

Espectroscopía láser aplicada al análisis de isótopos estables de hidrógeno y oxígeno en muestras de agua natural. Su empleo en el acuífero de la Comarca Lagunera y el acuífero profundo del Valle de México

Proyecto TH-1304.1

Informe Final

SUBCOORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA
COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA

PARTICIPANTES

Fis. Luis González Hita
Dr. Miguel Ángel Mejía González

CONTENIDO

1. INSTALACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN DE UN EQUIPO DE MEDICIÓN POR ESPECTROSCOPIA LÁSER DE ISÓTOPOS ESTABLES DE HIDRÓGENO Y OXÍGENO EN MUESTRAS DE AGUA NATURAL, EN EL LABORATORIO DE HIDROLOGÍA ISOTÓPICA DEL IMTA	6
1.1 Antecedentes	6
1.2 Introducción.....	7
1.3 Instalación básica del analizador láser y de la bomba de vacío externa	8
1.4 Instalación del automuestreador.....	10
1.5 Instalación del suministro de gas.....	14
1.6 Instalación del vaporizador de alto rendimiento	18
1.7 Encendido del sistema.....	20
1.8 Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS).....	20
1.9 Vaporizador de alto rendimiento.....	22
1.10 Automuestreador.....	24
1.11 Preparación del automuestreador.....	24
1.12 Inicio del automuestreador	27
1.13 Apagado del equipo láser	28
2. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EXISTENTE EN EL ACUÍFERO INTERMEDIO DEL VALLE DE MÉXICO	29
3. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA Y GEOQUÍMICA EN LA VERTICAL DE POZOS SIN EQUIPAR DE LA COMARCA LAGUNERA	37
3.1 Introducción.....	37
3.2 Área de estudio	37
3.3 Metodología.....	42
3.3.1 Hidrogeoquímica	42
3.3.2 Geoquímica de los sedimentos.....	43
3.3.3 Resultados	44
3.3.4 Química de sedimentos	49
3.3.5 Modelado geoquímico	52

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL CAPITULO 1	58
4.1 Conclusiones.....	58
4.2 Recomendaciones.....	60
5. CONCLUSIONES DEL CAPITULO 3	61
Bibliografía.....	62



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Instalación básica del analizador.....	9
Figura 1.2 Componentes del automuestreador.	10
Figura 1.3 Brazo automático XYZ.	10
Figura 1.4 Lado superior del brazo automático XYZ.	11
Figura 1.5 Tornillo ajustador de la pierna del brazo XYZ.....	11
Figura 1.6 Orientación de las piernas del brazo XYZ.	12
Figura 1.7 Colocación del inyector automático sobre el analizador láser.	12
Figura 1.8 Ajuste de las piernas del automuestreador al analizador láser.....	13
Figura 1.9 Estación de residuos, estaciones de lavado y bandeja.	13
Figura 1.10 Ajuste de tornillos de los soportes.....	14
Figura 1.11 Diagrama de instalación de gas seco.....	15
Figura 1.12 Puerto de purga del analizador.	16
Figura 1.13 Regulador de presión.....	16
Figura 1.14 Conexiones del vaporizador de alta precisión.	17
Figura 1.15 Conexión del vaporizador de alto rendimiento.....	18
Figura 1.16 Ajuste del vaporizador de alto rendimiento.....	18
Figura 1.17 Flujiómetro para el vaporizador de alto rendimiento.....	19
Figura 1.18 Disposición del automuestreador y vaporizador de alto rendimiento.	19
Figura 1.19 Esquema del analizador CRDS.....	21
Figura 1.20 Alineación del puerto de inyección del vaporizador.	22
Figura 1.21 Interfaz Gráfica del Usuario (GUI).	23
Figura 1.22 Calibración del puerto de inyección del vaporizador.....	25
Figura 1.23 Vista desde la parte superior del analizador láser.	25
Figura 1.24 Software de configuración y entrenamiento del automuestreador.	26
Figura 1.25 Instalación de la jeringa.....	27
Figura 3.1 Localización del área de estudio 38	38
Figura 3.2 Modelos sedimentológico del aluvión del cuaternario..... 39	39
Figura 3.3 Flujo del agua subterránea..... 40	40
Figura 3.4 Columna estratigráfica del pozo de nueva construcción..... 40	40
Figura 3.5 Flujo de agua subterránea 41	41
Figura 3.6 Ubicación de Madero 42	42
Figura 3.7 Litología del pozo Madero 43	43
Figura 3.8 Arsénico-profundidad 46	46
Figura 3.9 Hierro-profundidad..... 46	46
Figura 3.10 pH-profundidad 47	47
Figura 3.11 Oxígeno disuelto-profundidad 48	48
Figura 3.12 Nitrato-profundidad 48	48
Figura 3.13 Diagrama de Estabilidad de hierro en Madero así, en presencia de bicarbonato y sulfato (Hem, J. D. 1960) 49	49
Figura 3.14 Concentración de arsénico en sedimento con relación a la profundidad 50	50
Figura 3.15 Distribución mineralógica de arsénico en los sedimentos..... 52	52
Figura 3.16 Arsénico asociado con la reducción de óxidos de hierro 53	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.....	32
Tabla 2.2	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.....	33
Tabla 2.3	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.....	33
Tabla 2.4	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.....	34
Tabla 2.5	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.....	34
Tabla 2.6	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.....	35
Tabla 2.7	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.....	35
Tabla 2.8	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.....	36
Tabla 3.1	Parámetros fisicoquímicos medidos en campo.....	44
Tabla 3.2	Los parámetros químicos medidos en el laboratorio.....	45
Tabla 3.3	Los parámetros químicos medidos en el laboratorio.....	45
Tabla 3.4	Concentración total de arsénico en el sedimento	49
Tabla 3.5	Concentración de arsénico en mg/kg	50
Tabla 3.6	Distribución porcentual de arsénico en los sedimentos	51
Tabla 3.7	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras	54
Tabla 3.8	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras	55
Tabla 3.9	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras	55
Tabla 3.10	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras	56
Tabla 3.11	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras	56
Tabla 3.12	Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras	57

1. INSTALACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN DE UN EQUIPO DE MEDICIÓN POR ESPECTROSCOPIA LÁSER DE ISÓTOPOS ESTABLES DE HIDRÓGENO Y OXÍGENO EN MUESTRAS DE AGUA NATURAL, EN EL LABORATORIO DE HIDROLOGÍA ISOTÓPICA DEL IMTA

1.1 Antecedentes

A mediados del 2012, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) inicio el desarrollo proyecto regional RLA/7/016 “Using Isotopes for Hydrogeological Assessment of Intensively Exploited Aquifers in Latin America (ARCAL CXXVII)” en el cual participan 15 países de la región latinoamericana miembros del programa ARCAL (Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe) del cual México es signatario. El proyecto está enmarcado en el perfil estratégico PER 2007-2013 que considera los siguientes lineamientos:

1. Vinculación con programas nacionales con apoyo gubernamental.
2. Que tengan una componente de uso de tecnología nuclear competitiva.
3. Que sus beneficios socioeconómicos sean tangibles para el sector de aplicación involucrado,
4. Que cuenten con respaldo institucional y gubernamental, asegurando los recursos humanos y económicos necesarios para su implementación, y
5. Que esté asegurada su sostenibilidad de manera que sea factible continuar otorgando servicios a los beneficiarios una vez concluido el proyecto.

El IMTA participa en el proyecto, en el tema de medio ambiente y recursos naturales, con los siguientes casos de estudio:

- “Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de los flujos de agua subterránea que capta el pozo exploratorio profundo San Lorenzo Tezonco del Sistema de Aguas de la Ciudad de México” y
- “Evaluación de los estratos de agua con baja concentración de arsénico en la zona de reserva exclusiva de agua potable de la Comarca Lagunera”

El primer caso tiene como objetivo caracterizar geoquímica e isotópicamente los flujos de agua subterránea existentes en el subsuelo, identificar el origen de su recarga, establecer los tiempos de residencia del agua subterránea, y definir los procesos geoquímicos de la interacción agua-roca. Los resultados contribuirán a conocer el funcionamiento del acuífero en exploración y a definir la posible existencia de recursos de agua subterránea adicionales a los ya considerados en el balance del acuífero del valle de México.

El segundo caso tiene como propósito evaluar la calidad del agua subterránea en los diferentes estratos que componen el acuífero granular multicapas de la zona de reserva exclusiva de agua potable, y asociar los constituyentes disueltos nocivos solubles en el agua subterránea con la composición mineralógica estratigráfica del subsuelo, para definir los horizontes que permitan captar agua apta para consumo humano.

Para apoyar el desarrollo del proyecto regional y de los casos de estudio propuestos por México, el OIEA proporcionará al IMTA un equipo de última tecnología para medir composiciones isotópicas estables en agua mediante espectroscopia láser, mediante el cual se atenderá la demanda de análisis isotópico de muestras de agua. Esta metodología instrumental es de alta precisión y de aplicación más económica con respecto a la medición de la composición isotópica estable por medio de espectrometría de masas.

Aunque la Espectrometría de Masas de Isótopos Estables (IRMS) es una forma tradicional de análisis de isótopos de agua ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$), desde 2007 las mediciones para los estudios hidrológicos, se llevan a cabo cada vez más por el diodo infrarrojo de la Espectroscopía de Absorción Láser (LAS), reemplazando rápidamente a IRMS en muchas áreas.

La tecnología LAS mide ópticamente la concentración de isótopos estables de agua líquida desde nanolitros de inyecciones (moléculas vaporizadas de H_2O) mediante el uso de una Cavidad con Espectroscopía Láser (CRDS). De acuerdo a algunos estudios, el rendimiento de LAS es igual o superior a IRMS en la mayoría de las mediciones de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de muestras de agua del medio ambiente y a un menor costo, por lo que esta tecnología se está expandiendo rápidamente en los laboratorios que no tienen experiencia en el análisis isotópico.

Las ventajas sobre IRMS incluyen: pequeño tamaño, portabilidad y mínimas necesidades de infraestructura en el laboratorio. Sin embargo, la tecnología LAS puede no ser adecuada para muestras de agua con alta salinidad o con interferencia de compuestos orgánicos, por lo que la intensidad de absorción infrarroja de los isótopos no puede ser corregida.

1.2 Introducción

El analizador láser de isótopos estables de agua (Picarro L2110-i) puede trabajar en diferentes configuraciones, lo que permite diversas aplicaciones de la tecnología CRDS (*Cavity Ring-Down Spectroscopy*).

La configuración “modo manual” se utiliza para la medición semi-automatizada de muestras de agua con la máxima precisión. El usuario inyecta manualmente las muestras en el sistema. El control del vaporizador y el análisis de las muestras líquidas son automatizadas. Cada ciclo de inyección tarda 9 minutos.

La configuración del “*vaporizador de alto rendimiento*” (A0212) se utiliza para la medición rápida de muestras de agua con una buena precisión. Las muestras líquidas se inyectan y se analizan automáticamente. Cada ciclo de inyección es de menos de 2 minutos.

La configuración del “*vaporizador de alta precisión*” (A0211) puede operar en dos modos de medición: Alta precisión y alto rendimiento.

- *Alta precisión.* Para mediciones con muestras de agua con la máxima precisión. Las muestras líquidas se inyectan y se analizan automáticamente. Cada ciclo de inyección tarda 9 minutos.
- *Alto rendimiento.* Se utiliza para la medición rápida de muestras de agua con una buena precisión. Las muestras líquidas se inyectan y se analizan automáticamente. Cada ciclo de inyección es de 4 minutos.
- El Coordinador CRDS funciona exactamente de la misma manera en los modos “*alta precisión*” y “*alto rendimiento*”, excepto que los pasos de preparación de muestras y análisis son más rápidos en el modo de “*alto rendimiento*”.

El analizador láser de isótopos estables de agua (Picarro L2110-i) usa la espectroscopia de absorción óptica en función del tiempo, para determinar la concentración de patrones de gases.

Se basan en la longitud de onda digitalizada en el sistema CRDS, una tecnología en la que la luz re-circula muchas veces a través de la muestra, la creación de una gran longitud de trayectoria eficaz para la luz que interactúa con la muestra, por lo tanto, permite una excelente sensibilidad de detección en un compacto y robusto instrumento.

El analizador láser se compone de dos módulos:

1. *Analizador.* El analizador contiene el espectrómetro, cámara de la muestra y una computadora con un disco duro para almacenar datos. El módulo analizador únicamente controla el funcionamiento del sistema y convierte las mediciones espectroscópicas en datos de concentración de gas.
2. *Bomba de vacío externa.* El diafragma de la bomba recibe la muestra de gas a través del instrumento.

1.3 Instalación básica del analizador láser y de la bomba de vacío externa

Se coloca el analizador en una mesa de trabajo o una superficie plana. La bomba de vacío externa se coloca a un lado del analizador, es importante que no esté en el suelo.

No se debe empujar el analizador de su posición, ya que, hay cables que se instalan en la parte posterior.

Desensamblar todos los accesorios del analizador (línea de gas, cables de alimentación de CA, manual, certificado de cumplimiento, y USB *Flash Drive*). La unidad USB Certificada se debe almacenar en un lugar seguro. Puede ser solicitada al contactar al fabricante en busca de apoyo.

Retirar los tapones de la conexión de entrada de gas del analizador y puertos de conexión a la bomba de vacío. Guardar las tapas para su uso posterior, se deben volver a instalar si el analizador se almacena, mueve o envía.

Retirar las tapas de la bomba de vacío externa. Guardar las tapas para su uso posterior, se deben volver a instalar si la bomba se almacena, mueve o envía.

Conectar la línea de gas entre el puerto de vacío del analizador y la bomba de vacío externa (apretar la tuerca a mano, a continuación, hacer un giro de 1/4 adicional con una llave de 11/16”).

Conectar el cable de alimentación de CA a la bomba de vacío externa con el botón de encendido en la posición de apagado.

Si se desea, se puede conectar un tubo al orificio de escape de la bomba de vacío externa y dirigirlo a un lugar seguro para la ventilación de la mezcla de gases de aire/N₂ y H₂O de las muestra.

Conectar el ratón PS2, teclado PS2, cable *Ethernet* y cable de la pantalla del monitor VGA a las conexiones de la computadora en la parte posterior del Analizador.

Con esto se completa la instalación básica del analizador, utilizar el siguiente diagrama de flujo de la Figura 1.1 para determinar el procedimiento a seguir de la instalación de los accesorios.

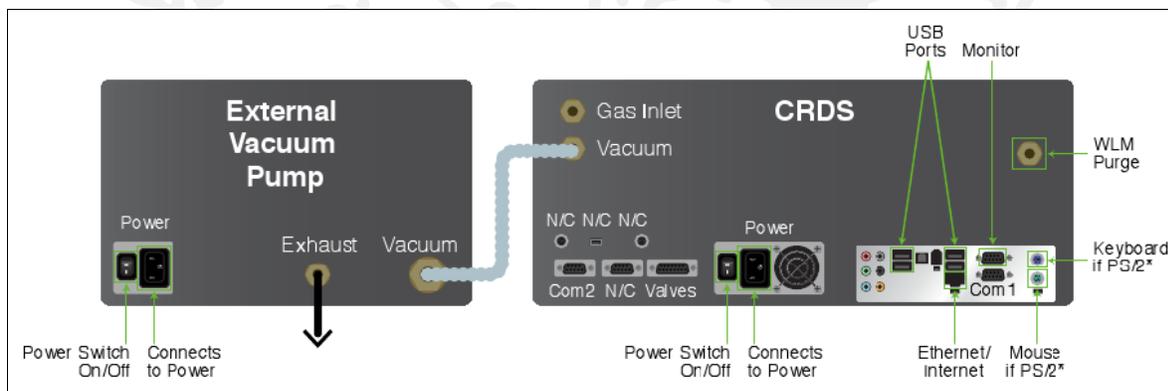


Figura 1.1 Instalación básica del analizador.

1.4 Instalación del automuestreador

En la Figura 1.2 se pueden observar los componentes y herramientas para la instalación del automuestreador del equipo analizador láser.

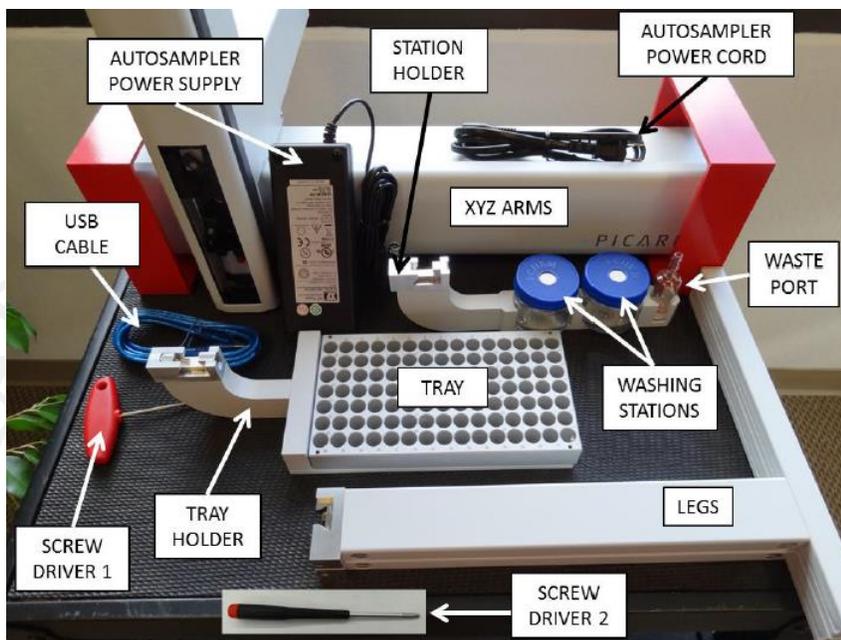


Figura 1.2 Componentes del automuestreador.

