminen el tapón, o el papel de protección, o el cuello del frasco.

6.1.4.3 Debe mantenerse el cuello del frasco hacia abajo y se procede a tomar la muestra, bajando el frasco dentro del pozo, y desenrollando el cordel lentamente, evitando que el frasco toque las paredes del pozo.

6.1.4.4 Efectuada la toma de muestra, deben colocarse el tapón y el papel de protección al frasco.

6.2 Para análisis físico-químico.

El volumen de muestra debe tomarse como se indica en el Apéndice "A" Normativo.

6.2.1 En bomba de mano o grifo del sistema de distribución o pozo profundo.

6.2.1.1 Debe dejarse correr el agua aproximadamente por 3 min o hasta asegurarse que el agua que contenían las tuberías ha sido vaciada totalmente.

6.2.1.2 El muestreo debe realizarse cuidadosamente, evitando que se contaminen el tapón, boca e interior del envase; se requiere tomar un poco del agua que se va a analizar, se cierra el envase y agitar fuertemente para enjuagar, desechando esa agua; se efectúa esta operación dos o tres veces, procediendo enseguida a tomar la muestra.

6.2.2 En captación de un cuerpo de agua superficial, tanque de almacenamiento, pozo somero o fuente similar, debe manejarse el envase siguiendo las indicaciones comprendidas en 6.1.2.1, 6.1.2.3, 6.1.3.1 y 6.1.3.2, en su caso.

7 Manejo de Muestras

7.1 Las muestras tomadas como se indican en el punto 6 deben colocarse en hielera con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo para su transporte al laboratorio, de preferencia a una temperatura entre los 4 y 10°C, cuidando de no congelar las muestras.

7.2 El periodo máximo que debe transcurrir entre la toma de muestra y el análisis es:

7.2.1 Para análisis bacteriológico 6 horas.

7.2.2 Para análisis físico-químico, el periodo depende de la preservación empleada para cada parámetro como se indica en el apéndice "A" Normativo.

8 Identificación y Control de Muestras

8.1 Para la identificación de las muestras deben etiquetarse los frascos y envases con la siguiente información:

8.1.1 Número de registro para identificar la muestra, y

8.1.2 Fecha y hora de muestreo.

8.2 Para el control de la muestra debe llevarse un registro con los datos indicados en la etiqueta del frasco o envase referida en el inciso 8.1, así como la siguiente información:

8.2.1 Identificación del punto o sitio de muestreo,

8.2.2 Temperatura ambiente y temperatura del agua,

8.2.3 pH,

8.2.4 Cloro residual,

8.2.5 Tipo de análisis a efectuar,

8.2.6 Técnica de preservación empleada,

8.2.7 Observaciones relativas a la toma de muestra, en su caso, y 8.2.8 Nombre de la persona que realiza el muestreo.

9 Selección de Puntos de Muestreo

La selección de puntos de muestreo debe considerarse individualmente para cada sistema de abastecimiento. Sin embargo, existen criterios que deben tomarse en cuenta para ello. Estos criterios son

9.1 Los puntos de muestreo deben ser representativos de las diferentes fuentes de agua que abastecen el sistema.

9.2 Los puntos de muestreo deben ser representativos de los lugares más susceptibles de contaminación:

9.2.1 Puntos muertos,

9.2.2 Zonas de baja presión,

9.2.3 Zonas con antecedentes de problemas de contaminación,

9.2.4 Zonas con fugas frecuentes,

9.2.5 Zonas densamente pobladas y con alcantarillado insuficiente,

9.2.6 Tanques de almacenamiento abiertos y carentes de protección, y

9.2.7 Zonas periféricas del sistema más alejadas de las instalaciones de tratamiento.

9.3 Debe haber una distribución uniforme de los puntos de muestreo a lo largo del sistema.

9.4 Los puntos se localizarán dependiendo del tipo de sistemas de distribución y en proporción al número de ramales.

9.5 Debe haber como mínimo un punto de muestreo inmediatamente a la salida de las plantas de tratamiento, en su caso.

10 Bibliografía

10.1 Standard Methods for the Examination of Water of Wastewater. Seventeenth Edition. APHA AWWA. WPCF.

10.2 Instructivo para la Vigilancia y Certificación de la Calidad Sanitaria del Agua para Consumo Humano. Comisión Interna de Salud Ambiental y Ocupacional. Secretaría de Salud. 1987.

10.3 Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 2 Organización Panamericana de la Salud. 1987.

11 Observancia de la Norma

11.1 Esta Norma es de observancia obligatoria para los encargados de los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano en sus programas de control de calidad, así como para las autoridades sanitarias competentes en los programas de vigilancia de la calidad del agua.

11.2 La vigilancia del cumplimiento de esta Norma, corresponde a la Secretaría de Salud y a los gobiernos de las entidades federativas en sus respectivos ámbitos de competencia en coordinación con la Comisión Nacional del Agua

12 Vigencia

12.1 La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor con su carácter de obligatorio, al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

Sufragio Efectivo. No Reelección.

México, D.F., a 3 de junio de 1994.- El Director General de Salud Ambiental.- Filiberto Pérez Duarte.- Rúbrica.

APENDICE A NORMATIVO

| DETERMINACION | MATERIAL DE ENVASE | VOLUMEN MINIMO (ml) | PRESERVACION | TIEMPO MAXIMO ALMACENAMIENTO |
|--------------------|--------------------|---------------------|---|------------------------------|
| Alcalinidad total | p,v | 200 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 14 d |
| Arsénico | p,v | 200 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 14 d |
| Bario | p,v | 100 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 28 d |
| Boro | p | 100 | No requiere | 180 d |
| Cianuros | p,v | 1000 | Adicionar NaOH a pH>12, refrigerar de 4 a 10° C en la oscuridad | 14 d |
| Cloro residual | p,v | — | Analizar inmediatamente | — |
| Cloruros | p,v | 200 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 48 h |
| Color | p,v | 100 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 48 h |
| Conductividad | p,v | 200 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 28 d |
| Dióxido de carbono | p,v | 100 | Analizar inmediatamente | — |
| Dureza total | p,v | 100 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 14 d |
| Fenoles | p,v | 300 | Adicionar h2so4 a pH<2 y refrigerar de 4 a 10° C | 28 d |
| Fluoruros | p,v | 300 | Refrigerar de 4 a 10° C | 28 d |
| Fosfatos | v | 100 | Enjuagar el envase con ácido nítrico 1:1 Refrigerar de 4 a 10° C | 48 h |
| Magnesio | p,v | 100 | Refrigerar de 4 a 10° C | 28 d |
| Metales en general | p,v | 1000 | Enjuagar el envase con HNO3 1 + 1, adicionar HNO3 a pH<2 para metales disueltos, filtrar inmediatamente y adicionar | 180 d |

| | | | HNO ₃ a pH<2 | |
|-------------------------------------|-----|------|--|------|
| Nitratos | p,v | 100 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 48 h |
| Nitritos | p,v | 100 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 48 h |
| Nitrógeno amoniacal | p,v | 500 | Adicionar H ₂ SO ₄ a pH<2 y refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 28 d |
| Nitrógeno orgánico | p,v | 500 | Adicionar H ₂ SO ₄ a pH<2 refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 28 d |
| Olor | — | — | Detectar inmediatamente | — |
| Oxígeno consumido en medio ácido | p,v | 300 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 48 h |
| pH | p,v | — | Analizar inmediatamente | — |
| Plaguicidas | s | 1000 | Refrigerar de 4 a 10° C, adicionar 1000 mg/l, de ácido ascórbico, si se detecta cloro residual. Extraídos los plaguicidas con solventes el tiempo de almacenamiento máximo será 40 días | 7 d |
| Sabor | — | — | Detectar inmediatamente | — |
| Sodio | p,v | 100 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 28 d |
| Sólidos | p,v | 1000 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 7 d |
| Sulfatos | p,v | 100 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 28 d |
| Sustancias activas al azul metileno | p,v | 200 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 48 h |
| Temperatura | p,v | — | Determinar inmediatamente | — |
| Trihalometanos | s | 25 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | |
| Turbiedad | p,v | 100 | Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad | 48 h |

p plástico

pH potencial de hidrogeno

s vidrio enjuagado con solventes orgánicos, interior de la tapa del envase recubierta con trflón

v vidrio

APÉNDICE 1. Métodos empleados para evaluar la calidad fisicoquímica del agua

1.1 Determinación de pH

EQUIPO

Potenciómetro portátil Hach modelo EC10

Agitador magnético

Plato de agitación.

MATERIAL

Matraces aforados de 100 mL

Piseta

Papel absorbente.

Termómetro de 0 a 100°C

Vasos de precipitados de 100 mL

REACTIVOS.

Reactivo para buffer de pH=4 marca Metrepack

Reactivo para buffer de pH=7 marca Metrepack

Reactivo para buffer de pH=9 marca Metrepack

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES

- *Solución reguladora patrón pH=4*

En un matraz aforado de 100 mL vaciar el contenido de la cápsula que contiene el reactivo para buffer de pH=4. Agregar 50 mL de agua nanopura, agitar hasta disolución y aforar a 100 mL con agua nanopura.

- *Solución reguladora patrón pH=7*

En un matraz aforado de 100 mL vaciar el contenido de la cápsula que contiene el reactivo para buffer de pH=7. Agregar 50 mL de agua nanopura, agitar hasta disolución y aforar a 100 mL con agua nanopura.

◦ *Solución reguladora patrón pH=9*

En un matraz aforado de 100 mL vaciar el contenido de la cápsula que contiene el reactivo para buffer de pH =9. Agregar 50 mL de agua nanopura, agitar hasta disolución y aforar a 100 mL con agua nanopura.

El medidor de pH se calibró conforme a las especificaciones del fabricante, con las soluciones reguladoras con pH de 4, 7 y 9, dependiendo del pH estimado para cada muestra. Así mismo, se toma la temperatura de cada muestra y se mete dicha información al potenciómetro para que la tome en cuenta durante las mediciones.

PROCEDIMIENTO

- 1) Enjuagar el electrodo con agua nanopura y secarlo con el papel.
- 2) Enjuagar el vaso de precipitados con un poco de la muestra.
- 3) Vaciar aproximadamente 50 mL de muestra en el vaso.
- 4) Introducir el electrodo dentro de la muestra, la cual deberá estar en agitación.
- 5) Esperar a que se establezca la lectura
- 6) Registrar el valor de pH en la bitácora.

1.2 Determinación de la conductividad

EQUIPO

Conductímetro marca Conductronic CL8

MATERIAL

Tubo de centrifuga de plástico de 25 mL

Termómetro de 0 a 100°C

Agitador magnético

Plato de agitación.

Piseta

Papel absorbente.

REACTIVOS.

Solución estándar de cloruro de potasio marca Cole-Parmer con conductividad de 1413 μS a 25°C

Agua destilada y desionizada (nanopura).

El conductímetro se calibra siguiendo las instrucciones del fabricante con la solución estándar de KCl

PRODEDIMIENTO

- 1) Lavar el electrodo con agua nanopura y secarlo con el papel.
- 2) Enjuagar el tubo de centrifuga con la muestra.
- 3) Vaciar aproximadamente 15 ml de muestra en el tubo.
- 4) Introducir el electrodo dentro del tubo.
- 5) Esperar a que se estabilice la lectura.
- 6) Anotar el valor de la conductividad en la bitácora.

1.3 Determinación de fosfatos (Método del ácido ascórbico No. 8048, Hach)

EQUIPO

Balanza analítica digital Sartorius R200D

Espectrofotómetro Hach DR/200

Estufa Felisa 243

MATERIAL

Celdas

Probeta de 50 mL

Cronómetro

Piseta

Papel especial para celdas

Tijeras

Tapones de hule

Piseta

Matraces aforados de 100 mL

Cápsula de porcelana

Desecador

Vaso de precipitados de 100 mL

Agitador de vidrio

Pipetas volumétricas de 1 y 10 mL

Propipeta

REACTIVOS

Reactivo PhosVer 3 de Hach (No. cat 2125-99)

Agua nanopura

Fosfato monobásico de potasio (KH_2PO_4) grado analítico

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES.

- *Solución madre de fosfatos (1000 mg/L)*

Colocar aproximadamente 300 mg de K_3PO_4 en una cápsula de porcelana y meterla a secar en la estufa a $110^\circ\text{-}130^\circ\text{C}$ durante 2 horas. Dejar enfriar la cápsula dentro de un desecador. Pesar en la balanza 223.2 mg de fosfato de potasio dentro de un vaso de precipitados de 100 mL. Agregar 50 mL de agua, agitar hasta disolución. Vaciar la solución en el matraz aforado y aforar hasta la marca.

- *Solución estándar de fosfatos (10 mg/L)*

Tomar, con una pipeta volumétrica, 1 mL de la solución madre de fosfatos (1000 mg/L) y colocarla en el matraz aforado de 100 mL. Aforar hasta la marca con agua nanopura.

- *Solución estándar de fosfatos (1 mg/L)*

Tomar, con la pipeta volumétrica, 10 mL de la solución estándar de fosfatos (10 mg/L) y colocarlo en el matraz aforado de 100 mL. Aforar hasta la marca con agua nanopura.

Para verificar la calibración se realiza una prueba previa de exactitud utilizando la solución estándar de fosfatos de 1.0 mg /L, analizándola de la misma manera que una muestra. El intervalo de trabajo de este método es de 0 a 2.5 mg/L.

PROCEDIMIENTO

- 1) Con las teclas del espectrómetro de Hach introducir el No. 490 para activar el programa del método del ácido ascórbico.
- 2) Ajustar la longitud de onda hasta 890 nm.
- 3) Presionar la tecla ENTER hasta que en la pantalla aparezca el letrero de mg/L de PO_4^{3-}
- 4) Llenar la celda con 25 mL de muestra.
- 5) Añadir el contenido del sobre con el reactivo PhosVer 3 en la celda con la muestra.
- 6) Agitar y dejar reposar 2 minutos.
- 7) Mientras tanto llenar otra celda con 25 ml de muestra (blanco).
- 8) Colocar el blanco en el receptor de celdas, cerrar con el protector de luz y pulsar ZERO.
- 9) Pasados los 2 minutos colocar la muestra preparada en el contenedor de celdas, cerrar con el protector de luz y pulsar ENTER.
- 10) Anotar los resultados registrados en la pantalla.
- 11) Realizar cada muestra por duplicado.

NOTA: Si la concentración de fosfatos es superior a 2.5 mg/L realizar una dilución de tal manera que la concentración a medir se encuentre dentro del intervalo de trabajo (0-2.5 mg/L) y vuelva a medir.

CÁLCULOS

El colorímetro de Hach despliega en la pantalla la concentración total de fosfatos (mg/L) de la muestra sin necesidad de realizar ningún cálculo.

1.4 Determinación de nitratos (Método de reducción con cadmio, No. 8039, Hach)

EQUIPO

Balanza analítica digital Sartorius R200D

Espectrómetro Hach DR/200

Estufa Felisa 243

MATERIAL

Celdas

Probeta de 50 mL

Cronómetro

Piseta

Papel especial para celdas

Tijeras

Tapones de hule

Piseta

Matraces aforados de 100 mL

Cápsula de porcelana

Desecador

Vaso de precipitados de 100 mL

Agitador de vidrio

Pipetas volumétricas de 1 y 10 mL

Propipeta

REACTIVOS

Agua nanopura

Nitrato de potasio anhidro (KNO_3), grado analítico

Reactivo Nitra Ver 5 de Hach (No. cat 14034-66)

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES

- *Solución madre de nitratos (1000 mg/L).*

Pesar aproximadamente 1 g de KNO_3 , colocarlo en la cápsula de porcelana y meterlo a la estufa a 105°C por 24 horas, enfriar en un desecador. Pesar 0.7218 g de nitrato de potasio anhidro y diluir a 100 mL con agua nanopura.

- *Solución estándar de nitratos (10 mg/L)*

Tomar 1 mL de la solución madre de nitratos con la pipeta volumétrica y vaciarlo en un matraz volumétrico de 100 mL. Aforar con agua nanopura.