1.- Remoción de tornillos de la guarda de metal rojo, Figura 1.3, y de encima del brazo automático XYZ, Figura 1.4.

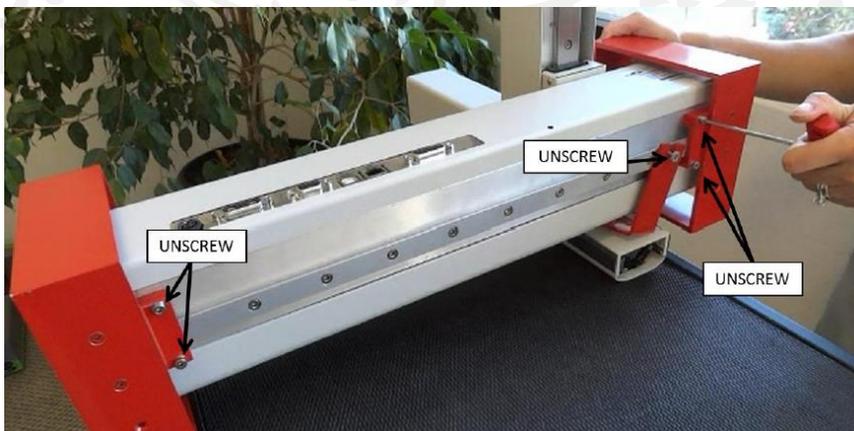


Figura 1.3 Brazo automático XYZ.

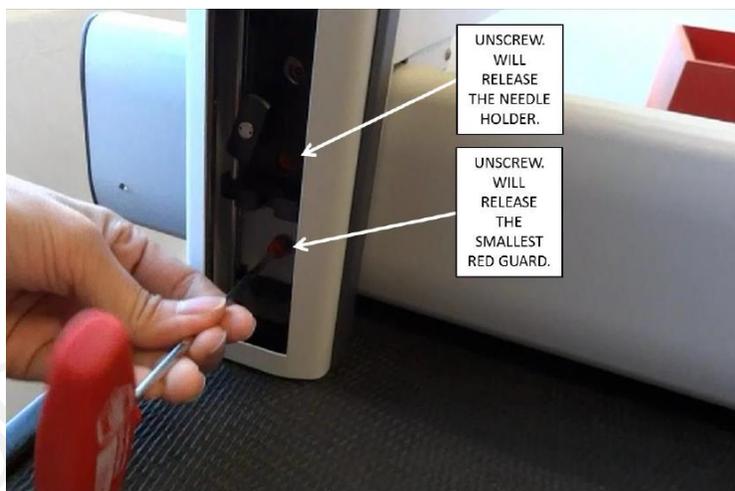


Figura 1.4 Lado superior del brazo automático XYZ.

Colocación de las dos piernas al brazo XYZ. Se debe dejar espacio entre las piernas de modo que el analizador pueda situarse entre las mismas, Figura 1.5. Por ahora, se mantiene la conexión suelta entre el brazo XYZ y las dos piernas (la distancia entre las piernas puede necesitar un reajuste posterior).

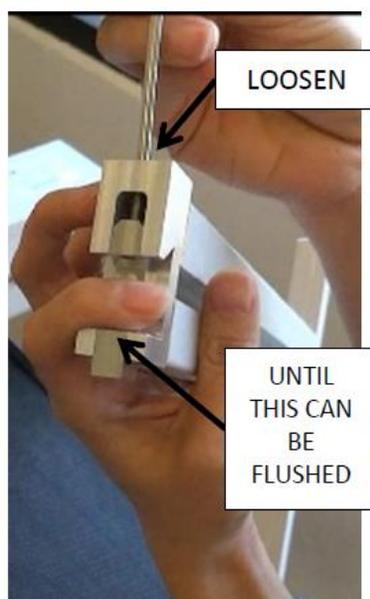


Figura 1.5 Tornillo ajustador de la pierna del brazo XYZ.

Orientar la pierna del brazo XYZ de modo que el lado más largo de los pies quede enfrente de la parte delantera, Figura 1.6. Colocar la pierna al brazo XYZ apretando ligeramente el tornillo.

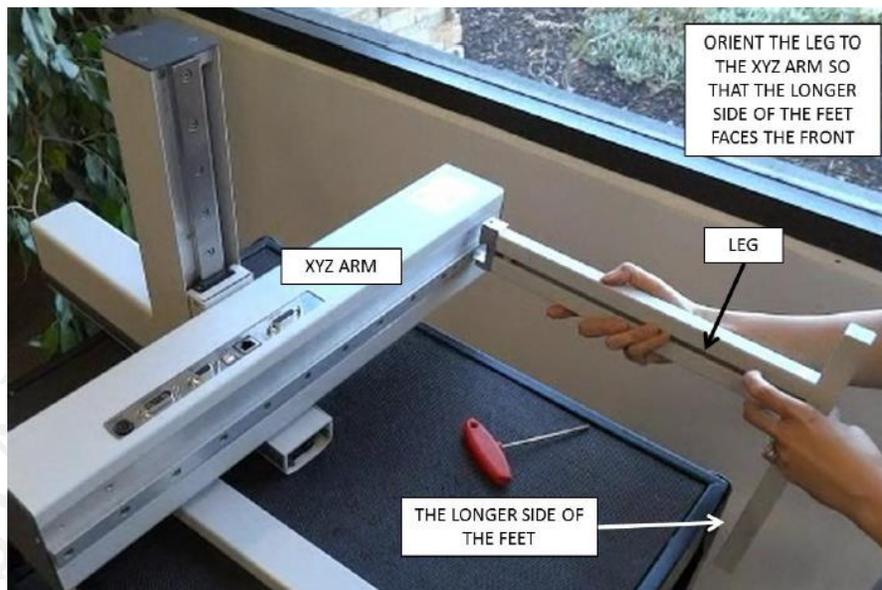


Figura 1.6 Orientación de las piernas del brazo XYZ.

Colocar el inyector automático sobre el analizador, Figura 1.7. El inyector automático es pesado, y puede requerir de dos personas para moverlo. Sostener firmemente el eje YZ mientras mueve el inyector automático.

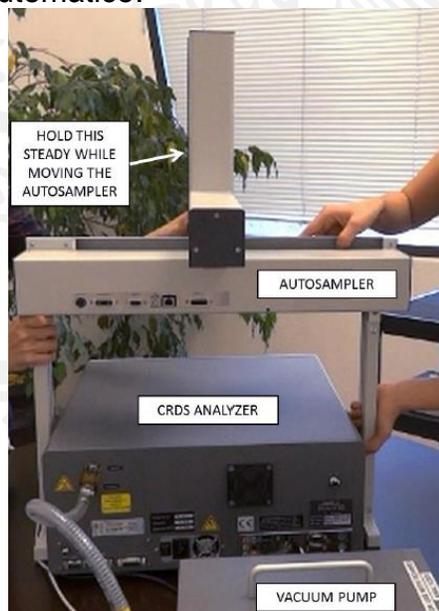


Figura 1.7 Colocación del inyector automático sobre el analizador láser.

Ajustar la ubicación de las dos piernas para que sujeten firmemente el analizador láser, Figura 1.8.

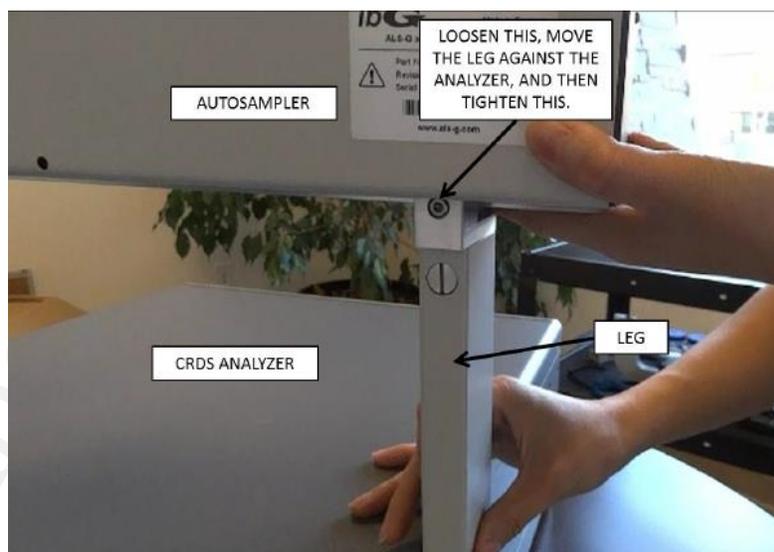


Figura 1.8 Ajuste de las piernas del automuestreador al analizador láser. Reunir el soporte de estaciones, la estación de residuos, las dos estaciones de lavado, el soporte de la bandeja y la bandeja, Figura 1.9. Después, colocar los dos soportes en el automuestreador de la misma manera que se hizo con las piernas al brazo XYZ en los pasos anteriores. Los tornillos deben mantenerse sin ajuste hasta que sea necesario de acuerdo a la posición correcta del vaporizador, Figura 1.10.

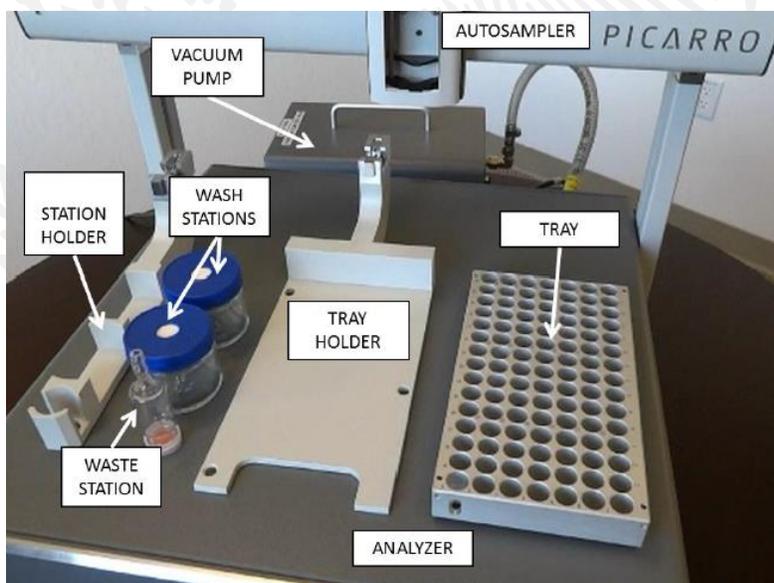


Figura 1.9 Estación de residuos, estaciones de lavado y bandeja.

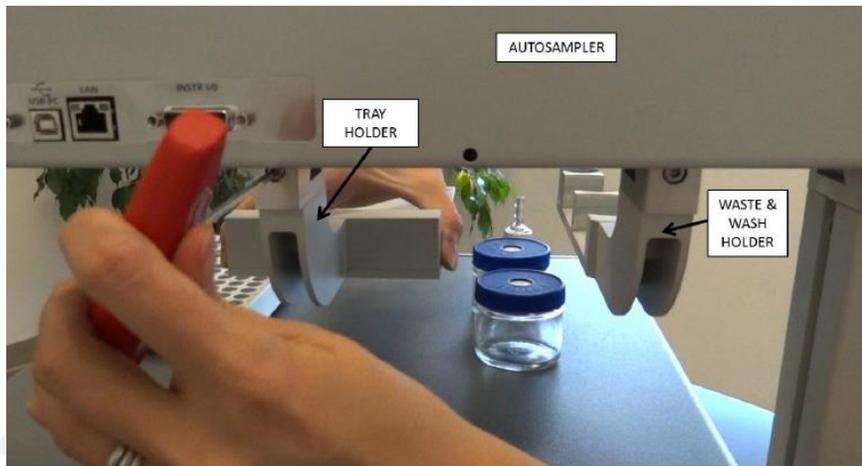


Figura 1.10 Ajuste de tornillos de los soportes.

1.5 Instalación del suministro de gas

El analizador láser (Picarro L2110-i) puede trabajar en varias configuraciones, lo que permite una amplia aplicación del analizador.

Las configuraciones para el suministro de gas seco son las siguientes:

Configuración A

- Configuración en modo manual
- Automuestreador con vaporizador de alta precisión (A0211)

Configuración B

- Automuestreador con vaporizador de alto rendimiento (A0212)

Configuración A

Se necesita un suministro de gas seco para el analizador y el vaporizador. Se puede comprar el kit regulador de presión Picarro # A0921.

Si ya se ha comprado el kit de gas seco de Picarro, se tendrá la siguiente oferta adicional:

Suministro de gas seco de 10 a 60 psi (4 bar), que baja a 2.5 psi antes de ser conectado al analizador CRDS.

A continuación se describe una lista completa de piezas y el diagrama de cómo conectar el gas seco al analizador láser, Figura 1.11.

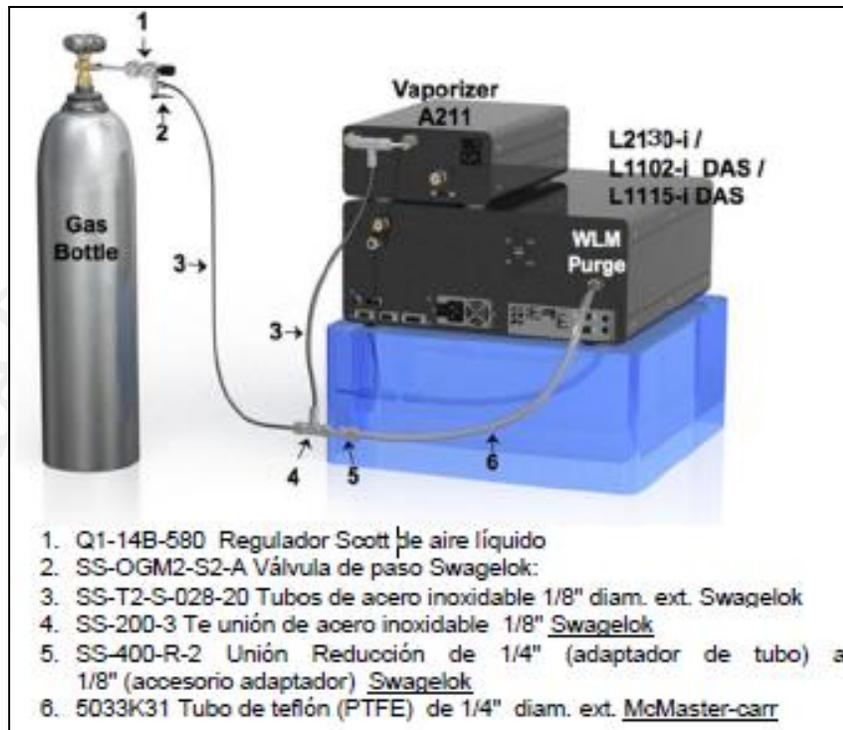


Figura 1.11 Diagrama de instalación de gas seco.

1.- Conexión a la línea de gas del puerto de "Purga WLM" del analizador al regulador de N₂, que se conecta a un cilindro de gas (nitrógeno o aire seco).

2.- Para conectar el tubo de gas seco de 1/4" al puerto de purga WLM en el analizador, es necesario utilizar el conector de inserción que se adjunta en el puerto.

El conector es de dos piezas: El *Flap* exterior y el *Flap* interior, Figura 1.12. Para conectar el tubo al puerto, simplemente se empuja el tubo en el conector y se tira del tubo hacia atrás. Si hay un espacio entre el *Flap* interior y el *Flap* exterior significa que el tubo está bloqueado en el puerto. Es importante no girar y girar el tubo.

Para sacar el tubo de la salida del puerto, se pulsa el *Flap* exterior en contra del *Flap* interior, esto libera el mecanismo de agarre del tubo, luego se retira el tubo.

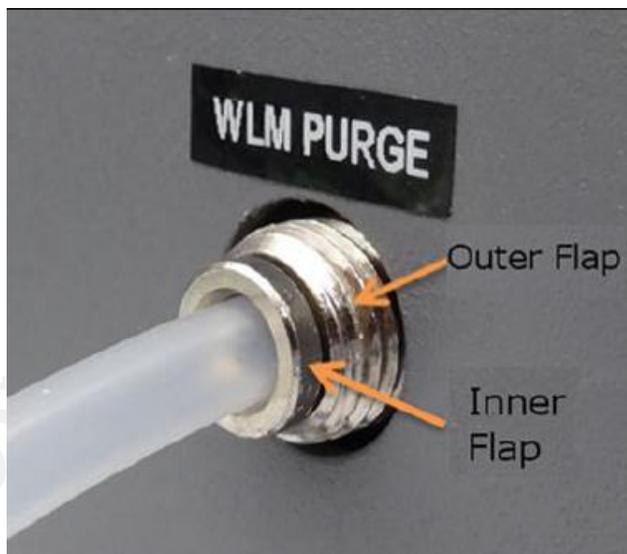


Figura 1.12 Puerto de purga del analizador.

La Figura 1.13 muestra el regulador de presión de N_2 o aire seco. El tubo semitransparente de la izquierda es para el puerto de purga WLM del analizador. El tubo de color cobre en la cima izquierda viene de los puertos de purga y muestreo del vaporizador. El tubo de color cobre abajo a la derecha va al (N_2 o aire seco) cilindro de gas.