Para verificar la calibración se realiza una prueba previa de exactitud utilizando una solución estándar de nitratos a 10 mg /L analizándola de la misma manera que una muestra. El intervalo de trabajo de este método es de 0 a 30 mg/L

PROCEDIMIENTO

- 1) Con las teclas del espectrómetro de Hach introducir el No. 355 para activar el programa del método del ácido ascórbico.
- 2) Ajustar la longitud de onda hasta 500 nm.
- 3) Presionar la tecla ENTER hasta que en la pantalla aparezca el letrero de mg/L de NO_3^- .
- 4) Llenar la celda con 25 mL de muestra.
- 5) Añadir el contenido del sobre con el reactivo NitraVer 5 en la celda con la muestra.
- 6) Agitar vigorosamente durante 1 minuto.
- 7) Dejar reposar 5 minutos.
- 8) Mientras tanto se debe llenar otra celda con 25 ml de muestra (blanco).
- 9) Colocar el blanco en el receptor de celdas, cierre con el protector de luz y pulse ZERO.
- 10) Pasados los 5 minutos, colocar la muestra preparada en el contenedor de celdas, cerrar con el protector de luz y pulsar ENTER.
- 11) Anotar los resultados registrados en la pantalla.
- 12) Realizar cada muestra por duplicado.

NOTA: Si la concentración de fosfatos es superior a 30 mg/L diluya la muestra hasta que la muestra entre en el intervalo de trabajo (0-30 mg/L) y vuelva a analizar.

CÁLCULOS

El colorímetro de Hach despliega en la pantalla la concentración total de nitratos (mg/L) sin necesidad de realizar ningún cálculo.

1.5 Determinación de alcalinidad

EQUIPO

Potenciómetro Beckman 720

Estufa Felisa 243

Balanza analítica digital Sartorius R200D

MATERIAL

Buretas de 25 ml con divisiones de 0.1 mL

Cápsula de porcelana

Desecador

Matraces Erlenmeyer de 250 mL

Matraces aforados de 100 mL

Matraz aforado de 1000 mL

Probeta de 100 mL

Piseta

Pipeta de émbolo (5-10 mL)

Puntas para pipeta de émbolo

Plato caliente

Vaso de precipitados de 100 mL

Vidrio de reloj

REACTIVOS

Ácido clorhídrico (HCl) concentrado 36 a 37% de pureza, densidad a 20-24°C (1.174-1.18 g/mL⁹)

Agua nanopura

Carbonato de sodio (Na₂CO₃) grado analítico

Reactivo para buffer de pH=4 marca Metrepack

Reactivo para buffer de pH=7 marca Metrepack

Reactivo para buffer de pH=9 marca Metrepack

Preparación de soluciones

- *Solución reguladora patrón pH=4*

En un matraz aforado de 100 mL vaciar el contenido de la cápsula que contiene el reactivo para buffer de pH=4. Agregar 50 mL de agua nanopura, agitar hasta disolución y aforar a 100 mL con agua nanopura..

- *Solución reguladora patrón pH=7*

En un matraz aforado de 100 mL vaciar el contenido de la cápsula que contiene el reactivo para buffer de pH=7. Agregar 50 mL de agua nanopura, agitar hasta disolución y aforar a 100 mL con agua nanopura.

- *Solución reguladora patrón pH=9*

En un matraz aforado de 100 mL vaciar el contenido de la cápsula que contiene el reactivo para buffer de pH =9. Agregar 50 mL de agua nanopura, agitar hasta disolución y aforar a 100 mL con agua nanopura.

- *Solución de carbonato de sodio 0.5 N*

Secar de 3 a 5 g de carbonato de sodio y colocarlo en la estufa a 250°C durante 4 horas y dejar enfriar en un desecador. Pesar 2.5 g y transferirlos a un matraz volumétrico de 1000 mL, llevar a la marca, disolver y mezclar, no deberá guardarse más de una semana.

- *Solución de HCl 0.1 N*

Diluir 8.3 mL de ácido clorhídrico en 1 L de agua nanopura. Estandarizar con 40 ml de solución de carbonato de sodio 0.5 N con aproximadamente 60 mL de agua nanopura en un vaso y titular con potenciómetro a un pH alrededor de 5.

Sacar el electrodo, enjuagarlo dentro del mismo vaso y hervir suavemente por 3 o 5 tapando con un vidrio de reloj, enfriar a temperatura ambiente, enjuagar el vidrio de reloj dentro del vaso y terminar la titulación al pH del punto de inflexión, pH=4.6

Cálculo de la normalidad

$$N = \frac{A * B}{53 * C}$$

A= gramos de Na_2CO_3 pesados en el matraz de 1000 mL

B= mL de solución de Na_2CO_3 tomados para la titulación.

C= mL de ácido usados

PROCEDIMIENTO

- 1) Lavar un matraz Erlenmeyer de 250 mL, una probeta de 100 mL, una bureta de 25 mL y un magneto.
- 2) Enjuagar este material con abundante agua destilada.
- 3) Enjuagar el matraz Erlenmeyer y la probeta con porciones de aproximadamente 50 mL de la muestra a analizar.
- 4) Medir 100 mL de muestra con la probeta y vaciarlos al matraz Erlenmeyer. Introducir el magneto en la muestra y colocar el matraz sobre un agitador magnético.
- 5) Enjuagar la bureta con la solución de HCl 0.1 N y llenarla con esta solución para titular muestras.
- 6) Enjuagar el electrodo del potenciómetro con agua destilada y secarlo con papel absorbente.
- 7) Calibrar el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras de 7 y 10 siguiendo las instrucciones del equipo.
- 8) Introducir el electrodo en el Erlenmeyer conteniendo la muestra a titular y registrar el valor del pH inicial de la muestra.
- 9) Si el pH inicial de la muestra es mayor a 8.3, añadir desde la bureta la solución de HCl agitando permanentemente, hasta llegar a pH 8.3 y registrar el volumen de solución requerido. Se debe parar la agitación en el momento de la lectura. Las muestras requieren a veces pequeños volúmenes de solución ácida, agitando

constantemente. Este volumen de titulación corresponde a los carbonatos presentes en la muestra.

- 10) Si el pH inicial de las muestras está entre 8.3 y 4.3, titular la muestra con la solución de HCl y agitando permanentemente hasta llegar a pH 4.3 y registrar el volumen del ácido requerido. Añadir por gotas cuando el pH esté próximo al valor de 4.3 agitando siempre. Este volumen de titulación corresponde a los bicarbonatos presentes en la muestra.
- 11) Reportar en la bitácora de datos de laboratorio, la siguiente tabla:

Parámetro: Alcalinidad

Analista:

Fecha:

| Muestra | Temp | pH inicial | mL de HCl | mL HCl |
|----------|------|------------|-----------|----------|
| Cod. Lab | °C | | a pH 8.3 | a pH 4.3 |

- 12) Realizar un duplicado por cada muestra.

CÁLCULOS

Usar la normalidad del HCl para realizar los cálculos siguientes:

$\text{mg de CaCO}_3 / \text{L} = (N \cdot 50\,000 \cdot B) / \text{mL de muestra}$

$\text{mg de HCO}_3^- = (N \cdot 61\,017 \cdot B) / \text{mL de muestra}$

Donde:

N= Normalidad del HCl

B= mL de solución de HCl tomados para la titulación hasta un pH de 8.3

1.6 Determinación de cloruros

EQUIPO

Balanza analítica digital Sartorius R200D

Estufa Felisa 243

MATERIAL

Agitador y barra magnética

Bureta de 50 mL

Espátula

Frasco ámbar

Goteros

Matraz aforado de 250 mL

Matraces aforados de 1000 mL

Matraces Erlenmeyer de 100 mL

Papel pH

Pipetas Pasteur

Pipeta volumétrica de 1 mL

Pipeta graduada (1-5 mL)

Piseta

Probeta de 100 mL

Vasos de precipitados de 100 mL

Vasos de precipitados de 300 mL

REACTIVOS

Agua nanopura

Ácido sulfúrico (H_2SO_4) 98% pureza y gravedad específica a 20-24°C 1.836 g/mL

Cromato de potasio (K_2CrO_4) grado analítico

Cloruro de sodio (NaCl) grado analítico

Lunetas de hidróxido de sodio, grado analítico

Nitrato de plata (AgNO_3) grado analítico

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES

- *Solución indicadora de cromato de potasio*

Disolver 12.5 g de K_2CrO_4 en un poco de agua nanopura. Añadir $AgNO_3$ hasta que el inicio de la formación de un precipitado rojo. Dejar reposar la solución 12 h, filtrar y aforar a 250 mL.

- *Solución estándar de cloruro de sodio (NaCl) 0.0141 M*

Pesar 824,1 mg de NaCl, previamente secado a 140°C por dos horas, disolver en agua y aforar a 1000 mL.

- *Solución valorada de nitrato de plata ($AgNO_3$) 0.0141 M*

Disolver 2.395 de $AgNO_3$ en agua y aforar a 1000 mL, conservar en frascos color ámbar.

Para valorar esta solución se mide un volumen de 10 a 20 mL de solución estándar de cloruro de sodio 0.0141 M. Agregar agua hasta completar un volumen de 100 mL y agregar 1 mL de solución indicadora de cromato de potasio. Titular con la solución de nitrato de plata hasta un vire de amarillo a rojo ladrillo.

Calcular la molaridad de la solución de nitrato de plata por medio de la siguiente fórmula:

$$N_{AgNO_3} = \frac{V_1 * N_1}{V_2}$$

Donde:

V_1 = Volumen de solución estándar de cloruro de sodio empleado en la titulación.

N_1 = Normalidad de la solución de cloruro de sodio = 0.0141

V_2 = Volumen de la solución de nitrato de plata empleado en la titulación.

NOTA: Hacer un mínimo de 3 titulaciones y tomar un promedio de las normalidades resultantes.

- *Solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1 M*

Disolver con agua 4 g de NaOH y aforar a 100 mL.

- *Solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0.5 M*

En un vaso de precipitados vaciar 50 mL de agua nanopura. Agregar 2.7 mL de ácido sulfúrico concentrado y mezclar. Tenga cuidado, ya que esta reacción es exotérmica. Vaciar el contenido del vaso de precipitados a un matraz aforado de 100 mL y llenar hasta la marca con agua nanopura.

PROCEDIMIENTO

- 1) Titular directamente las muestras que se encuentre en el intervalo de pH de 7-10. Si la muestra no se encuentra en este intervalo ajustar la solución de ácido sulfúrico 0.5 M o sosa 1M.
- 2) Enjuagar el matraz Erlenmeyer con aproximadamente 10 mL de muestra.
- 3) Utilizando la probeta vaciar 50 ml de muestra al Erlenmeyer y añada 1 mL de la solución indicadora de K₂CrO₄.
- 4) Titular con el estándar de nitrato de plata hasta que un color amarillo-rosado. Sea consistente en el punto de finalización con el resto de las muestras.
- 5) Realizar la titulación del blanco utilizando agua destilada.
- 6) Calcular la cantidad de cloruros en la muestra utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{mg Cl}^{-}/\text{L} = \frac{(A-B) * N * 35\,450}{\text{mL de muestra}}$$

Donde:

A = mL de AgNO₃ gastados en la muestra

B = mL de AgNO₃ gastados en el blanco

N = normalidad del nitrato de plata

- 7) Realizar un duplicado para cada muestra.

NOTA: La alícuota puede variar dependiendo de la concentración de Cl en la muestra, a mayor concentración deberá ser menor los mL de muestra tomados, para evitar el gasto excesivo del estándar de nitrato de plata.

1.7 Determinación de sulfatos (Método turbidimétrico)

EQUIPO

Balanza analítica digital Sartorius R200D

Espectrómetro varian modelo Cary 3E

MATERIAL

Agitador y barra magnética

Cronómetro

Cuchara medidora (con capacidad de 0.2-0.3 mg)

Celdas de cuarzo

Espátula

Matraces aforados de 1000 mL

Matraces aforados de 100 mL

Matraz Erlenmeyer de 250 mL

Papel absorbente

Piseta

Pipeta volumétrica de 20 mL

Pipeta volumétrica de 10 mL

Pipeta volumétrica de 2 mL

Pipetas volumétricas de 1, 5, 10, 20 mL

Probeta de 100 mL

Propipeta

REACTIVOS

Agua nanopura

Acetato de sodio ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), grado analítico

Ácido acético (pureza = 99%)

Cloruro de bario (BaCl_2), grado analítico

Cloruro de magnesio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$), grado analítico

Nitrato de potasio (KNO_3), grado analítico

Sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4), grado analítico

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES.

- *Solución estándar de sulfatos (100 mg/L)*

Pesar 147.9 mg de sulfato de sodio anhidro. Disolver en 100 mL de agua nanopura. Vaciar en un matraz aforado de 1000 mL y completar con agua nanopura hasta la marca.

- *Solución buffer A (requerida para muestras con concentraciones mayores a 10 mg/L)*

Disolver 30 g de cloruro de magnesio $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$, 5 g de acetato de sodio $CH_3COONa \cdot 3H_2O$, 1 g de nitrato de potasio y 20 mL de ácido acético (99%) en 500 mL de agua nanopura, agite y afore a 1000 mL.

- *Solución buffer B (requerida para muestras con concentraciones menores a 10 mg/L)*

Disolver 30 g de cloruro de magnesio $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$, 5 g de acetato de sodio $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ (99%), 1 g de KNO_3 , 0.111g de sulfato de sodio y 20 mL de ácido acético (99%) en 500 mL de agua destilada, agite y afore a 1000 mL.

PREPARACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN

Tomar volúmenes de la solución estándar de sulfatos (100 mg/L) de acuerdo a la tabla siguiente, aforar a 100 mL con agua nanopura y tratarlas como se describe en el procedimiento.

| Concentración de sulfatos (mg/L) | mL de solución |
|----------------------------------|----------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 5 |
| 10 | 10 |
| 15 | 15 |
| 20 | 20 |
| 30 | 30 |
| 40 | 40 |

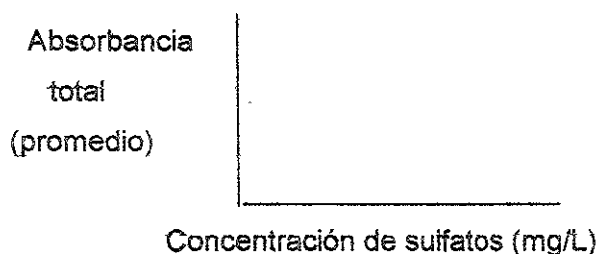
NOTA: El método es válido en un intervalo de trabajo de 0-40 mg/L. Nunca hacer curvas de calibración con soluciones estándares de concentraciones mayores a 40 mg/L. En caso de tener alguna muestra que se salga de la curva de calibración, se deben realizar las diluciones necesarias para que caiga dentro de dicho intervalo.

PROCEDIMIENTO

- 1) Medir 100 mL de muestra con la probeta y vaciarlo al matraz Erlenmeyer. Añadir 2 mL del buffer y agite.
- 2) Vaciar un poco de la muestra con buffer en una celda de cuarzo. Anotar la absorbancia a una longitud de onda de 420 nm (blanco).
- 3) Colocar el matraz de nuevo en el agitador y agregar una cucharadita de BaCl_2 . Mantenga la agitación por 1 minuto.
- 4) Una vez transcurrido el minuto se deja reposar la muestra durante 5 minutos y se mide la absorbancia de nuevo en el espectrómetro a 420 nm. Anotar los resultados.
- 5) Realizar cada determinación por triplicado.

CÁLCULOS

Calcule el promedio de las absorbancias de cada muestra, tanto en el blanco, como en la muestra adicionada con cloruro de bario. Grafique las lecturas de absorbancia total (Absorbancia de la muestra adicionada - blanco) de los estándares de la curva de calibración contra las concentraciones de sulfatos, de la siguiente manera:



Realice la regresión lineal de la curva de calibración y anote la ecuación de la curva.