Figura 1.13 Regulador de presión.

3.- Conectar la línea de un cilindro de gas, N₂ o aire seco, a una presión de 2.5 ± 0.5 psi (0.17 ± 0.03 bar) desde el suministro/regulador de gas, a los puertos de purga y vaporizador.

La Figura 1.14 presenta la conexión de gas y eléctrica del vaporizador de alta precisión

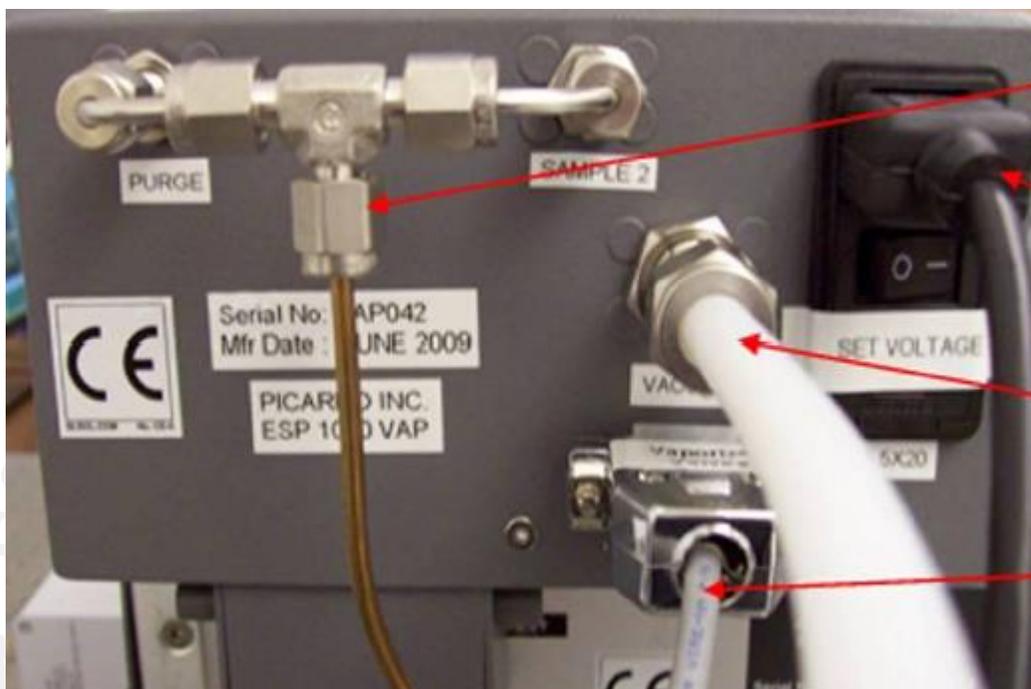


Figura 1.14 Conexiones del vaporizador de alta precisión.

Configuración B

La configuración B de gas seco es muy similar a la configuración A, excepto en la conexión de la parte trasera del vaporizador, Figura 1.15.

El cilindro de gas (N₂) se conecta a una presión de 3 ± 0.5 psi (0.2 ± 0.03 bar) a la conexión de 1/8" Swagelok en la parte trasera del vaporizador.



Figura 1.15 Conexión del vaporizador de alto rendimiento.

1.6 Instalación del vaporizador de alto rendimiento

A diferencia del vaporizador de alta precisión, el soporte del vaporizador de alto rendimiento no se puede separar. Se deben aflojar los dos tornillos en el soporte adjunto que tiene el vaporizador (círculos blancos), coloque el vaporizador en el carril del inyector automático y apriete las conexiones, Figura 1.16.



Figura 1.16 Ajuste del vaporizador de alto rendimiento.

La Figura 1.17 presenta la instalación de un regulador de flujo opcional para el vaporizador de alto rendimiento.

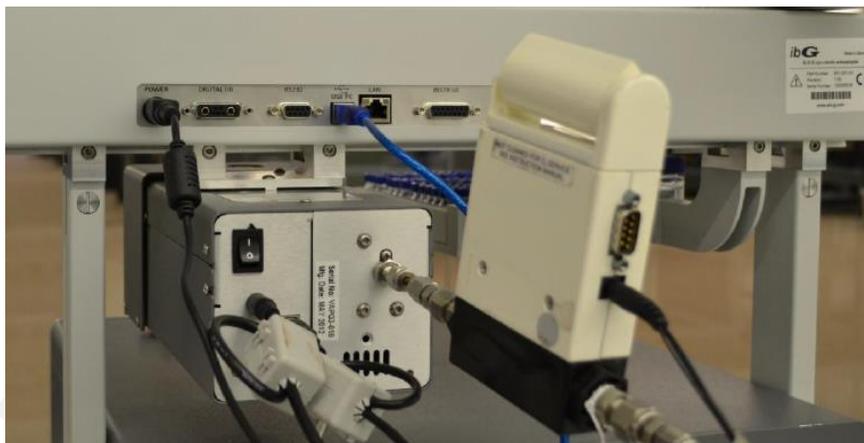


Figura 1.17 Flujómetro para el vaporizador de alto rendimiento.

Se deben conectar todos los cables al analizador láser, automuestreador, vaporizador y bomba de vacío externa, sin hacerlo todavía a la corriente eléctrica

El vaporizador y el analizador se conectan a través de una conexión USB y al tubo de gas. Se desliza la conexión del tubo (del analizador) sobre el tubo en la parte inferior del vaporizador. Se fija la conexión de ¼" Swagelock de la tubería de aislamiento en el puerto de entrada del analizador como se muestra en la Figura 1.18.

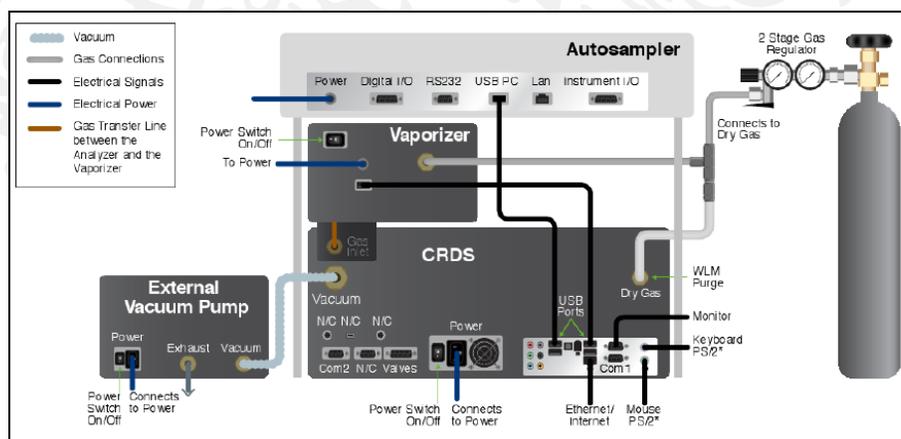


Figura 1.18 Disposición del automuestreador y vaporizador de alto rendimiento.

Asegurarse que todos los cables de alimentación a la toma de corriente estén conectados al analizador, vaporizador, bomba de vacío e inyector automático. Sin embargo, mantener todavía apagado el interruptor de alimentación.

Deslizar con cuidado el sistema completo de su posición. Comprobar si hay obstáculos, si la unidad no se desliza fácilmente. No se trata de forzar excesivamente el sistema. Son suficientes con pequeños movimientos de los componentes respecto a otros.

Las unidades deben estar bien cerradas.

1.7 Encendido del sistema

Verificar que todos los cables de alimentación (incluyendo uno para el monitor) estén conectados en la fuente adecuada. Es muy importante que se enciendan los componentes en el siguiente orden:

1. La Bomba de Vacío Externa.
2. Todo lo demás.

1.8 Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS)

Casi todas las moléculas en fase gaseosa pequeña (por ejemplo, CO_2 , H_2O , H_2S , NH_3) tienen un espectro de absorción cercano único en el infrarrojo. A la presión sub-atmosférica, este consiste en una serie de estrechas, bien resueltas, líneas agudas, cada una a una longitud de onda característica. Debido a que estas líneas están bien espaciadas y su longitud de onda es bien conocida, la concentración de cualquier especie se puede determinar mediante la medición de la fuerza de esta absorción, es decir, la altura de un pico de absorción específica. Pero, en los espectrómetros convencionales de infrarrojos, los gases traza proporcionan muy poca absorción para su medición, típicamente en el mejor de los casos limitan la sensibilidad a partes por millón. El CRDS (*Cavity Ring-Down Spectroscopy*) evita esta limitación a la sensibilidad mediante el uso de una longitud de trayecto efectiva de muchos kilómetros. Permite a los gases ser monitoreados en segundos o menos, a un nivel de partes por billón, y en algunos gases en partes por trillón.

En el CRDS, el haz de luz de un diodo láser de una sola frecuencia entra en una cavidad definida por dos o más espejos de alta reflectividad.

Los analizadores utilizan una cavidad de tres espejos, Figura 1.19, para apoyar una onda de luz continua. Esto proporciona una señal superior al ruido en comparación con una cavidad de dos espejos que soporta una onda estacionaria. Cuando el láser está activado, la cavidad se llena rápidamente con la circulación de luz láser. Rápidamente un fotodetector detecta la pequeña cantidad de luz que escapa a través de uno de los

espejos para producir una señal que es directamente proporcional a la intensidad en la cavidad.

La Figura 1.19 muestra cómo se lleva a cabo la medición del decaimiento (*ring-down*).

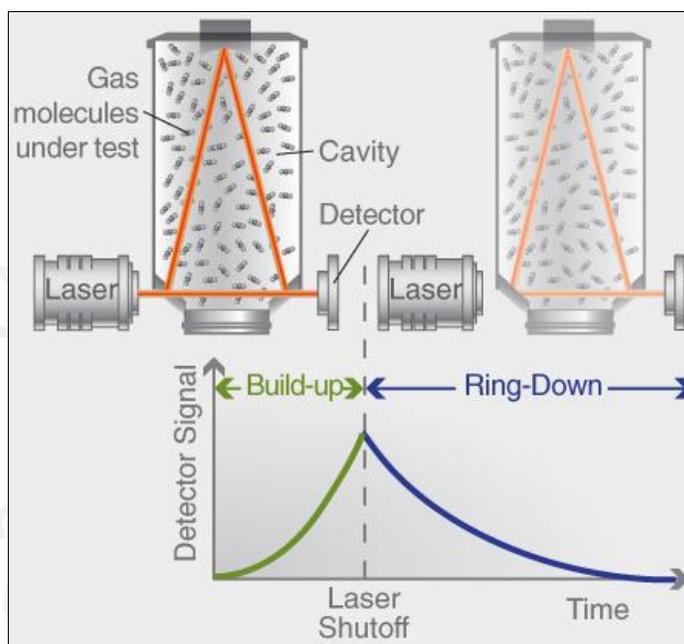


Figura 1.19 Esquema del analizador CRDS.

Cuando la señal del fotodetector alcanza un nivel de umbral (en unas pocas decenas de microsegundos), la onda continua (CW) láser se apaga bruscamente. La luz dentro de la cavidad continúa rebotando entre los espejos (alrededor de 100,000 veces), pero debido a que los espejos tienen poco menos del 100 % de reflectividad (99.99 %), la intensidad de la luz en el interior de la cavidad de manera constante se filtra y decae a cero en forma exponencial. Este decaimiento, o "*ring-down*", se mide en tiempo real por el fotodetector, y la cantidad de tiempo que toma para que el decaimiento suceda está determinado únicamente por la reflectividad de los espejos (para una cavidad vacía). Se debe tomar en cuenta que para una cavidad de sólo 25 cm de longitud, la longitud de trayectoria eficaz dentro de la cavidad puede ser de más de 20 kilómetros.

Ahora, si una especie de gas que absorbe la luz del láser se introduce en la cavidad, un segundo mecanismo de pérdida (absorción) se introduce dentro de la misma. Esto acelera el decaimiento en comparación con una cavidad sin ninguna absorción adicional debido a una especie de gas dirigido. Los instrumentos Picarro de forma automática y continua calculan y comparan el decaimiento de inactividad de la cavidad con y sin absorción debido a la especie de gas objetivo. Esto produce mediciones cuantitativas precisas que cuentan para cualquier pérdida intra-cavidad que pueden estar cambiando con el tiempo, y que permiten la discriminación de la pérdida, debido a la absorción de los espejos de la

cavidad. Por otra parte, los datos de la concentración final son particularmente robustos, ya que se derivan de la diferencia entre los tiempos de decaimiento, por lo tanto, son independientes de las fluctuaciones de la intensidad del láser o fuentes de láser absoluta.

Este esquema de comparar el tiempo de decaimiento de la cavidad sin que absorba gas, con el tiempo de decaimiento cuando un gas patrón está absorbiendo la luz no se lleva a cabo mediante la eliminación del gas de la cavidad, sino más bien mediante el uso de un láser cuya longitud de onda se puede ajustar. Al sintonizar el láser a diferentes longitudes de onda donde el gas absorbe la luz, y luego a longitudes de onda donde el gas no absorbe la luz, el tiempo de decaimiento "solo de la cavidad" puede ser comparado con el tiempo de decaimiento cuando un gas patrón está contribuyendo a la pérdida óptica dentro de la cavidad. De hecho, el láser se sintoniza en varias ubicaciones a través de línea de absorción espectral del gas patrón (las mediciones de decaimiento se llevan a cabo en todos estos puntos) y un ajuste matemático a la forma de esa línea de absorción es lo que realmente se usa para calcular la concentración de gas.

1.9 Vaporizador de alto rendimiento

El vaporizador debe ser configurado correctamente con el fin de lograr su mejor rendimiento. El ajuste del puerto de inyección del vaporizador debe establecerse de tal manera que la jeringa esté en la posición correcta, en el centro de la guía de la aguja, con una profundidad de inyección de 28 mm, Figura 1.20.

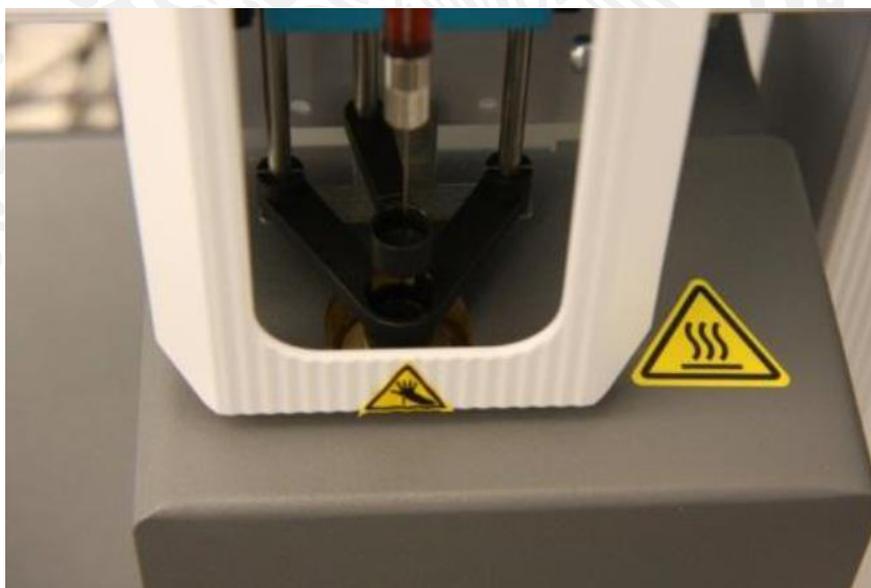


Figura 1.20 Alineación del puerto de inyección del vaporizador.

La velocidad de inyección se debe establecer en 50nL/seg, y el tamaño de la muestra se debe establecer en 3.3µL para el agua con bajas concentraciones de sólidos disueltos y 3.0µL para el agua con mayores concentraciones de sólidos disueltos.

El *software* del analizador láser permite la medición de múltiples muestras y se utiliza para controlar el origen de la muestra, el cual coincide con el correspondiente tiempo real leído. El vaporizador de alto rendimiento A0212 puede funcionar en una sola configuración.

Se utiliza para la rápida medición de muestras de agua líquida con una buena precisión. Inyecta y analiza automáticamente muestras líquidas. Cada ciclo de inyección es de menos de 2 minutos.

Una vez en marcha el *software* GUI (Interfaz Gráfica del Usuario) del analizador láser se iniciará automáticamente la recopilación de datos. Los datos también estarán disponibles en la interfaz gráfica de usuario en forma de pulsos, Figura 1.21.

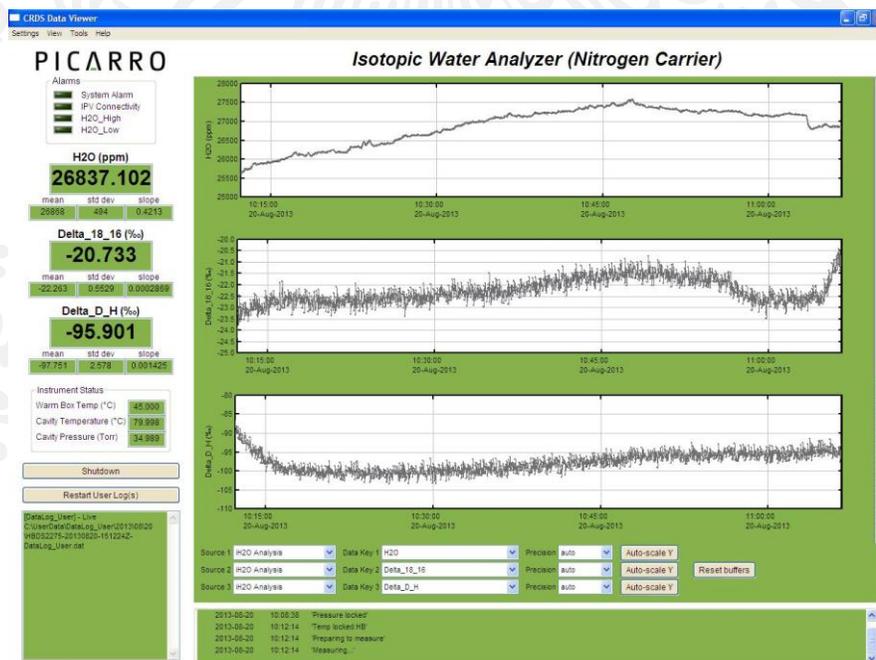


Figura 1.21 Interfaz Gráfica del Usuario (GUI).