Calcule la concentración de sulfatos de las muestras con base en la siguiente fórmula:

$$\text{mg SO}_4^{2-}/\text{L} = (((A-B) - b) / m) * F$$

Donde:

A = absorbancia promedio de la muestra adicionada

B = absorbancia promedio del blanco

b = ordenada al origen de la curva de calibración

m = pendiente de la curva de calibración

F = factor de dilución, este factor es 1 cuando no se hizo ninguna dilución de la muestra, en caso contrario F = volumen final / volumen de la muestra

1.8 Determinación de sodio y potasio (Flamometría)

EQUIPO

Estufa Felisa 243

Balanza analítica digital Sartorius R200D

Flamómetro Corning 400

MATERIAL

Agitador de vidrio

Espátula

Filtros para Na y K

Matraces volumétricos de 1000 mL

Matraces volumétricos de 100 mL

Matraces volumétricos de 50 mL

Pipeta automática (100 μL - 1000 μL)

Pipeta automática (1-5 mL)

Piseta

Puntas para pipeta automática (100 μL - 1000 μL)

Puntas para pipeta automática (1-5 mL)

Vasos de precipitados de 300 mL

Vasos de precipitados de 100 mL

REACTIVOS

Agua nanopura

Cloruro de sodio (NaCl), grado analítico

Cloruro de potasio (KCl), grado analítico

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES

◦ *Solución estándar de 1000 mg/L de Na*

Pesar 2.543 g de NaCl, previamente secado en la estufa a 110°C durante 3 horas. Diluir en un vaso de precipitados con 250 mL de agua nanopura. Vaciar el contenido del vaso en un matraz aforado de 1000 mL y aforar con agua nanopura.

◦ *Solución estándar de 1000 mg/L de K*

Pesar 1.908 mg de KCl, previamente secado en la estufa a 110°C durante 3 horas. Diluir en un vaso de precipitados con 250 mL de agua nanopura. Vaciar el contenido del vaso en un matraz aforado de 1000 mL y aforar con agua nanopura.

CURVA DE CALIBRACIÓN

La concentración de los estándares para la curva de calibración se estiman dependiendo la concentración esperada de Na y K para las muestras. Para empezar se puede estimar la concentración aproximada de las muestras realizando una curva de calibración en un intervalo de 3-100 mg/L de Na o K. En caso de exceder las 100 mg/L se debe hacer una dilución de la muestra y en caso de ser menor a 3 mg/L no se puede utilizar éste método para cuantificar dichos elementos.

Para la preparación de 50. mL de cada una de las soluciones estándar de la curva de calibración se aplica la siguiente fórmula:

$$V_1 = 0.05 * C_2$$

Donde:

V_1 = volumen de la solución estándar de 1000 mg/L

C_2 =concentración deseada de la solución estándar de la curva de calibración

Estas soluciones se tratan de la misma manera que las muestras.

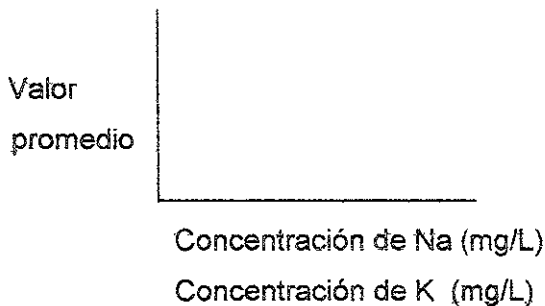
PROCEDIMIENTO

- 1) Seleccionar el filtro del flamómetro dependiendo si se va a medir Na o K.
- 2) Colocar en un vaso de precipitados, previamente enjuagado con la muestra, 50 mL de ésta.
- 3) Colocar la muestra en la entrada para muestra del flamómetro.
- 4) Esperar a que la aguja del flamómetro se estabilice y anotar el resultado.
- 5) Realizar las mediciones por duplicado.

NOTA: El combustible que se utiliza para este análisis es propano.

CÁLCULOS

Calcule el promedio de las lecturas de cada muestra. Grafique el valor promedio de las lecturas de los estándares de la curva de calibración contra las concentraciones de Na o K, de la siguiente manera:



Realice la regresión lineal de la curva de calibración y anote la ecuación de la curva.

Calcule la concentración de Na o K de las muestras con base en la siguiente fórmula:

$$\text{mg Na}^+/\text{L} = ((A - b) / m) * F$$

$$\text{mg K}^+/\text{L} = ((A - b) / m) * F$$

Donde:

A = valor promedio de la muestra

b = ordenada al origen de la curva de calibración

m= pendiente de la curva de calibración

F = factor de dilución, este factor es 1 cuando no se hizo ninguna dilución de la muestra, en caso contrario $F = \text{volumen final} / \text{volumen de la muestra}$

1.9 Determinación de magnesio y calcio

EQUIPO

Espectrómetro de Absorción Atómica Marca Varian, Modelo SpectrAA 110.

Lámpara de cátodo hueco de calcio y magnesio codificada.

Programa SpectrAA.

Compresor de aire

Acetileno y óxido nitroso grado absorción atómica con reguladores apropiados.

Computadora con monitor

Campana extractora de gases

Parrilla de calentamiento

MATERIAL

Matraz volumétrico de 1000 mL

Matraces volumétricos de 100 mL

Matraces volumétricos de 50 mL

Pipeta automática (0.1 a 1 mL)

Pipeta automática (1 a 5 mL)

Puntas para pipeta automática

Pipeta volumétrica de 10 mL

Piseta

Probeta graduado de 250 mL

Vaso de precipitados de 500 mL

REACTIVOS

Agua nanopura

Solución estándar de Ca de 1000 mg/L marca Accustandard

Solución estándar de Mg de 1000 mg/L marca Accustandard

Óxido de lantano (La_2O_3), grado analítico.

HCl concentrado (pureza 37%)

PREPARACIÓN DE LOS SOLUCIONES

- *Solución estándar de Ca (10 mg/L)*

Con una pipeta volumétrica tomar 1 mL de la solución estándar de Ca (1000 mg/L) y vaciarlo en un matraz aforado de 100 mL. Agregar agua nanopura hasta la marca.

- *Solución estándar de Mg (10 mg/L)*

Con una pipeta volumétrica tomar 1 mL de la solución estándar de Mg (1000 mg/L) y vaciarlo en un matraz aforado de 100 mL. Agregar agua nanopura hasta la marca.

- *Solución de óxido de lantano.*

Disolver 58.65 g de La_2O_3 en 250 mL de HCl concentrado de la siguiente manera. En un vaso de precipitados agregar aproximadamente 50 mL de agua nanopura. Añadir el óxido de lantano y adicionar el ácido lentamente hasta disolver. Vaciar el contenido del vaso de precipitados en un matraz aforado y llevar a 1000 mL con agua nanopura.

ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO

| Elemento | Ancho de ventana | Longitud de onda | Combustible para la flama | Flujo de entrada de la muestra |
|----------|------------------|------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Ca | 0.5 nm | 422.7 nm | Oxido nitroso-acetileno | 7 mL/min |
| Mg | 0.5 nm | 285.2 nm | Aire-acetileno | 7 mL/min |

- Tiempo de retardo: 40 seg.
- Número de lecturas por solución: 3.
- Calentar la lámpara 30 minutos antes de operar el equipo.

CURVA DE CALIBRACIÓN

Calcio

Tomar volúmenes de la solución estándar de 10 mg/L como se muestra en la siguiente tabla, diluir con agua a 50 mL, tratarlas como se describe en el procedimiento y graficar las lecturas obtenidas contra las concentraciones de calcio.

| mg Ca ²⁺ / L | mL de la solución estándar (10 mg/L) |
|-------------------------|--|
| 0 | 0 |
| 0.1 | 0.5 |
| 0.5 | 2.5 |
| 1.0 | 5 |
| 1.5 | 7.5 |
| 2.0 | 10 |
| 2.5 | 12.5 |
| 3.0 | 15 |

Magnesio

Tomar volúmenes de la solución estándar de 10 mg/L como se muestra en la siguiente tabla, diluir con agua a 50 mL, tratarlas como se describe en el procedimiento y graficar las lecturas obtenidas contra las concentraciones de magnesio.

| mg Mg ²⁺ / L | mL de la solución estándar (10 mg/L) |
|-------------------------|--|
| 0 | 0 |
| 0.1 | .5 |
| 0.2 | 1.0 |
| 0.3 | 1.5 |
| 0.4 | 2.0 |
| 0.5 | 2.5 |
| 0.6 | 3.0 |
| 0.7 | 3.5 |
| 0.8 | 4.0 |
| 0.9 | 4.5 |
| 1.0 | 5.0 |

PROCEDIMIENTO

- 1) Enjuagar un matraz volumétrico de 50 mL con la muestra a analizar.
- 2) Agregar 5 mL de la solución de óxido de lantano al matraz volumétrico con la pipeta volumétrica.
- 3) Aforar el matraz volumétrico con la muestra. Mezcle.
- 4) Colocar la muestra en la manguera de entrada de muestra en el espectrómetro de absorción atómica.
- 5) Esperar hasta que el aparato tome la lectura de la muestra.
- 6) Introducir la manguera de entrada de la muestra en agua destilada durante unos 5 segundos, al final de dicho tiempo, la punta.
- 7) Realizar cada determinación por duplicado.

NOTA: La pendiente de la curva se verifica cada cinco muestras.

CÁLCULOS

La concentración de magnesio y calcio se toma directamente del equipo y se aplica el factor de dilución para el cálculo de la concentración final en mg/L.

$$\text{mg Ca}^{2+}/\text{L} = C * F$$

$$\text{mg Mg}^{2+}/\text{L} = C * F$$

Donde:

C = concentración tomada del aparato

F = factor de dilución

Apéndice 2. Balance iónico de las muestras de agua subterráneas.

Muestra: 18

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|------------|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 63 |
| Bicarbonatos | 411.85 | 61.0171 | 6.7498 | 12 |
| Cloruros | 46.16 | 35.4527 | 1.3019 | 19 |
| Sulfatos | 95.55 | 48.0318 | 1.9893 | 6 |
| Nitratos | 42.5 | 62.0049 | 0.6856 | 0 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 10.7291 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|--------|---------|--------|------------|
| Sodio | 24 | 22.9897 | 1.0439 | 11 |
| Potasio | 1.7 | 39.0983 | 0.0435 | 0 |
| Calcio | 130.85 | 20.0390 | 6.5298 | 69 |
| Magnesio | 22.00 | 12.1525 | 1.8103 | 19 |
| | | | <hr/> | |
| | | | 9.4275 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 915
 Rango de 8.24 10.065 meq/L
 Aniones 10.73
 Cationes 9.43
 % diferencia -6.46
 Balan. Iónico

Muestra: 153

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|------------|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 348.37 | 61.0171 | 5.7094 | 43 |
| Cloruros | 55.34 | 35.4527 | 1.5609 | 12 |
| Sulfatos | 236.80 | 48.0318 | 4.9301 | 37 |
| Nitratos | 59.3 | 62.0049 | 0.9569 | 7 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 13.1626 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|--------|---------|---------|------------|
| Sodio | 56 | 22.9897 | 2.4359 | 16 |
| Potasio | 3.3 | 39.0983 | 0.0844 | 1 |
| Calcio | 220.43 | 20.0390 | 11.0000 | 72 |
| Magnesio | 21.00 | 12.1525 | 1.7280 | 11 |
| | | | <hr/> | |
| | | | 15.2484 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1382
 Rango de 12.4 15.202 meq/L
 Aniones 13.16
 Cationes 15.25
 % diferencia 7.34
 Balan. Iónico

Muestra: 155

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 373.14 | 61.0171 | 6.1154 | 39 |
| Cloruros | 102.61 | 35.4527 | 2.8943 | 18 |
| Sulfatos | 283.30 | 48.0318 | 5.8982 | 37 |
| Nitratos | 58.7 | 62.0049 | 0.9462 | 6 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 15.8594 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 8122.9897 | 3.5233 | 23 | |
| Potasio | 2.339.0983 | 0.0588 | 0 | |
| Calcio | 191.3720.0390 | 9.5499 | 63 | |
| Magnesio | 26.0512.1525 | 2.1436 | 14 | |
| | | | <hr/> | |
| | | | 15.2756 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1625
Rango de 14.6 17.875
meq/L
Aniones 15.86
Cationes 15.28
% diferencia -1.88
Balan. Iónico

Muestra: 159

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 359.21 | 61.0171 | 5.8870 | 55 |
| Cloruros | 70.47 | 35.4527 | 1.9878 | 19 |
| Sulfatos | 105.75 | 48.0318 | 2.2017 | 21 |
| Nitratos | 34.3 | 62.0049 | 0.5535 | 5 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 10.6521 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 2222.9897 | 0.9570 | 9 | |
| Potasio | 1.039.0983 | 0.0256 | 0 | |
| Calcio | 171.3520.0390 | 8.5508 | 76 | |
| Magnesio | 20.9012.1525 | 1.7198 | 15 | |
| | | | <hr/> | |
| | | | 11.2532 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1054
Rango de 9.49 11.594
meq/L
Aniones 10.65
Cationes 11.25
% diferencia 2.74
Balan. Iónico

Muestra: 167

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 334.43 | 61.0171 | 5.4810 | 48 |
| Cloruros | 70.47 | 35.4527 | 1.9878 | 17 |
| Sulfatos | 136.00 | 48.0318 | 2.8315 | 25 |
| Nitratos | 74.39 | 62.0049 | 1.1998 | 10 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 11.5127 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 1722.9897 | 0.7395 | 7 | 7 |
| Potasio | 0.939.0983 | 0.0230 | 0 | 0 |
| Calcio | 157.2820.0390 | 7.8487 | 71 | 71 |
| Magnesio | 29.0012.1525 | 2.3863 | 22 | 22 |
| | | | <hr/> | |
| | | | 10.9975 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1215
 Rango de 10.9 13.365
 meq/L.
 Aniones 11.51
 Cationes 11.00
 % diferencia -2.29
 Balan. Iónico

Muestra: 283

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 328.24 | 61.0171 | 5.3795 | 38 |
| Cloruros | 91.07 | 35.4527 | 2.5688 | 18 |
| Sulfatos | 233.85 | 48.0318 | 4.8686 | 35 |
| Nitratos | 77.05 | 62.0049 | 1.2426 | 9 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 14.0627 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 2622.9897 | 1.1309 | 8 | 8 |
| Potasio | 0.639.0983 | 0.0153 | 0 | 0 |
| Calcio | 195.3820.0390 | 9.7500 | 72 | 72 |
| Magnesio | 33.1112.1525 | 2.7245 | 20 | 20 |
| | | | <hr/> | |
| | | | 13.6208 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1258
 Rango de 11.3 13.838
 meq/L.
 Aniones 14.06
 Cationes 13.62
 % diferencia -1.60
 Balan. Iónico

Muestra: 285

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 334.43 | 61.0171 | 5.4810 | 40 |
| Cloruros | 77.55 | 35.4527 | 2.1873 | 16 |
| Sulfatos | 221 | 48.0318 | 4.6011 | 34 |
| Nitratos | 83.69 | 62.0049 | 1.3497 | 10 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 13.6211 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 1922.9897 | 0.8265 | 7 | |
| Potasio | 0.339.0983 | 0.0077 | 0 | |
| Calcio | 178.3620.0390 | 8.9006 | 73 | |
| Magnesio | 29.6612.1525 | 2.4407 | 20 | |
| | | | <hr/> | |
| | | | 12.1754 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1217
 Rango de 11 13.387 meq/L
 Aniones 13.62
 Cationes 12.18
 % diferencia -5.60
 Balan. Iónico

Muestra: 303

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 383.98 | 61.0171 | 6.2930 | 39 |
| Cloruros | 67.00 | 35.4527 | 1.8899 | 12 |
| Sulfatos | 373.25 | 48.0318 | 7.7709 | 49 |
| Nitratos | | 62.0049 | 0.0000 | 0 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 15.9572 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 6622.9897 | 2.8709 | 20 | |
| Potasio | 2.439.0983 | 0.0614 | 0 | |
| Calcio | 167.4120.0390 | 8.3542 | 59 | |
| Magnesio | 35.9612.1525 | 2.9591 | 21 | |
| | | | <hr/> | |
| | | | 14.2455 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1267
 Rango de 11.4 13.937 meq/L
 Aniones 15.96
 Cationes 14.25
 % diferencia -5.67
 Balan. Iónico

Muestra: 305

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 319.57 | 61.0171 | 5.2374 | 45 |
| Cloruros | 74.20 | 35.4527 | 2.0928 | 18 |
| Sulfatos | 205.65 | 48.0318 | 4.2815 | 37 |
| Nitratos | | 62.0049 | 0.0000 | 0 |
| <hr/> | | | | |
| Total | | | 11.6140 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 2722.9897 | | 1.1744 | 9 |
| Potasio | 1.339.0983 | | 0.0332 | 0 |
| Calcio | 177.1320.0390 | | 8.8393 | 70 |
| Magnesio | 30.9012.1525 | | 2.5427 | 20 |
| <hr/> | | | | |
| | | | 12.5896 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1238
 Rango de 11.1 13.618 meq/L
 Aniones 11.61
 Cationes 12.59
 % diferencia 4.03
 Balan. Iónico