El analizador láser permite archivar los datos mediante un alto nivel de compresión binario "HDF5" o "H5". El programa visor de archivos de datos instalado con el *hardware* permite abrir y convertir archivos H5, así como la visualización en forma de gráficos.

El *software* preinstalado *ChemCorrect*, permite cuantificar la contaminación en muestras de agua.

Puede ser necesario ajustar el volumen de inyección de muestra para mejorar la calidad de los datos.

1.10 Automuestreador

Durante el funcionamiento normal del analizador láser, el automuestreador o Inyector automático es controlado por el *software* (GUI) del equipo. Este *software* coordina las inyecciones de cada muestra y elimina la necesidad de intervención del usuario durante varias ejecuciones automatizadas de muestreo. Sin embargo, algunas veces se deberá realizar en forma manual la configuración y operación del inyector automático.

Es importante que cuando se esté ejecutando la configuración manual o bajo el control automatizado del inyector automático mantenerse fuera del camino del brazo XYZ en todo momento, ya que este se mueve con rapidez y de forma automática como parte de sus operaciones normales, para evitar lesiones o daños en el equipo.

El método predeterminado de fábrica (llamado 'Picarro') se utiliza para verificar las especificaciones de rendimiento del instrumento y se recomienda para uso general.

El trabajo o cola de trabajo de fábrica ofrece 6 inyecciones del vial número 1 de la bandeja. El trabajo predeterminado puede modificarse fácilmente para el suministro de inyecciones de todos los viales en la bandeja.

1.11 Preparación del automuestreador

Con cada instalación y a intervalos de tiempo periódicos el automuestreador o Inyector automático tendrá que ser recalibrado para asegurarse que la aguja entre en la posición correcta.

La calibración se realiza mediante el *software* "*Picarro Autosampler Training Utility Version xyz*", Figura 1.22. El analizador láser no tiene que estar en funcionamiento. En caso de que el inyector automático empiece a ir fuera de la alineación se tendrá que realizar de nuevo este procedimiento.

Se debe comprobar la alineación de la aguja una vez por semana o a menudo si el aparato se encuentra en un entorno que es más propenso a movimientos. Si la combinación del analizador y automuestreador se va a utilizar en un barco o en el soporte especial de un vehículo es necesario sujetar las piernas del inyector automático al analizador. Las plataformas móviles sólo son capaces de suministrar inyecciones manuales.

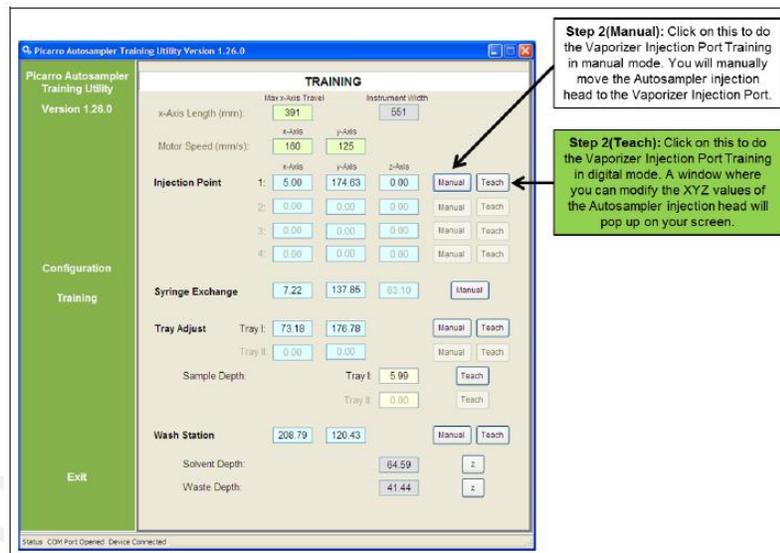


Figura 1.22 Calibración del puerto de inyección del vaporizador.

La Figura 1.23 presenta la disposición del inyector. Es necesario ajustar la posición del puerto inyector del vaporizador, vial 1 de la bandeja, puerto de residuos y posición e intercambio de la jeringa.

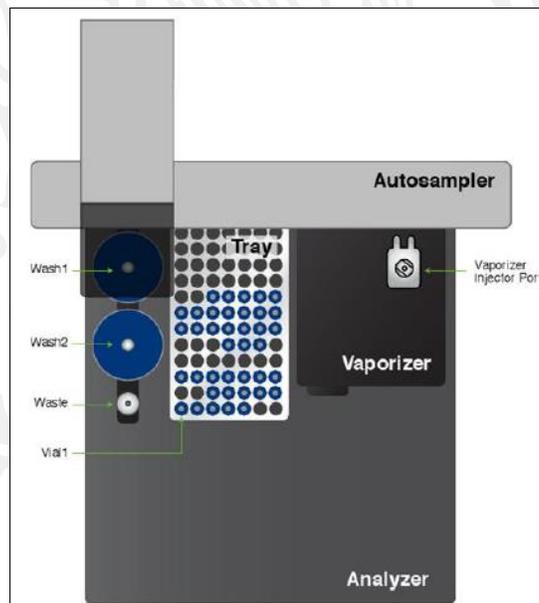


Figura 1.23 Vista desde la parte superior del analizador láser.

Antes del funcionamiento del automuestreador es necesario:

1. Configurar y activar el inyector automático del analizador. Figura 1.24.
2. Instalar tapones y septos a las estaciones de lavado, de residuos y al puerto inyector del vaporizador.
3. Colocar en el soporte la bandeja y los viales.
4. Instalar la jeringa. Figura 1.25. Así como las siguientes recomendaciones:
 - Ajustar punto de inyección del vaporizador
 - Establecer posición de intercambio de la jeringa
 - Ajustar la posición del vial 1 en la bandeja
 - Establecer profundidad de la muestra
 - Ajustar la posición del puerto de la estación de residuos



Figura 1.24 Software de configuración y entrenamiento del automuestreador.

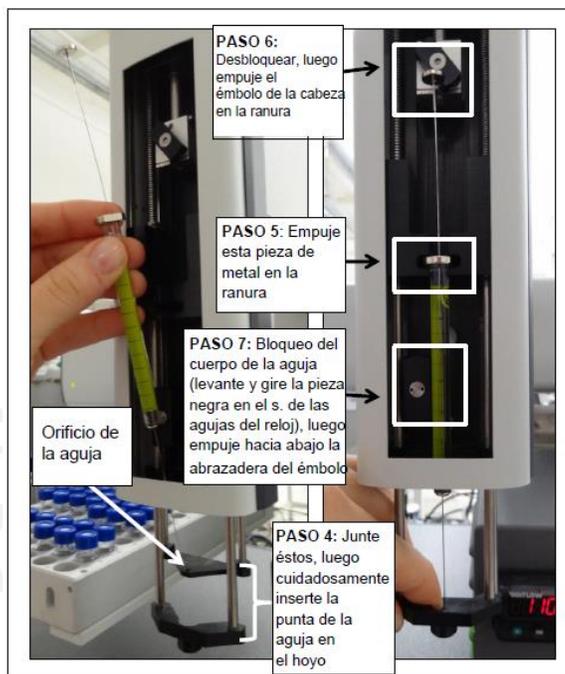


Figura 1.25 Instalación de la jeringa.

1.12 Inicio del automuestreador

1. Llenar cada vial con un mínimo de 200 μ L.
2. Instalar la jeringa
3. Llenar la estación 1 de lavado con solvente. Se recomienda Metil 1 Pirrolidinona 2 (NMP).
4. Colocar septo a la estación de residuos.
5. Colocar septo al puerto inyector del vaporizador.
6. Abrir tanque de gas (N_2 o gas seco).
7. Iniciar el *software* GUI (Interfaz Gráfica del Usuario) y esperar hasta que comience a registrar mediciones.
8. Verificar que esté cerrado el *software* "Autosampler training".
9. Iniciar el *software* "Autosampler Control".
 - Cambiar método o cargar cola de trabajo
 - Checar los trabajos a ejecutar
 - Ejecutar el método seleccionado
 - Cuando el automuestreador esté en operación la mayoría de las ventanas se desactivarán
 - En todo momento se puede utilizar pausa o resumir un trabajo

- Cuando ocurra un problema con la jeringa se puede hacer una pausa para cambiarla
- Si se termina la operación el automuestreador arrojará el contenido de la jeringa al puerto de residuos

10. Iniciar el *software* “*Coordinator*”.

11. El automuestreador esperará el comando INICIO del *software* “*Coordinator*”. Tan pronto se le dé la orden iniciará los métodos.

12. Después de terminar la cola de trabajos, el Automuestreador se detendrá y el Analizador láser seguirá esperando por una nueva inyección de muestra. Aquí se puede iniciar un nuevo trabajo haciendo *click* en “*new output file*” del “*Coordinator*”. Se pueden agregar más datos en el mismo archivo con solo iniciar una nueva “cola de trabajos” sin necesidad de pulsar “*new output file*”

1.13 Apagado del equipo láser

1. Activar el *software* (botón apagado en GUI) que apaga el *hardware* de forma automática.
2. A continuación apagar la bomba de vacío externa y el cilindro de gas (sólo si el equipo había requerido del mismo). Después todo lo demás.

2. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EXISTENTE EN EL ACUÍFERO INTERMEDIO DEL VALLE DE MÉXICO

La principal fuente de abastecimiento de agua de la zona metropolitana de la ciudad de México es el acuífero somero que la subyace. A través del tiempo, la intensidad de extracción por bombeo a que ha sido sometido este acuífero, ha ocasionado su sobreexplotación, dando como resultado un escenario de estrés hídrico, y de hundimiento del terreno. En la actualidad, la demanda de agua de la zona metropolitana rebasa en mucho a la oferta disponible que suministra el acuífero somero en explotación.

Diversos estudios hidrogeológicos del subsuelo del valle de México han sugerido la posibilidad de extraer volúmenes adicionales de agua de buena calidad, en condiciones de explotación competitiva, de los acuíferos profundos alojados en rocas de origen volcánico y marino. Por estas circunstancias, las autoridades de Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) han planeado la exploración de los acuíferos profundos del valle de México. Esta iniciativa ha sido iniciada con la perforación del primer pozo exploratorio profundo San Lorenzo Tezonco (PSLT), localizado en la Delegación de Iztapalapa, que contribuirá a precisar la litología del subsuelo, aportar información hidrogeológica e hidrogeoquímica de las formaciones que subyacen al acuífero somero, y ser utilizado como pozo productor de volúmenes adicionales de agua para abastecimiento público.

Como parte de los trabajos exploratorios, se desarrolló la caracterización isotópica del flujo subterráneo existente en el acuífero intermedio del valle de México. La caracterización se realizó con base en el análisis de la composición de isótopos estables de hidrógeno y oxígeno mediante la medición por tecnología láser.

Adicionalmente, el estudio tiene como alcances relacionar la información isotópica con las propiedades geoquímicas de los flujos de agua subterránea profundos existentes en el subsuelo, identificar el origen del agua que los recarga, establecer los tiempos de residencia del agua subterránea, y definir los procesos geoquímicos de la interacción agua-roca en el ambiente subterráneo profundo.

La metodología aplicada se basó en la toma de diez muestras de agua y varias mediciones de campo distribuidas en el período de tiempo que duró el programa de limpieza, desarrollo y aforo del pozo exploratorio profundo san Lorenzo Tezonco, construido por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). Las muestras obtenidas corresponden a fechas, tiempos y gastos de extracción diferentes, a fin de verificar posibles cambios en las propiedades hidrogeoquímicas y composiciones isotópicas del agua subterránea.

El ademe del pozo está constituido por tubería de acero ciega con secciones ranuradas a partir de las profundidades de: 923.69, 1,182.00, 1,360.00 y 1,468.00 metros; por tanto, las muestras colectadas fueron mezclas de agua compuestas por aportaciones de cuatro estratos de diferente espesor de la columna litológica. Las muestras se filtraron a presión

positiva con membrana de celulosa de 0.45 micrones de abertura de poro y se preservaron convenientemente a temperatura de 4°C, las destinadas para aniones, con ácido nítrico de ultra alta pureza para metales e hidróxido de sodio y yodo yoduro de potasio para análisis de radiocarbono. Se realizaron los análisis de laboratorio de las siguientes especies químicas e isotópicas:

- Metales: Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Te, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn.
- Aniones: F, CL, Br, NO₂, NO₃, PO₄, SO₄.
- Parámetros percederos: HCO₃, CO₃, OH⁻, alcalinidad total, ácido sulfhídrico (H₂S).
- Isótopos estables de oxígeno e hidrógeno: delta de oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) y delta de deuterio ($\delta^2\text{H}$).
- Isótopos para la datación del agua: Tritio ambiental (³H), carbono-14 (¹⁴C) y delta de carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$).

En el tren de descarga, mediante una celda de aislamiento, se realizaron las siguientes mediciones de campo: Alcalinidad total, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE) y temperatura (T).

El muestreo y las mediciones de campo se iniciaron el 11/01/2013 a las 17:30 horas, aproximadamente 33 horas después de haberse iniciado el bombeo, a fin de obtener muestras representativas del flujo subterráneo, libres de detritos y de residuos de fluidos de perforación. Los resultados muestran pequeñas variaciones en algunos parámetros fisicoquímicos a lo largo del intervalo de tiempo que duró el bombeo. Sobresale, un descenso neto de la temperatura de 9 °C, un incremento aproximado del pH de 0.2 unidades y una disminución de la conductividad eléctrica de 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos resultados muestran una tendencia de mejora en la calidad del agua a medida que se incrementa el tiempo de bombeo.

Los resultados de campo y laboratorio indican con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, que hay parámetros químicos que sobrepasan los límites máximos permisibles del agua para uso y consumo humano, estos son: Sólidos disueltos totales (SDT), sodio (Na), manganeso (Mn), fierro (Fe), bario (Ba) y aluminio (Al), y la concentración de arsénico (As) está en el límite de la norma.

La clasificación de la familia de agua de las muestras analizadas en función del contenido de iones mayoritarios es sódica-mixta (Diagramas de Piper y Stiff). De manera comparativa, esta familia contrasta con la de los aprovechamientos de las diferentes delegaciones de la ciudad de México, que captan el acuífero somero, las cuales son del tipo bicarbonatadas mixtas o sódicas.

Las composiciones de isótopos estables de hidrógeno (H) y oxígeno (O) de las muestras, no presentan variaciones a lo largo del intervalo de tiempo que duro la prueba de aforo,

indicando que el agua que recarga a los diferentes estratos captados por el pozo, proviene probablemente de la misma fuente. Asimismo, las firmas isotópicas coinciden sobre la línea meteórica local, evidenciando que el origen de la recarga es agua de lluvia precipitada sobre las sierras de las Cruces y Chichinautzin. Al no haber evidencias de fraccionamiento isotópico por evaporación, los resultados sugieren que la infiltración del agua de lluvia en la zona de recarga, es relativamente rápida y posteriormente fluye en forma lateral hacia las zonas de descarga. La similitud de las composiciones isotópicas del PSLT con resultados isotópicos de otros aprovechamientos ubicados al sur de la cuenca del valle de México, publicados en la literatura, indica que no hay dispersión de datos debida a efectos de altitud, sugiriendo que se trata de un sistema de buena mezcla.

La datación del agua subterránea mediante carbono-14 (^{14}C) fue medida por dos metodologías diferentes para comprobar los resultados de laboratorio entre sí (espectrometría de iones acelerados AMS y síntesis del benceno). Las edades aparentes del agua subterránea resultaron de 20,770 años en las muestras obtenidas al inicio de la prueba de aforo y de 16,040 años en la correspondiente al final de la misma. Estos tiempos de residencia son consistentes con la ausencia total de tritio ambiental en las muestras colectadas, lo cual indica que no se trata de aguas modernas.

Adicionalmente, las edades medidas por radiocarbono muestran consistencia con las propiedades litológicas y de fracturamiento de los materiales del subsuelo donde está emplazado el pozo, así como con el comportamiento de los parámetros que caracterizan a la prueba de aforo realizada: Al inicio del muestreo, el abatimiento del nivel dinámico fue de 187 m a 1400 RMP, con gasto de descarga de 19 LPS y temperatura del agua de 49 °C. Al final de la prueba, la profundidad del nivel dinámico disminuyó a 120 m, a 1900 RPM, con gasto de descarga de 70 LPS y temperatura del agua de 40 °C. Esta evolución en las condiciones de operación se presentó a medida que se removieron materiales residuales de la perforación, depositados en el fondo de la obra. Tal evolución sugiere que las aportaciones en la extracción provenientes de los estratos más profundos y con mayor grado de fracturamiento, corresponden a un flujo de menor temperatura y de menor tiempo de residencia.