Muestra: 323

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 318.95 | 61.0171 | 5.2273 | 45 |
| Cloruros | 57.57 | 35.4527 | 1.6239 | 14 |
| Sulfatos | 160 | 48.0318 | 3.3311 | 28 |
| Nitratos | 94.54 | 62.0049 | 1.5247 | 13 |
| <hr/> | | | | |
| Total | | | 11.7322 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 2922.9897 | | 1.2614 | 11 |
| Potasio | 3.139.0983 | | 0.0793 | 1 |
| Calcio | 154.4220.0390 | | 7.7060 | 69 |
| Magnesio | 25.5012.1525 | | 2.0983 | 19 |
| <hr/> | | | | |
| | | | 11.1450 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1220
 Rango de 11 13.42 meq/L
 Aniones 11.73
 Cationes 11.15
 % diferencia -2.57
 Balan. Iónico

Muestra: 324

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 377.79 | 61.0171 | 6.1915 | 47 |
| Cloruros | 91.57 | 35.4527 | 2.5828 | 20 |
| Sulfatos | 174.60 | 48.0318 | 3.6351 | 28 |
| Nitratos | 46.94 | 62.0049 | 0.7570 | 6 |
| | | | ----- | |
| Total | | | 13.1749 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 6722.9897 | 2.9143 | 23 | |
| Potasio | 2.439.0983 | 0.0614 | 0 | |
| Calcio | 147.5920.0390 | 7.3651 | 58 | |
| Magnesio | 28.5012.1525 | 2.3452 | 18 | |
| | | | ----- | |
| | | | 12.6861 | 100 |

Cond. Eléc. μ S/cm: 1215
 Rango de 10.9 13.365 meq/L
 Aniones 13.17
 Cationes 12.69
 % diferencia -1.89
 Balan. Iónico

Muestra: 328

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 368.50 | 61.0171 | 6.0393 | 46 |
| Cloruros | 64.27 | 35.4527 | 1.8129 | 14 |
| Sulfatos | 177.05 | 48.0318 | 3.6861 | 28 |
| Nitratos | 97.42 | 62.0049 | 1.5711 | 12 |
| | | | ----- | |
| Total | | | 13.1251 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 3022.9897 | 1.3049 | 11 | |
| Potasio | 1.139.0983 | 0.0281 | 0 | |
| Calcio | 174.9220.0390 | 8.7290 | 71 | |
| Magnesio | 27.3812.1525 | 2.2530 | 18 | |
| | | | ----- | |
| | | | 12.3151 | 100 |

Cond. Eléc. μ S/cm: 1316
 Rango de 11.8 14.476 meq/L
 Aniones 13.13
 Cationes 12.32
 % diferencia -3.18
 Balan. Iónico

Muestra: 334

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 306.57 | 61.0171 | 5.0243 | 38 |
| Cloruros | 121.59 | 35.4527 | 3.4297 | 26 |
| Sulfatos | 191.00 | 48.0318 | 3.9765 | 30 |
| Nitratos | 51.36 | 62.0049 | 0.8284 | 6 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 13.2763 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 4322.9897 | 1.8704 | 14 | |
| Potasio | 1.039.0983 | 0.0256 | 0 | |
| Calcio | 176.7420.0390 | 8.8198 | 67 | |
| Magnesio | 29.3012.1525 | 2.4110 | 18 | |
| | | | <hr/> | |
| | | | 13.1268 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1384
 Rango de 12.5 meq/L 15.224
 Aniones 13.28
 Cationes 13.13
 % diferencia -0.57
 Balan. Iónico

Muestra: 341

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 410.30 | 61.0171 | 6.7244 | 35 |
| Cloruros | 134.25 | 35.4527 | 3.7867 | 20 |
| Sulfatos | 375.80 | 48.0318 | 7.8240 | 41 |
| Nitratos | 51.81 | 62.0049 | 0.8355 | 4 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 19.2575 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 14022.9897 | 6.0897 | 36 | |
| Potasio | 1.639.0983 | 0.0409 | 0 | |
| Calcio | 168.4120.0390 | 8.4041 | 49 | |
| Magnesio | 30.5012.1525 | 2.5098 | 15 | |
| | | | <hr/> | |
| | | | 17.0445 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1676
 Rango de 15.1 meq/L 18.436
 Aniones 19.26
 Cationes 17.04
 % diferencia -6.10
 Balan. Iónico

Muestra: 343

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 433.53 | 61.0171 | 7.1050 | 49 |
| Cloruros | 112.91 | 35.4527 | 3.1848 | 22 |
| Sulfatos | 180.10 | 48.0318 | 3.7496 | 26 |
| Nitratos | 32.55 | 62.0049 | 0.5249 | 4 |
| | | | 14.6039 | 100 |
| Total | | | 14.6039 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|--------|---------|---------|-----|
| Sodio | 155 | 22.9897 | 6.7421 | 47 |
| Potasio | 0.8 | 39.0983 | 0.0205 | 0 |
| Calcio | 112.73 | 20.0390 | 5.6255 | 39 |
| Magnesio | 23.70 | 12.1525 | 1.9502 | 14 |
| | | | 14.3384 | 100 |
| Total | | | 14.3384 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$. 1304
 Rango de 11.7 14.344
 meq/L
 Aniones 14.60
 Cationes 14.34
 % diferencia -0.92

Balan. Iónico

Muestra: 345

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 396.37 | 61.0171 | 6.4960 | 35 |
| Cloruros | 151.62 | 35.4527 | 4.2767 | 23 |
| Sulfatos | 324.15 | 48.0318 | 6.7487 | 36 |
| Nitratos | 65.76 | 62.0049 | 1.0605 | 6 |
| | | | 18.5818 | 100 |
| Total | | | 18.5818 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|--------|---------|---------|-----|
| Sodio | 126 | 22.9897 | 5.4807 | 30 |
| Potasio | 1.5 | 39.0983 | 0.0384 | 0 |
| Calcio | 190.31 | 20.0390 | 9.4970 | 53 |
| Magnesio | 36.80 | 12.1525 | 3.0282 | 17 |
| | | | 18.0442 | 100 |
| Total | | | 18.0442 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 2030
 Rango de 18.3 22.33
 meq/L
 Aniones 18.58
 Cationes 18.04
 % diferencia -1.47
 Balan. Iónico

Muestra: 347

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 362.30 | 61.0171 | 5.9378 | 57 |
| Cloruros | 54.34 | 35.4527 | 1.5329 | 15 |
| Sulfatos | 106.65 | 48.0318 | 2.2204 | 21 |
| Nitratos | 40.52 | 62.0049 | 0.6534 | 6 |
| | | | 10.3453 | 100 |
| Total | | | 10.3453 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 3022.9897 | 1.3049 | 13 | |
| Potasio | 1.639.0983 | 0.0409 | 0 | |
| Calcio | 129.8220.0390 | 6.4784 | 65 | |
| Magnesio | 26.6412.1525 | 2.1921 | 22 | |
| | | | 10.0164 | 100 |
| Total | | | 10.0164 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 923
 Rango de 8.31 10.153 meq/L
 Aniones 10.35
 Cationes 10.02
 % diferencia -1.62
 Balan. Iónico

Muestra: 349

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 373.14 | 61.0171 | 6.1154 | 56 |
| Cloruros | 62.91 | 35.4527 | 1.7744 | 16 |
| Sulfatos | 126.05 | 48.0318 | 2.6243 | 24 |
| Nitratos | 30.55 | 62.0049 | 0.4928 | 4 |
| | | | 11.0100 | 100 |
| Total | | | 11.0100 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 5122.9897 | 2.2184 | 19 | |
| Potasio | 1.339.0983 | 0.0332 | 0 | |
| Calcio | 135.9220.0390 | 6.7828 | 59 | |
| Magnesio | 29.0512.1525 | 2.3905 | 21 | |
| | | | 11.4249 | 100 |
| Total | | | 11.4249 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1008
 Rango de 9.07 11.088 meq/L
 Aniones 11.01
 Cationes 11.42
 % diferencia 1.85
 Balan. Iónico