Los parámetros que sobrepasan los límites permisibles para agua potable establecidos por la NOM-SSA-127 en SDT, Aluminio, Bario, Fierro, Manganeso y Sodio pueden ser controlados, lo cual hace completamente factible la potabilización de las captaciones del PSLT.

La modelación indica que la evolución geoquímica del flujo con los datos utilizados, desde la zona de recarga hasta el sitio de captación del PSLT, es factible.

Los resultados de campo y laboratorio, aún cuando son incipientes, permiten deducir que a mediano plazo la calidad del agua podría mejorar paulatinamente en función del tiempo de bombeo y de las condiciones de operación del pozo. Sin embargo, existe la posibilidad

que a mediano o largo plazos se presente el efecto contrario a causa de aportaciones provenientes del acuífero calizo subyacente.

Es ampliamente recomendable la continuación del monitoreo de las propiedades hidráulicas, hidroquímicas e isotópicas para confirmar la evolución del comportamiento dinámico y geoquímico del flujo que alimenta al PSLT. Así mismo, se debe ampliar este tipo de estudio a nivel regional e incluir aprovechamientos o pozos exploratorios que estén alimentados por flujos subterráneos profundos en el valle de México, así como en los acuíferos circunvecinos.

La exploración de los acuíferos profundos de la cuenca del valle de México requiere que se incluya la caracterización geoquímica e isotópica de las zonas de recarga (sierras Chichinautzin y Las Cruces), de los pozos más profundos ubicados en el valle de México, así como de aquellos que captan las mismas formaciones geológicas que el PSLT (sierra de Guadalupe), además de aquellos aprovechamientos que presentan anomalías termales y geoquímicas como: Peñón de los Baños, Peñón del Marqués, La Castañeda, etc.

Los resultados de campo y laboratorio de las especies químicas disueltas en el agua así como los isótopos estables e inestables analizados, además de las mediciones de campo se incluyen en las tablas 2.1 a 2.8.

Tabla 2.1 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.

Fecha	Hora	Identificación	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de la Muestra (°C)	pH	CE (µs/cm)	OD (mg/L)	Redox Muestra (mV)	δ18O (‰)	δD (‰)
29/10/2013	13:31:58	Casso	28.0	18.1	7.77	205	6.1	452	-10.5	-73
29/10/2013	15:14:21	Olivar de los Padres		16.9	7.54	175	6.4	349	-10.7	-74
30/10/2013	13:17:03	Manantial San Bartolo Ameyalco	14.4	11.6	6.89	120	8.1	591	-10.7	-73
30/10/2013	16:00:14	Totolapa	22.6	17.6	7.32	193	6.6	348	-10.5	-74
31/10/2013	13:14:18	Planta Potabilizadora Avenida del Castillo		31.5	6.4	2580	0.03	154	-9.2	-66
31/10/2013	09:41:45	Peñón de los Baños	20.7	43.6	6.6	4190	4.8	189	-9.1	-67
31/10/2013	11:29:13	Jardines del Pedregal No.5		27.6	6.19	1830	0.05	155	-9.4	-65
01/11/2013	12:48:06	Panamericana	28.0	23.6	6.746	966	0.07	95	-10.1	-71
01/11/2013	14:53:40	La Pastora	24.9	28.7	6.33	5660	0.31	161	-8.0	-68
05/11/2013	10:25:05	Tecomitl No.2	25.0	29.2	7.412	1298		32	-10.0	-69
05/11/2013	11:48:17	Agrícola Oriental No.5	28.7	25.0	7.075	2200	0.14	-23	-9.3	-63
05/11/2013	14:00:09	Santa Cantarina No.2	30.6	20.8	7.696	1525	0.08	71	-8.8	-62
05/11/2013	15:07:00	Panteón Civil No.2	24.1	23.1	7.404	1132	0.12	71	-10.0	-70
05/11/2013	16:35:36	Loma Estrella No.2		20.3	7.475	1207	1.15	230	-10.0	-70
06/11/2013	16:10:36	Limantitla		13.0	7.54	167	6.68	550	-10.9	-74
06/11/2013	15:26:42	Manantial Peña Pobre		13.9	7.609	229	8.15	919	-10.1	-69

Tabla 2.2 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.

Identificación	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO ₂ (como N) (mg/L)	Br (mg/L)	NO ₃ (como N) (mg/L)	PO ₄ (como P) (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Na (µg/L)	Li (µg/L)	Be (µg/L)
Casso	0.08	3.88	< 0.01	< 0.03	1.2	< 0.02	10.1	15400	10	< 1
Olivar de los Padres	0.05	1.76	< 0.01	< 0.03	0.61	< 0.02	2.36	9790	10	< 1
Manantial San Bartolo Ameyalco	0.05	1.01	0.04	< 0.03	0.67	< 0.02	5.37	4720	< 50	< 5
Totolapa	0.07	4.17	0.05	< 0.03	1.3	< 0.02	7.97	13000	< 20	< 2
Planta Potabilizadora Avenida del Castillo	< 0.01	402	< 0.01	0.85	< 0.01	< 0.02	7.58	259000	800	< 1
Peñon de los Baños	< 0.1	695	< 0.1	1.42	29	< 0.2	22.2	384000	1540	< 1
Jardines del Pedregal No.5	0.78	224	< 0.1	< 0.3	28.7	< 0.2	1.41	150000	240	< 1
Panamericana	< 0.05	38.3	< 0.05	< 0.1	12.7	< 0.1	5.41	74900	33	< 1
La Pastora	< 1	1110	< 1	< 3	319	< 2	92	845000	7240	< 1
Tecomitl No.2	0.22	153	< 0.05	0.52	13.6	< 0.1	2.8	216000	105	< 1
Agrícola Oriental No.5	0.14	266	4.13	0.73	68.1	< 0.2	< 0.3	266000	250	< 1
Santa Cantarina No.2	0.28	131	0.64	0.46	30.1	< 0.1	99.6	236000	102	< 2
Panteón Civil No.2	0.34	94.1	< 0.05	< 0.1	30.6	< 0.1	156	120000	102	< 2
Loma Estrella No.2	0.36	81.8	< 0.05	< 0.1	28.6	< 0.1	324	109000	120	< 1
Limantitla	0.47	5.84	0.04	< 0.03	2.19	0.08	10.8	14100	19	< 1
Manantial Peña Pobre	0.33	13.9	< 0.01	< 0.03	5.49	0.23	24.2	19700	< 20	< 2

Tabla 2.3 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.

Identificación	Mg (µg/L)	Al (µg/L)	Si (µg/L)	K (µg/L)	Ca (µg/L)	Sc (µg/L)	Ti (µg/L)	V (µg/L)	Cr (µg/L)	Mn (µg/L)
Casso	9190	< 20	29700	3870	11000	< 10	7.1	6.5	< 5	< 1
Olivar de los Padres	8720	< 20	27500	3360	10200	< 10	6.2	7.1	< 5	< 1
Manantial San Bartolo Ameyalco	6540	< 100	18700	< 2000	< 40000	< 50	5.5	< 5	< 30	< 5
Totolapa	9120	< 40	28400	3050	< 10000	< 20	7.4	5.2	< 10	< 2
Planta Potabilizadora Avenida del Castillo	198000	30	62700	47300	208000	19	15.2	< 1	< 5	1390
Peñon de los Baños	188000	< 20	75900	77900	204000	22	17.7	< 1	< 5	1880
Jardines del Pedregal No.5	97800	< 20	52500	21200	88900	15	12.2	< 1	< 5	196
Panamericana	47400	< 20	38700	17100	64700	12	8.6	1.6	< 5	1100
La Pastora	143000	33	58900	76800	149000	18	15.9	26	< 5	2020
Tecomitl No.2	19500	< 20	35500	17000	21500	10	9.3	1.1	< 5	167
Agrícola Oriental No.5	81800	< 20	40300	33900	84300	13	10.2	< 1	< 5	429
Santa Cantarina No.2	47800	< 40	31000	12900	39100	< 20	11.6	< 2	< 10	660
Panteón Civil No.2	48900	< 40	31300	11300	36000	< 20	9	< 2	< 10	446
Loma Estrella No.2	67700	< 20	27500	11500	55500	< 10	6.8	3.4	< 5	37.3
Limantitla	8020	< 20	25900	3210	< 7000	< 10	6	54.5	< 5	< 1
Manantial Peña Pobre	7150	< 40	20600	3250	< 10000	< 20	4.8	35.7	< 10	< 2

Tabla 2.4 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.

Identificación	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Rb
	(µg/L)									
Casso	< 100	< 0.05	< 3	2	11.3	< 0.1	0.1	0.57	< 2	7.63
Olivar de los Padres	< 100	< 0.05	< 3	< 2	< 5	< 0.1	0.1	0.45	< 2	10.1
Manantial San Bartolo Ameyalco	< 500	< 0.3	< 20	< 10	< 30	< 0.5	< 0.5	< 1	< 10	2.65
Totolapa	< 200	< 0.1	< 6	< 4	< 10	< 0.2	0.2	< 0.6	< 4	7.8
Planta Potabilizadora Avenida del Castillo	3360	8.23	< 3	< 2	8.4	< 0.1	0.4	6.58	< 2	64.8
Peñon de los Baños	1060	6.39	3.5	< 2	12	0.1	1.4	2.61	< 2	124
Jardines del Pedregal No.5	4250	0.691	< 3	5.5	23.8	< 0.1	0.2	1.04	< 2	25
Panamericana	290	1.22	< 3	< 2	< 5	< 0.1	0.1	0.76	< 2	22.4
La Pastora	250	8.88	5.4	2.3	23.5	0.1	2.6	2	5.1	130
Tecomitl No.2	360	0.111	< 3	< 2	< 5	0.1	1.35	0.37	< 2	20
Agrícola Oriental No.5	920	< 0.05	< 3	< 2	< 5	< 0.1	1.4	< 0.3	2.7	33.9
Santa Cantarina No.2	270	0.98	6	< 4	< 10	< 0.2	0.2	8.98	< 4	16.3
Panteón Civil No.2	500	0.228	< 6	< 4	10.4	< 0.2	0.8	1	< 4	13.5
Loma Estrella No.2	< 100	< 0.05	< 3	2.4	< 5	< 0.1	0.2	5.28	2.6	14.5
Limantitla	< 100	< 0.05	< 3	< 2	< 5	< 0.1	0.1	4.98	< 2	6.56
Manantial Peña Pobre	< 200	< 0.1	< 6	< 4	< 10	< 0.2	< 0.2	0.9	< 4	9.02

Tabla 2.5 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.

Identificación	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb
	(µg/L)									
Casso	109	0.03	0.2	0.21	< 1	< 2	< 0.1	< 0.01	< 1	< 0.1
Olivar de los Padres	109	< 0.03	0.1	0.08	< 1	< 2	< 0.1	< 0.01	< 1	< 0.1
Manantial San Bartolo Ameyalco	121	0.15	1	0.25	< 5	< 10	< 0.5	< 0.05	< 5	< 0.5
Totolapa	116	0.08	0.4	< 0.1	< 2	< 4	< 0.2	< 0.02	< 2	< 0.2
Planta Potabilizadora Avenida del Castillo	1960	0.22	0.5	0.06	1.9	< 2	< 0.1	< 0.01	< 1	< 0.1
Peñon de los Baños	2180	0.08	0.5	0.05	17	< 2	0.13	< 0.01	< 1	< 0.1
Jardines del Pedregal No.5	739	0.1	0.3	0.06	< 1	< 2	< 0.1	< 0.01	< 1	< 0.1
Panamericana	683	0.09	0.1	< 0.05	1.6	< 2	< 0.1	< 0.01	< 1	< 0.1
La Pastora	2500	0.25	2.7	0.07	3	< 2	0.28	< 0.01	< 1	< 0.1
Tecomitl No.2	209	< 0.03	0.45	< 0.05	2.7	< 2	< 0.1	< 0.01	< 1	< 0.1
Agrícola Oriental No.5	824	< 0.03	0.2	< 0.05	< 1	< 2	< 0.1	< 0.01	< 1	< 0.1
Santa Cantarina No.2	459	< 0.06	0.6	< 0.1	5.2	< 4	< 0.2	< 0.02	< 2	< 0.2
Panteón Civil No.2	370	0.06	0.6	< 0.1	< 2	< 4	< 0.2	< 0.02	< 2	< 0.2
Loma Estrella No.2	603	< 0.03	0.2	< 0.05	3.5	< 2	< 0.1	< 0.01	< 1	< 0.1
Limantitla	65.9	< 0.03	0.2	< 0.05	3.7	< 2	< 0.1	< 0.01	< 1	< 0.1
Manantial Peña Pobre	90.7	< 0.06	0.6	< 0.1	< 2	< 4	< 0.2	< 0.02	< 2	< 0.2

Tabla 2.6 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.

Identificación	Te (µg/L)	Cs (µg/L)	Ba (µg/L)	La (µg/L)	Ce (µg/L)	Pr (µg/L)	Nd (µg/L)	Sm (µg/L)	Eu (µg/L)	Gd (µg/L)
Casso	< 1	0.04	15.1	0.1	0.04	< 0.01	0.04	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Olivar de los Padres	< 1	0.31	14.5	0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Manantial San Bartolo Ameyalco	< 5	0.25	< 5	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Totolapa	< 2	0.38	7	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Planta Potabilizadora Avenida del Castillo	< 1	0.9	2140	0.04	0.07	< 0.01	0.04	< 0.01	0.1	< 0.01
Peñon de los Baños	< 1	8.15	950	0.03	0.02	< 0.01	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Jardines del Pedregal No.5	< 1	0.2	558	0.04	0.04	< 0.01	0.03	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Panamericana	< 1	0.02	311	0.02	0.07	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
La Pastora	< 1	4.48	58.9	0.01	0.06	< 0.01	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Tecomitl No.2	< 1	0.28	121	0.01	0.02	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Agrícola Oriental No.5	< 1	0.69	405	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Santa Cantarina No.2	< 2	0.24	27.8	0.04	0.12	< 0.02	0.06	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Panteón Civil No.2	< 2	0.28	81.2	< 0.02	0.06	< 0.02	0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Loma Estrella No.2	< 1	0.17	25.5	0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Limantitla	< 1	0.2	3.7	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Manantial Peña Pobre	< 2	0.4	8.2	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.04	< 0.02	< 0.02	< 0.02

Tabla 2.7 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.

Identificación	Tb (µg/L)	Dy (µg/L)	Ho (µg/L)	Er (µg/L)	Tm (µg/L)	Yb (µg/L)	Lu (µg/L)	Hf (µg/L)	Ta (µg/L)	W (µg/L)
Casso	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	< 0.01	< 0.2
Olivar de los Padres	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2
Manantial San Bartolo Ameyalco	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 1
Totolapa	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.04	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.4
Planta Potabilizadora Avenida del Castillo	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.01	0.02	< 0.01	< 0.2
Peñon de los Baños	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.2
Jardines del Pedregal No.5	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2
Panamericana	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2
La Pastora	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.01	0.08	< 0.01	< 0.2
Tecomitl No.2	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	1
Agrícola Oriental No.5	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2
Santa Cantarina No.2	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	2
Panteón Civil No.2	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.4
Loma Estrella No.2	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2
Limantitla	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2
Manantial Peña Pobre	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.4

Tabla 2.8 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero del Valle de México.

Identificación	Hg (µg/L)	Tl (µg/L)	Pb (µg/L)	Bi (µg/L)	Th (µg/L)	U (µg/L)
Casso	< 2	< 0.01	1	< 3	0.01	0.701
Olivar de los Padres	< 2	< 0.01	1	< 3	< 0.01	1.02
Manantial San Bartolo Ameyalco	< 10	< 0.05	< 0.5	< 20	0.08	0.095
Totolapa	< 4	< 0.02	< 0.2	< 6	< 0.02	0.492
Planta Potabilizadora Avenida del Castillo	< 2	0.315	4	< 3	< 0.01	3.62
Peñon de los Baños	< 2	0.079	1	< 3	< 0.01	19
Jardines del Pedregal No.5	< 2	0.014	1	< 3	< 0.01	0.019
Panamericana	< 2	0.049	< 0.1	< 3	< 0.01	18.4
La Pastora	< 2	0.085	1	< 3	< 0.01	4.57
Tecomitl No.2	< 2	< 0.01	< 0.1	< 3	< 0.01	< 0.01
Agrícola Oriental No.5	< 2	< 0.01	< 0.1	< 3	< 0.01	< 0.01
Santa Cantarina No.2	< 4	< 0.02	< 0.2	< 6	< 0.02	3.05
Panteón Civil No.2	< 4	< 0.02	< 0.2	< 6	< 0.02	0.206
Loma Estrella No.2	< 2	0.023	< 0.1	< 3	< 0.01	3.02
Limantitla	< 2	< 0.01	1	< 3	< 0.01	0.107
Manantial Peña Pobre	< 4	< 0.02	< 0.2	< 6	< 0.02	0.174

3. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA Y GEOQUÍMICA EN LA VERTICAL DE POZOS SIN EQUIPAR DE LA COMARCA LAGUNERA

3.1 Introducción

A principios de la década de los 1960s, las instituciones de salud de México reportaron problemas de salud en gente y animales, en la Comarca Lagunera, Estados de Coahuila y Durango, México, debido al consumo de agua subterránea con elevadas concentraciones de arsénico. El agua proviene del acuífero aluvial que representa la principal fuente de abastecimiento para más de dos millones de personas que habitan en la zona. Estudios realizados (CINVESTAV, 1986; IMTA, 1992) han delineado extensas áreas de la Región Lagunera donde las concentraciones de arsénico están por arriba de 25 µg/l, nivel máximo recomendado en la NOM-127-SSA1-1994 modificada en 2000 para agua de consumo humano.

Con el fin de comprender el comportamiento geoquímico del arsénico y otros componentes del agua subterránea, se han llevado a cabo diversos estudios hidrogeoquímicos e isotópicos (SICYGSA, 2000; Ortega, 2003; Molina, 2004). Molina considera en su trabajo que los altos valores de arsénico en el agua subterránea, son producidos por una combinación de reacciones de disolución de óxidos de Fe y desorción debido a elevados valores de pH. SICYGSA en su trabajo, sugiere que la desorción de As en función del pH del agua subterránea constituye un importante proceso de movilización, ya que detectó una buena relación entre el As disuelto y el pH. Ortega en su investigación, realizada en la laguna de Viesca, encontró valores bajos de arsénico en el acuífero carbonatado y altos en el agua del acuitardo arcilloso.

Estos estudios que se han realizado, analizan únicamente los constituyentes químicos del agua subterránea, sin abordar la geoquímica de los sedimentos del acuífero. En este estudio, se abordan tanto la geoquímica de los sedimentos como la del agua subterránea, a fin de identificar los mecanismos que influyen en la movilización del arsénico.

3.2 Área de estudio

La zona de estudio está ubicada en la parte septentrional de la República Mexicana y ocupa las porciones suroeste del Estado de Coahuila y noreste del Estado de Durango (Figura 3.1). Esta región se encuentra enclavada en la Comarca Lagunera, entre los paralelos 25° 15' 00" y 26° 15' 00" de latitud norte y entre los meridianos 102° 40' 00" y 104° 00' 00" al oeste de Greenwich.

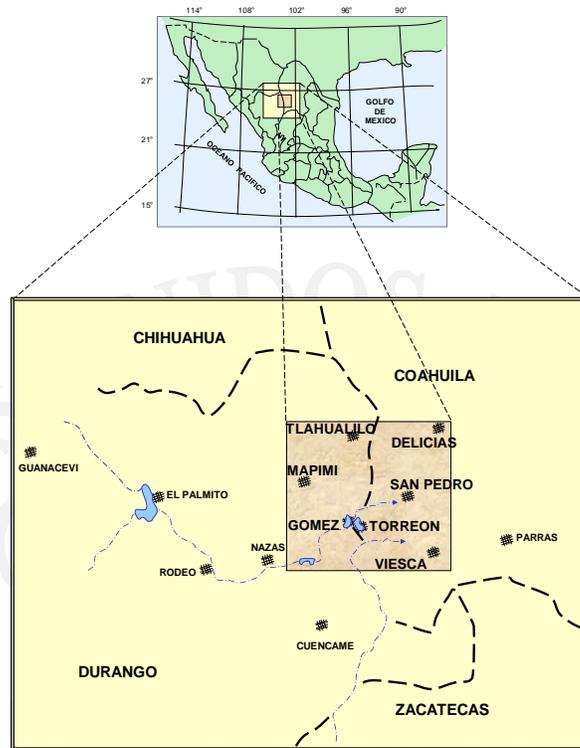


Figura 3.1 Localización del área de estudio

Las formaciones geológicas de la Comarca Lagunera datan del paleozoico ("formación Rodeo") al reciente aluvión cuaternario (Álvarez, 1961; Tamayo, 1982). La cuenca se compone tanto de depósitos sedimentarios (calizas, dolomitas, yeso, arenas arcillosas y conglomerados) como de rocas ígneas (depósitos volcánicos y granito). La sucesión geológica (INEGI, 1988) comprende: (1) La formación Jurásica, "Minas Viejas", con yeso, lutitas y calizas, (2) La formación Cretácica, "Aurora" con calizas y dolomitas, "Indura" compuesta de lutitas, calizas y limonitas (Tardy, 1974), "Caracol" con lutitas, arcillas y arenas, (3) La formación Terciaria "Ahuichila" compuesta de calizas y conglomerados y "Santa Inés" también formada de calizas y conglomerados con una matriz de arcilla impermeable, y (4) El Aluvión Cuaternario que conforma el acuífero granular de la región (Figura 3.2).

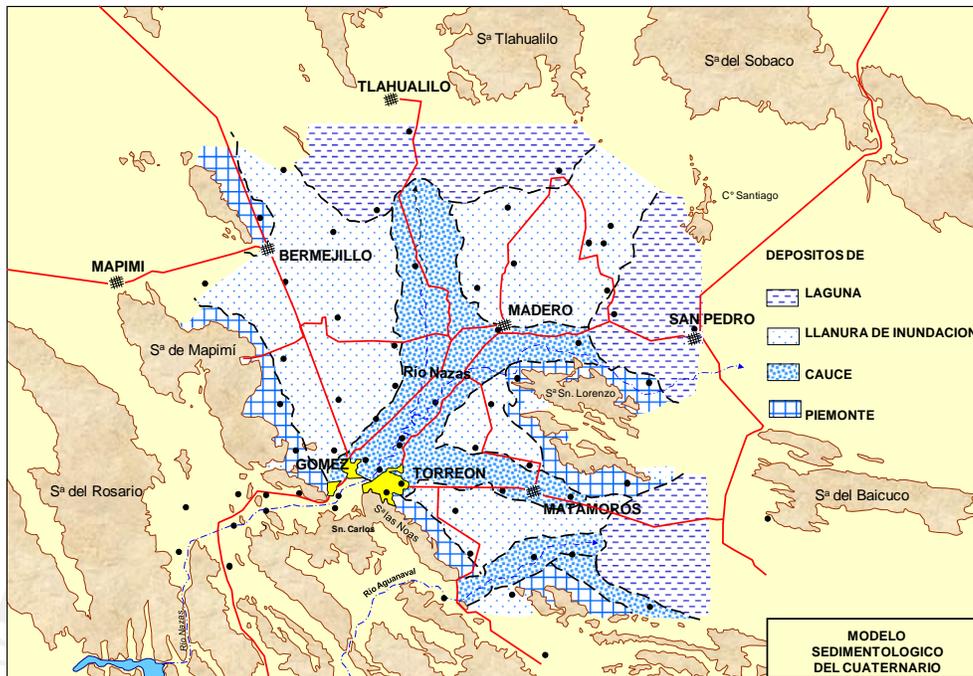


Figura 3.2 Modelos sedimentológico del aluvión del cuaternario

La Comarca Lagunera es una cuenca endorreica alimentada por los ríos Nazas y Aguanaval: (1) El Nazas, con 220 km de longitud, drena la zona oeste con una cuenca de 60 000 km² abarcando los estados de Coahuila y Durango. El flujo medio anual es de 1.1×10^9 m³ y es regulado por las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco (PIFSV-SARH, 1991), (2) El río Aguanaval, con 305 km de longitud, drena la parte sureste con una cuenca de 25 500 km². El flujo medio anual es de 1.6×10^8 m³ (PIFSV-SARH, 1991).

La temporada de lluvias comprende aproximadamente cuatro meses, entre Junio y Septiembre, con una precipitación media anual de 200-300 mm (PIFSV-SARH, 1991). La temperatura media anual es de 20.6°C. La circulación del agua subterránea en general es hacia el noreste, de las sierras hacia el valle (Figura 3.3).

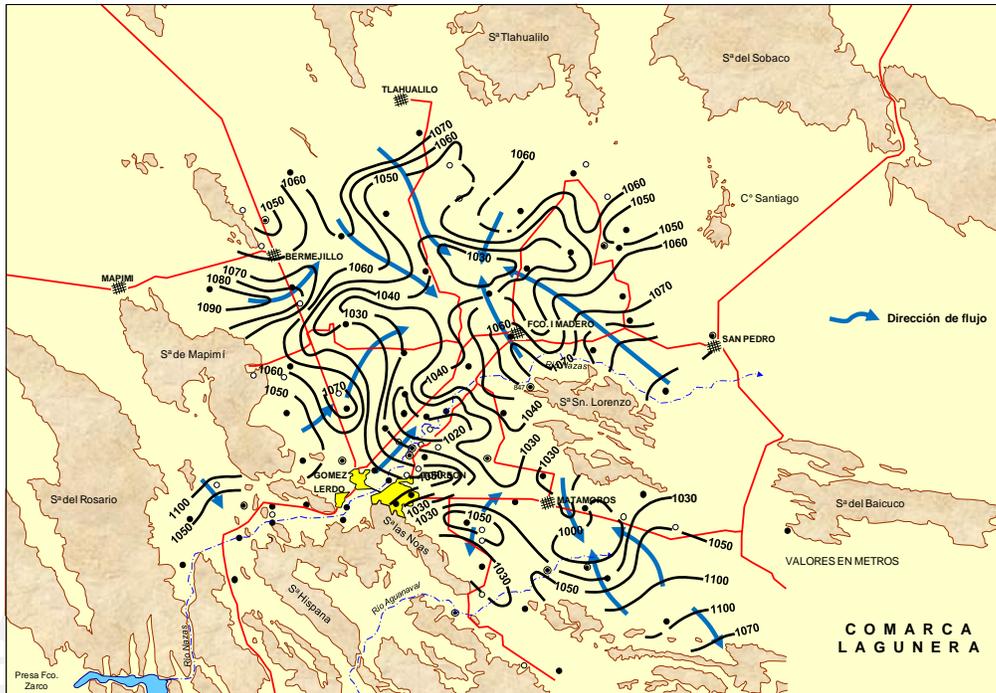


Figura 3.3 Flujo del agua subterránea

La Figura 3.4 también muestra la columna estratigráfica de la nueva construcción.

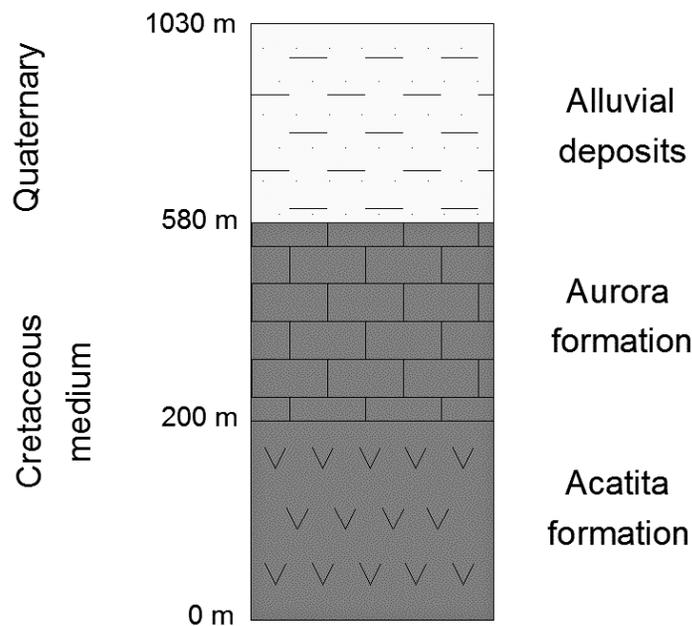


Figura 3.4 Columna estratigráfica del pozo de nueva construcción

En la parte oriental de la región se encuentra una vasta planicie de depósitos lacustres aluviales, donde en el pasado los ríos Nazas y Aguanaval descargan sus aguas, formando lagos tanto efímeras y perennes. Parte del agua infiltrada para formar un acuífero en materiales granulares.

La circulación del agua subterránea se caracteriza por un flujo general hacia el este de la sierra hacia la depresión (Figura 3.5). La profundidad de las aguas subterráneas varía entre 40 m y 170 m.

Ubicación de la nueva construcción de Madero se muestra en la Figura 3.6.

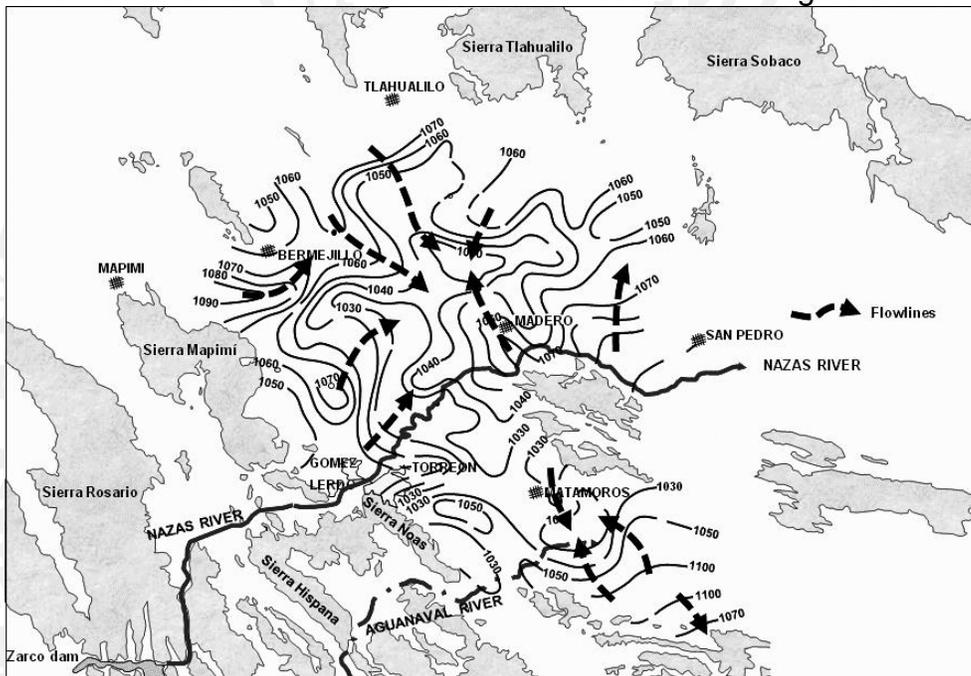


Figura 3.5 Flujo de agua subterránea

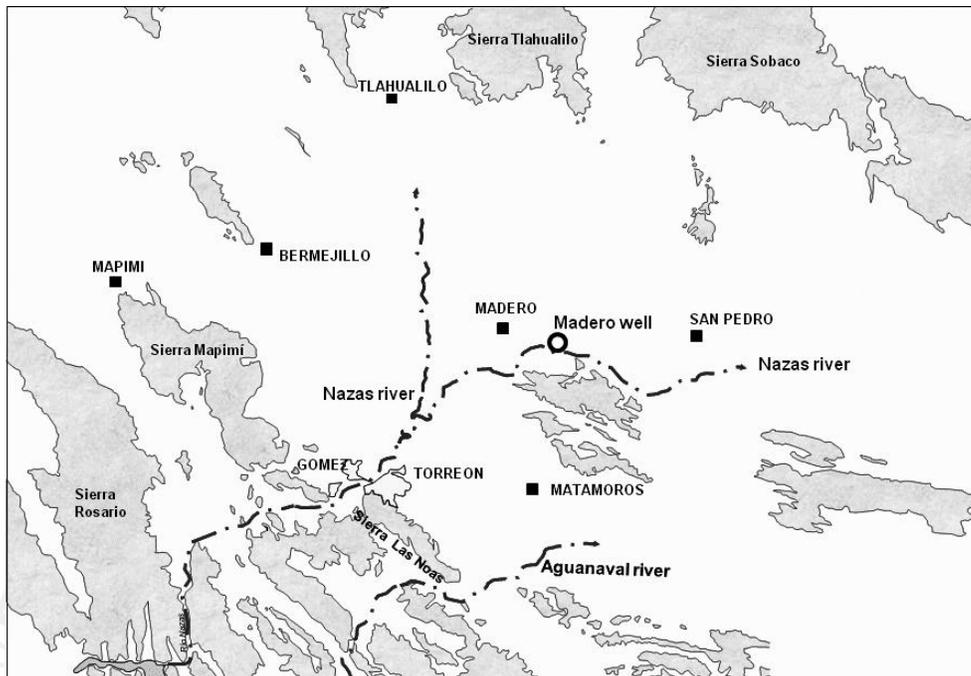


Figura 3.6 Ubicación de Madero

3.3 Metodología

3.3.1 Hidrogeoquímica

Las mediciones de pH, conductancia específica, temperatura, oxígeno disuelto (OD) y el potencial redox (Eh) se llevaron a cabo en el lugar, utilizando la sonda multiparamétrica YSI. Las profundidades del muestreo fueron 180 m, 200 m, 220 m, 240 m, 280 m y 300 m. Antes de la medición de parámetros de campo y recoger las muestras, tres veces el volumen del pozo se bombeó y se aseguró de que los diferentes parámetros se estabilizarán.

Muestras de agua subterránea se filtran a través de una membrana de 0,45 micras en línea, mediante el bombeo de agua de la sonda de toma de muestras mediante una bomba peristáltica. Las muestras filtradas se acidificaron hasta un pH ~ 2, por adición de HNO₃ ultra puro para determinar metales. Las muestras para determinar aniones, se conservaron sólo a 4°C. Todas las muestras fueron recolectadas en frascos de polietileno de alta densidad pre-limpiadas.

Concentraciones de elementos traza se determinaron mediante espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS).

3.3.2 Geoquímica de los sedimentos

Se tomaron seis muestras de núcleos a profundidades de 180 m, 200 m, 220 m, 240 m, 280 m y 300 m con una máquina de perforación de pozo que penetró 340 metros bajo la superficie. La litología está compuesta de arcilla, arena y grava capas intercaladas. La litología del pozo de sondeo, se muestra en la Figura 3.7. Como se puede ver, las capas de arcilla dividen el acuífero que resulta en una libre y un acuífero confinado.