Muestra: 409

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|--------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 346.82 | 61.0171 | 5.6840 | 59 |
| Cloruros | 59.80 | 35.4527 | 1.6869 | 18 |
| Sulfatos | 86.30 | 48.0318 | 1.7967 | 19 |
| Nitratos | 28.56 | 62.0049 | 0.4606 | 5 |
| Total | | | 9.6348 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 2122.9897 | 0.9135 | 8 | |
| Potasio | 1.039.0983 | 0.0256 | 0 | |
| Calcio | 173.3920.0390 | 8.6526 | 74 | |
| Magnesio | 24.6012.1525 | 2.0243 | 17 | |
| Total | | | 11.6159 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1066
 Rango de 9.59 11.726
 meq/L
 Aniones 9.63
 Cationes 11.62
 % diferencia 9.32
 Balan. Iónico

Muestra: 411

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 359.21 | 61.0171 | 5.8870 | 58 |
| Cloruros | 86.60 | 35.4527 | 2.4428 | 24 |
| Sulfatos | 71.10 | 48.0318 | 1.4803 | 15 |
| Nitratos | 22.80 | 62.0049 | 0.3678 | 4 |
| Total | | | 10.1889 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|--------|-----|
| Sodio | 2022.9897 | 0.8700 | 9 | |
| Potasio | 1.039.0983 | 0.0256 | 0 | |
| Calcio | 128.5620.0390 | 6.4155 | 68 | |
| Magnesio | 25.7012.1525 | 2.1148 | 22 | |
| Total | | | 9.4258 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1068
 Rango de 9.61 11.748
 meq/L
 Aniones 10.19
 Cationes 9.43
 % diferencia -3.89
 Balan. Iónico

Muestra: 417

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 354.56 | 61.0171 | 5.8109 | 58 |
| Cloruros | 80.90 | 35.4527 | 2.2818 | 23 |
| Sulfatos | 76.40 | 48.0318 | 1.5906 | 16 |
| Nitratos | 24.80 | 62.0049 | 0.3999 | 4 |
| Total | | | 10.0974 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 4822.9897 | 2.0879 | 17 | 17 |
| Potasio | 1.139.0983 | 0.0281 | 0 | 0 |
| Calcio | 163.5220.0390 | 8.1601 | 67 | 67 |
| Magnesio | 23.4012.1525 | 1.9255 | 16 | 16 |
| Total | | | 12.2016 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1199
Rango de 10.8 13.189 meq/L
Aniones 10.10
Cationes 12.20
% diferencia 9.44
Balan. Iónico

Muestra: 419

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 331.34 | 61.0171 | 5.4303 | 53 |
| Cloruros | 64.52 | 35.4527 | 1.8199 | 18 |
| Sulfatos | 127.75 | 48.0318 | 2.6597 | 26 |
| Nitratos | 23.25 | 62.0049 | 0.3749 | 4 |
| Total | | | 10.2977 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|--------|---------|-----|
| Sodio | 3122.9897 | 1.3484 | 12 | 12 |
| Potasio | 1.039.0983 | 0.0256 | 0 | 0 |
| Calcio | 153.7120.0390 | 7.6705 | 69 | 69 |
| Magnesio | 25.4012.1525 | 2.0901 | 19 | 19 |
| Total | | | 11.1347 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1087
Rango de 9.78 11.957 meq/L
Aniones 10.30
Cationes 11.13
% diferencia 3.91
Balan. Iónico

Muestra: 435

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 383.98 | 61.0171 | 6.2930 | 57 |
| Cloruros | 60.55 | 35.4527 | 1.7079 | 15 |
| Sulfatos | 113.20 | 48.0318 | 2.3568 | 21 |
| Nitratos | 44.94 | 62.0049 | 0.7248 | 7 |
| Total | | | 11.0894 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|--------|---------|---------|-----|
| Sodio | 27 | 22.9897 | 1.1744 | 11 |
| Potasio | 2.0 | 39.0983 | 0.0512 | 0 |
| Calcio | 140.61 | 20.0390 | 7.0168 | 68 |
| Magnesio | 25.71 | 12.1525 | 2.1156 | 20 |
| Total | | | 10.3580 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1133
Rango de 10.2 12.463
meq/L
Aniones 11.09
Cationes 10.36
% diferencia -3.41
Balan. Iónico

Muestra: 437

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|--------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 263.21 | 61.0171 | 4.3138 | 44 |
| Cloruros | 100.00 | 35.4527 | 2.8208 | 29 |
| Sulfatos | 123.75 | 48.0318 | 2.5764 | 26 |
| Nitratos | 5.98 | 62.0049 | 0.0964 | 1 |
| Total | | | 9.8232 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|--------|---------|--------|-----|
| Sodio | 62 | 22.9897 | 2.6969 | 29 |
| Potasio | 1.6 | 39.0983 | 0.0409 | 0 |
| Calcio | 104.62 | 20.0390 | 5.2208 | 56 |
| Magnesio | 16.60 | 12.1525 | 1.3660 | 15 |
| Total | | | 9.3246 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1077
Rango de 9.69 11.847
meq/L
Aniones 9.82
Cationes 9.32
% diferencia -2.60
Balan. Iónico

Muestra: 439

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|--------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 383.98 | 61.0171 | 6.2930 | 65 |
| Cloruros | 42.43 | 35.4527 | 1.1969 | 12 |
| Sulfatos | 77.15 | 48.0318 | 1.6062 | 17 |
| Nitratos | 34.10 | 62.0049 | 0.5499 | 6 |
| | | | 9.6650 | 100 |
| Total | | | 9.6650 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|--------|---------|--------|-----|
| Sodio | 24 | 22.9897 | 1.0439 | 11 |
| Potasio | 1.1 | 39.0983 | 0.0281 | 0 |
| Calcio | 123.23 | 20.0390 | 6.1495 | 67 |
| Magnesio | 24.40 | 12.1525 | 2.0078 | 22 |
| | | | 9.2294 | 100 |
| Total | | | 9.2294 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1017
 Rango de 9.15 11.187
 meq/L
 Aniones 9.66
 Cationes 9.23
 % diferencia -2.31
 Balan. Iónico

Muestra: 723

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 349.92 | 61.0171 | 5.7348 | 48 |
| Cloruros | 75.19 | 35.4527 | 2.1208 | 18 |
| Sulfatos | 135.05 | 48.0318 | 2.8117 | 23 |
| Nitratos | 82.80 | 62.0049 | 1.3354 | 11 |
| | | | 12.0052 | 100 |
| Total | | | 12.0052 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|--------|---------|---------|-----|
| Sodio | 31 | 22.9897 | 1.3484 | 13 |
| Potasio | 1.3 | 39.0983 | 0.0332 | 0 |
| Calcio | 141.16 | 20.0390 | 7.0443 | 66 |
| Magnesio | 26.60 | 12.1525 | 2.1889 | 21 |
| | | | 10.6148 | 100 |
| Total | | | 10.6148 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1114
 Rango de 10 12.254
 meq/L
 Aniones 12.01
 Cationes 10.61
 % diferencia -6.15
 Balan. Iónico

Muestra: Am.Obrera

| Aniones | mg/L | factor | meq/L | % |
|--------------|--------|---------|---------|-----|
| Carbonatos | 0 | 30.0046 | 0.0000 | 0 |
| Bicarbonatos | 371.59 | 61.0171 | 6.0900 | 37 |
| Cloruros | 130.78 | 35.4527 | 3.6887 | 22 |
| Sulfatos | 292.35 | 48.0318 | 6.0866 | 37 |
| Nitratos | 49.37 | 62.0049 | 0.7963 | 5 |
| | | | <hr/> | |
| Total | | | 16.6644 | 100 |

| Cationes | mg/L | factor | meq/L | % |
|----------|---------------|---------|---------|-----|
| Sodio | 4922.9897 | 2.1314 | 13 | 13 |
| Potasio | 1.439.0983 | 0.0358 | 0 | 0 |
| Calcio | 220.7920.0390 | 11.0180 | 69 | 69 |
| Magnesio | 33.6012.1525 | 2.7649 | 17 | 17 |
| | | | <hr/> | |
| | | | 15.9501 | 100 |

Cond. Eléc. $\mu\text{S/cm}$: 1473

Rango de 13.3 16.203
meq/L

Aniones 16.66
Cationes 15.95

% diferencia -2.19
Balan. Iónico