Las muestras se secaron en una estufa a 35°C por 48h. Posteriormente se homogeneizaron, se cuartearon y se tamizaron a una malla de 60 (dp < 250µm).

A las muestras se les aplicó un procedimiento de extracción secuencial (ES) de siete pasos, para evaluar el fraccionamiento del arsénico (As) y su potencial de movilización. Se utilizó el protocolo propuesto por Briones-Gallardo et al. (2009), con modificaciones de los protocolos de Keon et al. (2001) y Tessier et al. (1979). En este método se distingue las siguientes fracciones mineralógicas en las cuales puede estar asociado el arsénico: fracción soluble (SOL); fracción adherida iónicamente (LA); fracción asociada a carbonatos (CAR); fracción asociada a las fases amorfas de hierro (AIMO); fracción asociada a óxidos de hierro y manganeso cristalino (CIMO); fracción asociada a materia orgánica y sulfuros (OMS) y la fracción residual (RES).

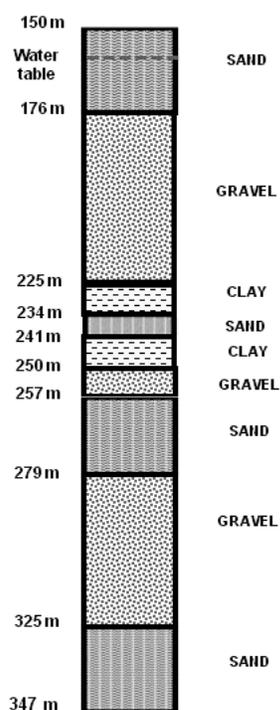


Figura 3.7 Litología del pozo Madero

Una vez preparada la muestra, se coloca en un vial cónico para comenzar con el protocolo de ES mediante el procedimiento siguiente: para la fracción SOL, la muestra se pone en contacto durante 20 minutos con agua deionizada a pH 5.5. El sobrenadante se centrifuga y se le realizan análisis químicos; la INTC consta de tres extracciones secuenciales sobre el sedimento recuperado de la fracción soluble con soluciones a 0.5 M de NaNO_3 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, y MgCl_2 . Los tiempos de contacto para cada extracción son de 20 min y entre cada extracción el sobrenadante se centrifuga y se le realizan análisis químicos, el reporte de esta fracción es la sumatoria de la concentración obtenida con cada agente extractante; para la CAR el sedimento recuperado de la fracción anterior se pone en contacto por 5 h con una solución de CH_3COONa (1 M) a pH 5.0 ajustado con CH_3COOH concentrado. El sobrenadante se separa por centrifugación y se le realizan análisis químicos; en la INTA el sedimento recuperado de la fracción anterior se pone en contacto con una solución de NaH_2PO_4 (1 M) durante dos ciclos de 24 h, centrifugando el sobrenadante y realizándole análisis químicos entre cada ciclo de extracción; para la determinación de la OFM, el sedimento recuperado de la fracción anterior se pone en contacto por 20-min con una solución de $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ (0.04 M) aforado con CH_3COOH al 25% v/v. Esta etapa se realiza en un baño maría durante 6 h a 96°C en un sistema de reflujo semicerrado. El sobrenadante se recupera por centrifugación y se le realizan análisis químicos; para la MOS el sedimento recuperado de la fracción anterior se pone en contacto con H_2O_2 al 30% a pH 2.0 durante dos ciclos; el primero de 2 h y el segundo de 3h a 85°C . Posteriormente se agrega una solución de acetato de amonio aforada con HNO_3 al 20% y se agita durante 20-min, el sobrenadante se centrifuga y se les realizan análisis químicos; finalmente para la RES el sedimento recuperado se somete a digestión ácida en un sistema de microondas utilizando como extractante una solución de HNO_3/HCl relación 3:2 Vol/Vol.

3.3.3 Resultados

La Tabla 3.1 muestra los valores de los parámetros hidrogeoquímicas medidos en el campo y en la Tabla 3.2, Tabla 3.3 en el laboratorio.

Tabla 3.1 Parámetros fisicoquímicos medidos en campo

Sample	pH	Temp °C	DO (mg/L)	Cond ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Eh(mV)
180 m	8.1	34	0.19	2089	-33
200 m	8.1	34	0.19	2109	-50
220 m	8.0	34	0.17	2116	-50
240 m	7.5	37	0.14	3215	-60
280 m	7.2	40	0.15	5840	-60
300 m	7.1	41	0.15	5912	-50

Tabla 3.2 Los parámetros químicos medidos en el laboratorio

Sample	SO4	Nitrates	Cl	F	Hardness	Alkalinity total	Al	As	B	Ba	Ca	Cr
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L	µg/L
180m	1250	0.2	32.09	0.47	780	42.09	N.D.	17.00	112.00	36.00	297	1.00
200m	1030	0.2	18.76	0.57	600	56.73	N.D.	31.00	110.00	26.00	215	1.00
220m	1075	0.2	18.76	0.54	580	54.9	N.D.	25.00	102.00	32.00	209	2.00
240m	1750	0.1	17.77	1.01	1000	56.73	N.D.	211.00	246.00	26.00	306	2.00
280m	2850	0.1	39.5	1.49	1770	58.56	N.D.	113.00	370.00	29.00	470	2.00
300m	2900	0.1	39.5	1.57	1820	65.88	N.D.	168.00	380.00	26.00	474	2.00

Tabla 3.3 Los parámetros químicos medidos en el laboratorio

Sample	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	S	Si	Sr	Ti	V	Zn
	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
180m	8.00	0.28	4.29	1.69	0.06	235	410	19.46	1.44	N.D.	0.01	0.05
200m	13.00	0.45	3.43	1.88	0.05	182	308	20.12	1.15	N.D.	0.02	0.06
220m	67.00	0.43	3.36	1.33	0.05	252	303	20.91	1.07	N.D.	0.01	0.41
240m	37.00	3.66	10.86	21.45	0.12	454	488	17.13	5.09	N.D.	0.02	0.13
280m	58.00	6.59	20.94	98.71	0.22	463	896	12.01	6.93	N.D.	0.01	0.29
300m	35.00	3.91	20.96	101.82	0.19	427	915	12.16	7.01	N.D.	0.01	N.D.

Valores de arsénico en comparación profundidad se muestran en la Figura 3.8. Se observa que las muestras de agua de las capas superiores (180m, 200m y 220m) cumplieron con el límite permisible mexicano de 25µg/L. También se observa que los valores de las capas más profundas (240m, 280m y 300m) superan significativamente al límite permitido.

Los valores de hierro frente a la profundidad se muestran en la Figura 3.9 El comportamiento es similar al observado con arsénico.; muestras de agua de las capas superiores (180m, 200m y 220m) cumplieron con el límite permisible mexicano de 0.3 mg/L. También se observa que los valores de las capas más profundas (240m, 280m y 300m) superan significativamente al límite permitido.

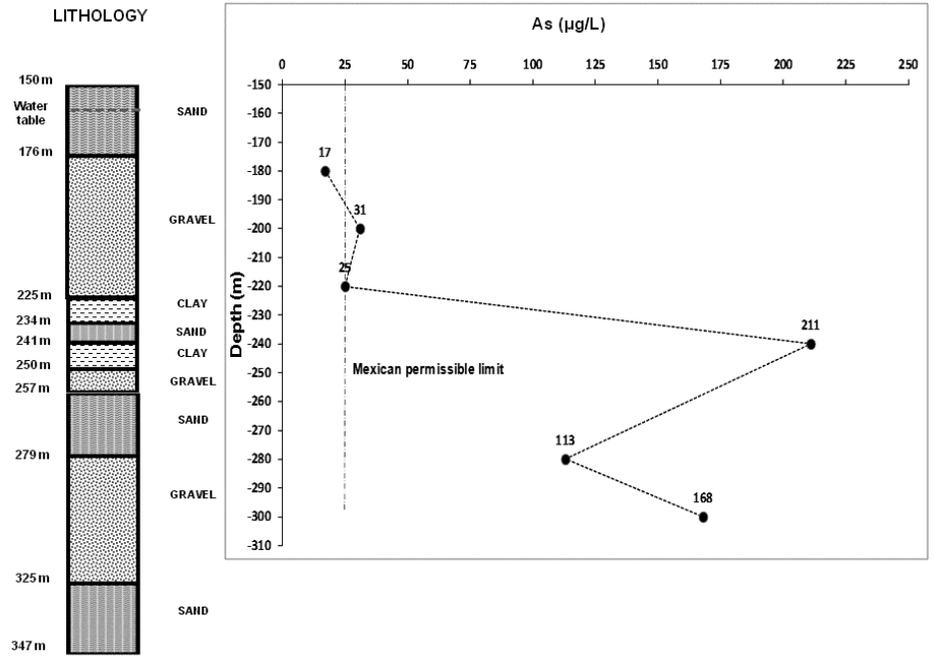


Figura 3.8 Arsénico-profundidad

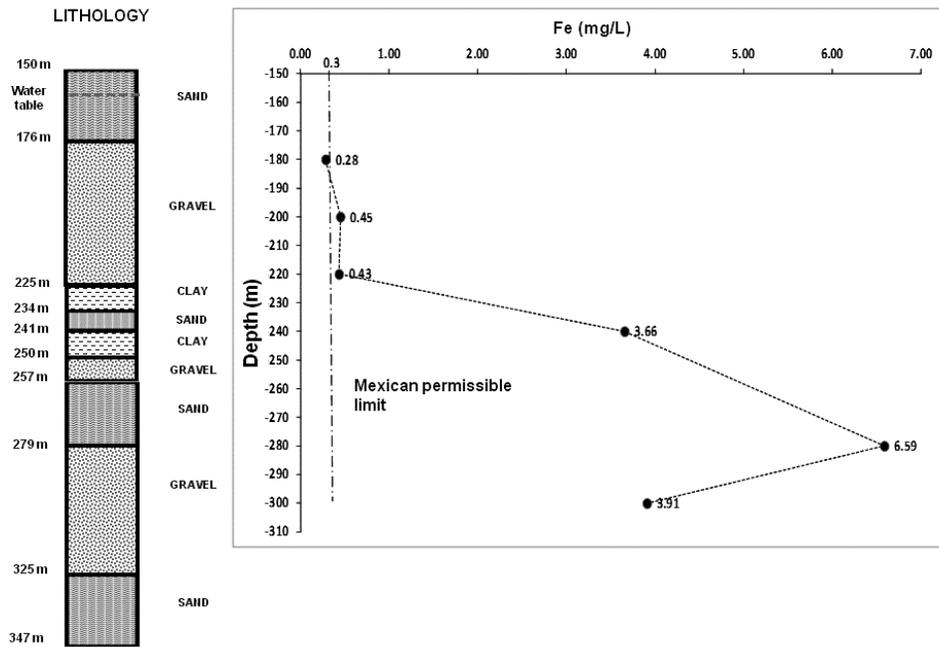


Figura 3.9 Hierro-profundidad

Los valores de pH frente a la profundidad se muestran en la Figura 3.10. Los valores más altos (~ 8) se presentan en el estrato más superficial y los valores más bajos (menos de 7) en la capa más profunda.

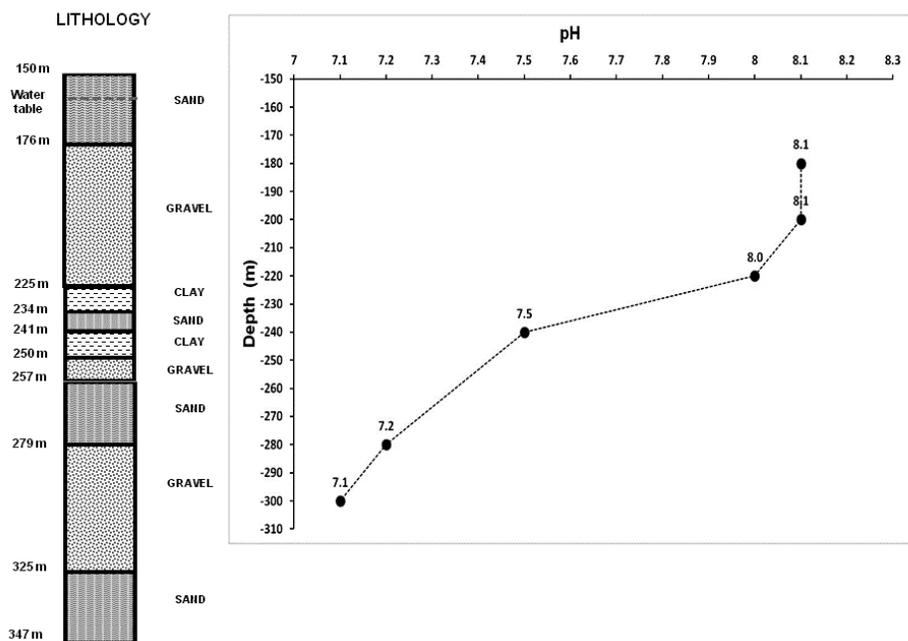


Figura 3.10 pH-profundidad

Los valores de oxígeno disuelto frente a la profundidad se muestran en la Figura 3.11. Como se ha indicado, el contenido de oxígeno en toda la columna de agua es muy bajo (<0,2 mg / L), presentando condiciones anóxicas

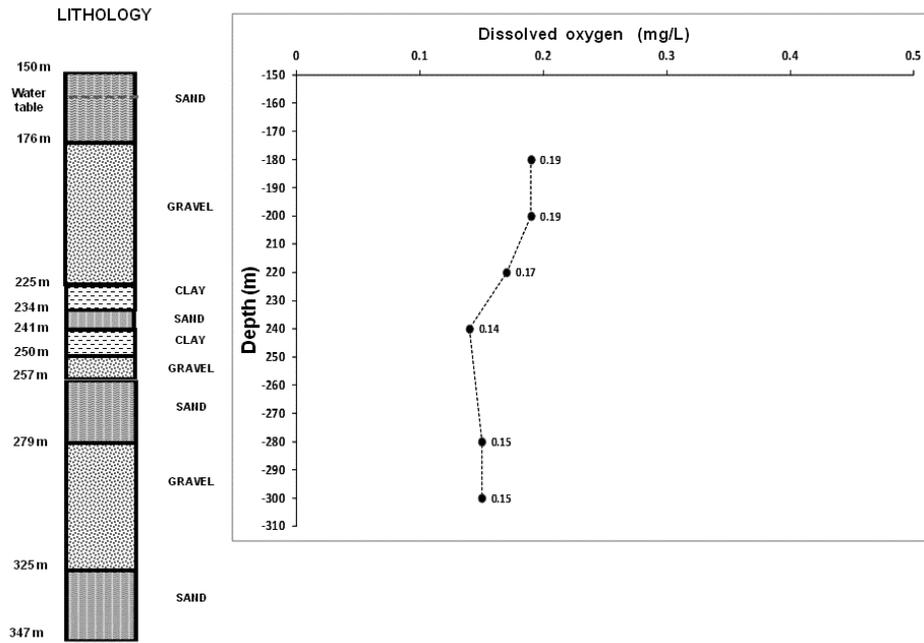


Figura 3.11 Oxígeno disuelto-profundidad

Los valores de NO_3 frente a la profundidad se muestran en la Figura 3.12. Como se ha indicado, el contenido de nitrato ($\sim 0,2$ mg/L) es muy abajo del límite permisible mexicana de 10 mg/L.

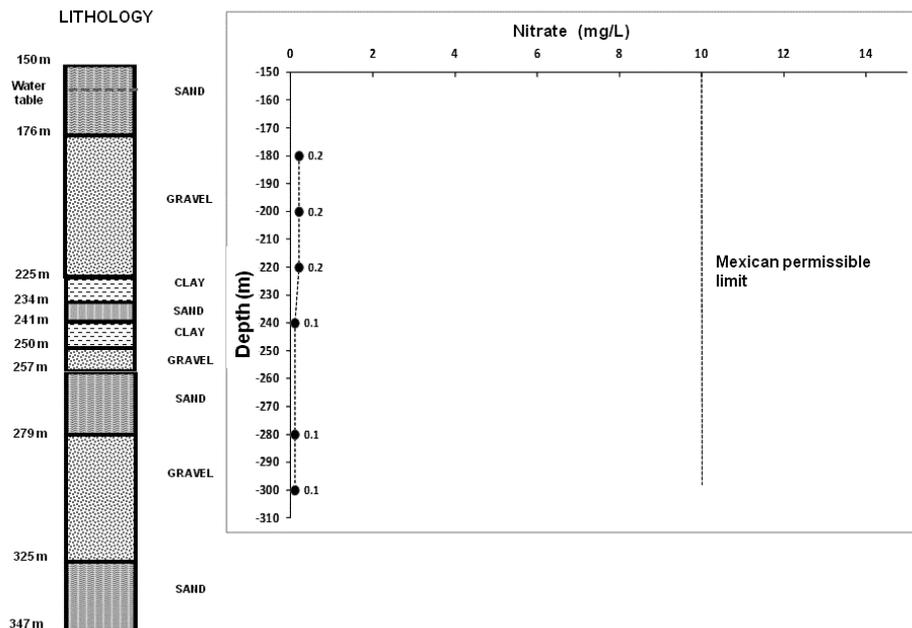


Figura 3.12 Nitrato-profundidad

La Figura 3.13 muestra el diagrama de estabilidad Eh frente pH de hierro en un sistema que contiene sulfato y bicarbonato. Los círculos blancos corresponden a la capa superficial y los círculos negros al estrato de profundidad. Tenga en cuenta que las muestras de agua de superficie se encuentran en el área de baja solubilidad, y las muestras más profundas en la zona de alta solubilidad

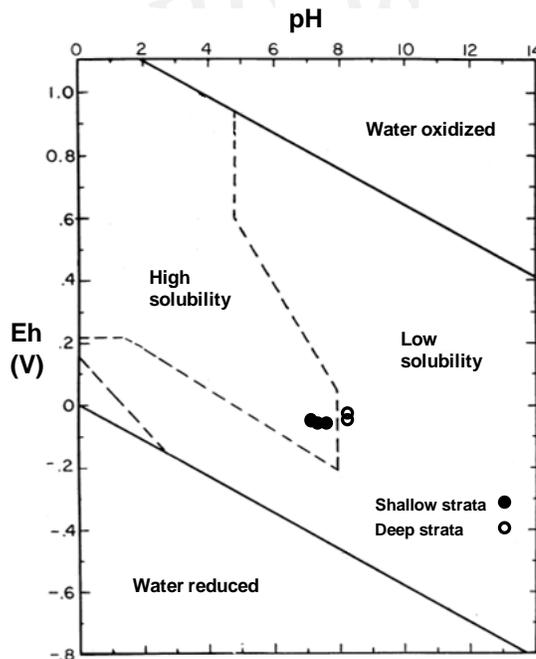


Figura 3.13 Diagrama de Estabilidad de hierro en Madero así, en presencia de bicarbonato y sulfato (Hem, J. D. 1960)

3.3.4 Química de sedimentos

La Tabla 3.4 y Figura 3.14 muestra la concentración total de arsénico en el sedimento. Como se ha señalado, el contenido de arsénico aumenta con la profundidad. Los valores son superiores a los valores medios mundiales (rango típico de 5-10 mg / kg; Smedley et al 2002). Según Smedley (2002) la concentración varía entre los sitios, pero generalmente aumenta con la profundidad.

Tabla 3.4 Concentración total de arsénico en el sedimento

Profundidad (m)	Arsénico en el Sedimento (mg /kg)
164	18.71

200	21.21
260	26.08
300	31.94
340	40.89

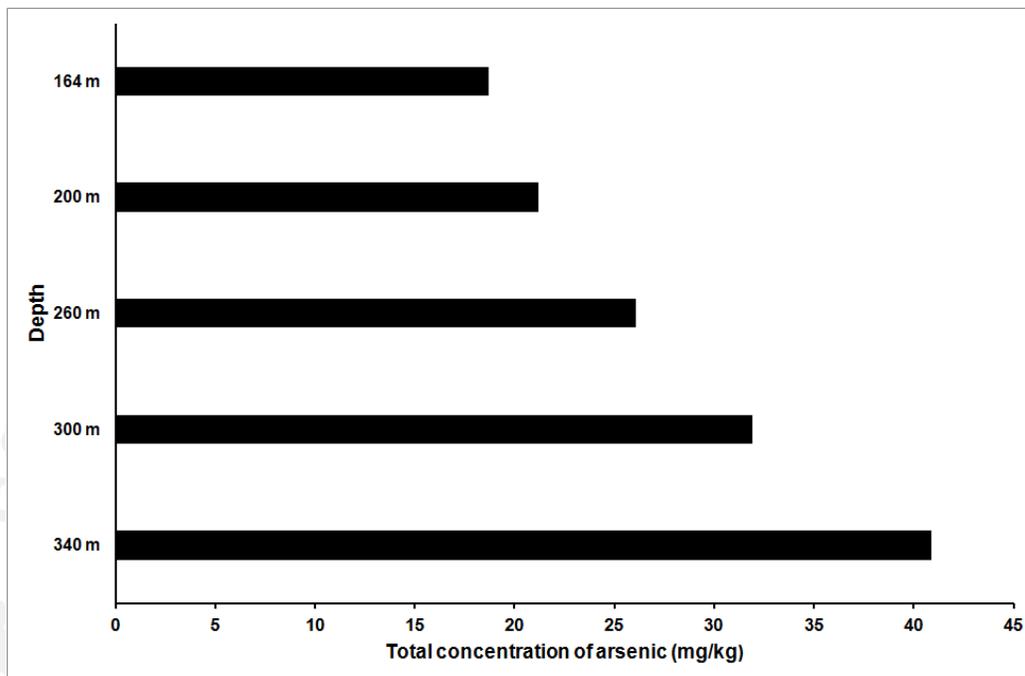


Figura 3.14 Concentración de arsénico en sedimento con relación a la profundidad

La Tabla 3.5, Tabla 3.6 y la Figura 3.15 muestran el fraccionamiento de arsénico asociados con óxido de hierro cubriendo así 9,34 – 20,9 mg/kg, lo que representa hasta el 50% del total de arsénico.

Tabla 3.5 Concentración de arsénico en mg/kg

	Concentración de Arsénico en mg/kg				
	164 m	200 m	260 m	300 m	340 m
SOL	0.12	0.30	0.32	0.34	0.58
LA	0.15	0.25	1.18	1.37	1.32
CAR	2.08	1.80	3.06	2.86	1.80
AIMO	1.75	2.77	2.64	6.55	9.20

CIMO	7.59	8.31	8.47	8.36	10.99
OMS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RE	7.02	7.78	10.41	12.46	17.00
Total	18.71	21.21	26.08	31.94	40.89

Tabla 3.6 Distribución porcentual de arsénico en los sedimentos

	Pocentaje de Arsénico				
	164 m	200 m	260 m	300 m	340 m
SOL	0.64	1.41	1.22	1.06	1.41
LA	0.80	1.17	4.52	4.28	3.22
CAR	11.11	8.48	11.73	8.95	4.40
AIMO	9.35	13.05	10.12	20.50	22.50
CIMO	40.56	39.17	32.47	26.17	26.87
OMS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RE	37.52	36.68	39.91	39.01	41.57
Total	100	100	100	100	100

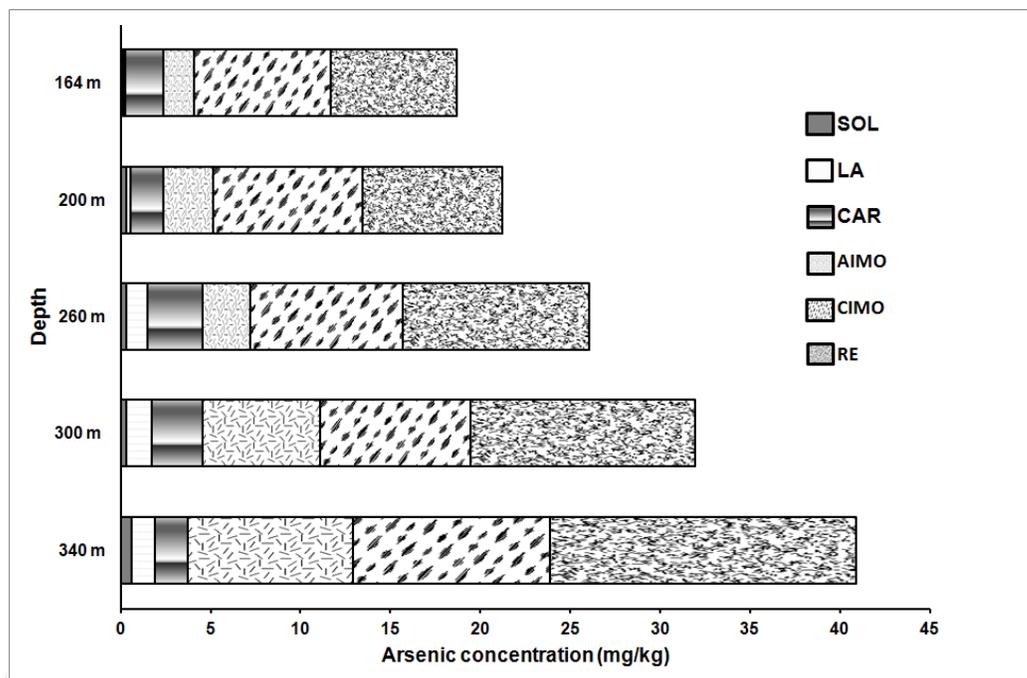


Figura 3.15 Distribución mineralógica de arsénico en los sedimentos

3.3.5 Modelado geoquímico

Disolución de óxidos de hierro es el proceso principal responsable de las altas concentraciones de arsénico en algunas aguas subterráneas (Welch et al. 1998, Nagorski et al. 1999). Reacciones modeladas que producen los resultados que se muestran en la Figura 3.16 consisten en un primer equilibrado entre el agua con una concentración acuosa de arsénico de 24 g/L (valor medio del acuífero superior) y el sedimento que contiene $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Este primer equilibrado precede a las reacciones de disolución y simula la equilibración durante el transporte y la deposición de óxidos de hierro que recubren los sedimentos en agua. La posterior reacción del arsénico de soporte de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ con el carbono orgánico en agua tiene un pH inicial de 7 (valor promedio del acuífero inferior), luego procede de una manera gradual con: (1) la liberación de arsénico, y (2) de equilibrio de la solución con el Fe restante $(\text{OH})_3$. Cada paso simula la sustitución completa de las aguas subterráneas y el equilibrio con el óxido. Como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ disolución y adsorción de arsénico procede, una concentración casi constante ASAQ se alcanza (~ 150 g/L). Una característica notable de la simulación es la concentración relativamente alta y persistente acuosa arsénico como el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ se agota. La concentración constante se produce cuando la masa de arsénico liberado de la Fe $(\text{OH})_3$ de disolución es igual a la masa en el agua después del equilibrio.

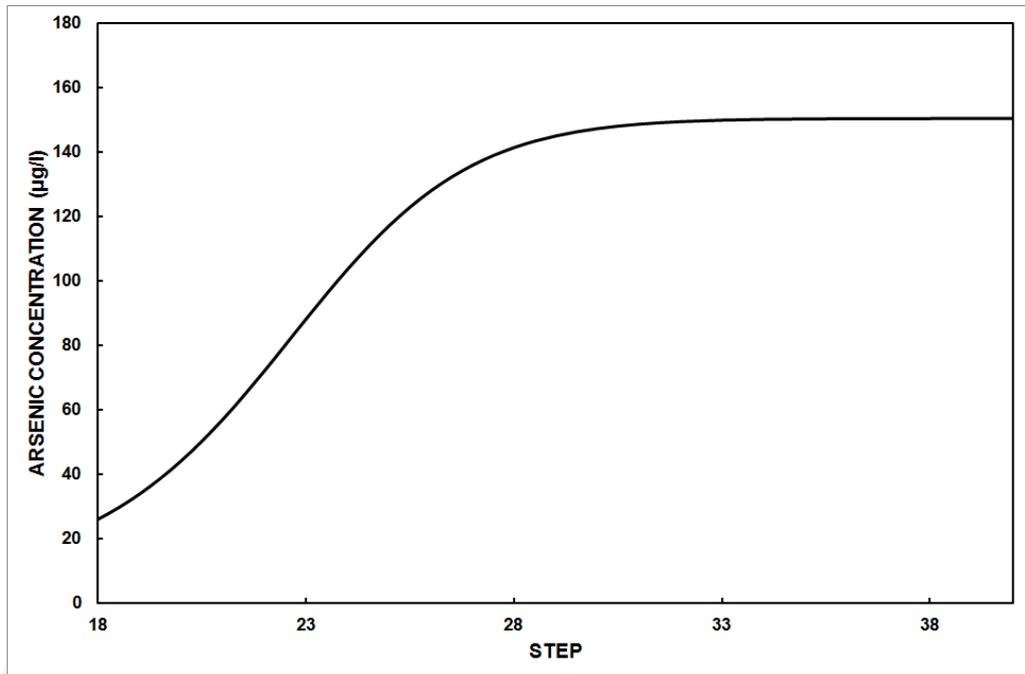


Figura 3.16 Arsénico asociado con la reducción de óxidos de hierro

Tabla 3.7 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero de la Comarca Lagunera.

Identificación	Perforado en formación	Coordenadas				T (°C)	pH	CE (µS/cm)	OD (mg/L)	Eh (mV)	
		Latitud		Longitud							Elevación (msnm)
		Gra	Min	Gra	Min						
San Fernando 4	Rellenos aluviales	25	30.457	103	32.271	1138	25.9	7.283	684	0.4	381.02
San Fernando 6	Rellenos aluviales	25	30.581	103	32.16	1138	22.6	7.570	393	0.28	421.28
El Hormiguero	Rellenos aluviales	25	41.116	103	20.638	1119	34.5	7.895	493	0.6	298.1
CAED No.2 (Jardín)	Rellenos aluviales	25	29.893	103	35.712	1151	23.6	7.165	787	1.04	417.08
Estadio	Rellenos aluviales	25	33.13	103	28.957	1128	24.8	7.360	878	2.02	353.44
SIDEAPA No.1	Caliza	25	33.874	103	30.195	1154	26.3	7.314	1052	2.54	323.14
SIDEAPA No.4	Caliza	25	34.203	103	30.61	1149	28.0	7.237	1052	2.82	306.4
SIDEAPA No.5	Caliza	25	33.477	103	30.069	1147	26.1	7.238	1063	2.37	260.58
SIDEAPA No.22	Rellenos aluviales	25	41.446	103	23.723	1122	31.7	7.900	311	5.72	389.26
SIDEAPA No.23A	Caliza	25	35.535	103	31.945	1145	27.7	7.285	1075	3.5	313.06
SIDEAPA No.36	Rellenos aluviales	25	36.77	103	26.321	1124	25.2	7.425	809	6.29	289.56
SIDEAPA No.37	Rellenos aluviales	25	35.546	103	28.092	1138	26.0	7.156	2120	6.87	287.8
SIMAS No.1	Rellenos aluviales	25	35.285	103	23.585	1124	25.1	7.416	877	6.82	904.78
SIMAS No.16	Rellenos aluviales	25	34°00'1	103	25.444	1134	24.1	7.410	782	8.2	498.98
SIMAS No.54 Reposición	Caliza	25	29.264	103	24.38	1143	24.7	7.395	1103	2.24	386.66
SIMAS No.59	Caliza	25	30.019	103	25.575	1150	24.8	7.390	1064	2.42	355.44
SIMAS No.60	Rellenos aluviales	25	32.439	103	24.654	1126	25.3	7.730	406	1.97	400.34
SIMAS No.64	Rellenos aluviales	25	32.392	103	21.45	1119	29.0	7.670	383	1.44	498.2
SIMAS No.65	Caliza	25	29.887	103	24.786	1134	25.7	7.400	1078	4.08	420.46
SIMAS No.75	Rellenos aluviales	25	37.43	103	22.564	1123	31.4	7.95	448	6.03	596.92
SIMAS No.78	Rellenos aluviales	25	33.18	103	21.242	1126	28.5	7.761	350	1.8	662.3
Rancho Guadalupe	Caliza	25	45.155	103	13.915	1108	36.1	7.095	3560	3.55	390.58
Rancho La Cupula	Caliza	25	39.275	103	22.67	1128	33.0	8.37	376	2.43	430.4
Pozo Madero	Rellenos aluviales	25	45.27	103	14.867	1111	35.6	8.24	731	4.15	361.68
Pozo Madero (*)	Rellenos aluviales	25	45.261	103	14.869	1110					
Pozo Tayson (*)	Rellenos aluviales	25	43.363	103	34.700	1116					
Pozo San Pedro (*)	Rellenos aluviales	25	45.615	103	14.618	1108					
331	Rellenos aluviales	25	36.42	103	25.224	1111					
Pozo San Felipe (*)	Rellenos aluviales	25	41.738	103	22.812	1121					
Pozo Dinamita (*)	Rellenos aluviales	25	44.775	103	37.966	1123					

* Se determinaron perfiles verticales

Tabla 3.8 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero de la Comarca Lagunera.

Identificación	δ18O	δD	F	Cl	NO2 (como N)	Br	NO3 (como N)	PO4 (como P)	SO4	Mg	As
	‰	‰	mg/L IC	mg/L IC	mg/L IC	mg/L IC	mg/L IC	mg/L IC	mg/L IC	mg/L ICP-OES	µg/L ICP-OES
San Fernando 4	-6.9	-58	0.3	12.8	< 0.02	0.2	1.69	< 0.04	118		
San Fernando 6	-5.9	-53	< 0.02	4.6	< 0.02	< 0.06	< 0.02	< 0.04	34.2		
El Hormiguero	-8.1	-65	2.27	43.2	< 0.02	0.19	0.64	< 0.04	56.3		
CAED No.2 (Jardín)	-6.7	-54	0.18	16	< 0.03	< 0.09	5.05	< 0.06	117		
Estadio	-7.9	-62	0.47	25	< 0.03	0.29	7.16	< 0.06	189		
SIDEAPA No.1	-7.6	-60	0.45	41.5	< 0.03	0.44	8.53	< 0.06	263	24.8	
SIDEAPA No.4	-7.7	-60	0.65	27.8	< 0.03	< 0.09	5.86	< 0.06	292	27	
SIDEAPA No.5	-7.7	-61	0.56	36.7	< 0.03	0.49	8.57	< 0.06	266	24.9	
SIDEAPA No.22	-7.9	-63	1.76	6.66	0.02	0.1	0.4	< 0.02	31.6		
SIDEAPA No.23A	-7.7	-61	0.55	27.7	< 0.03	0.3	< 0.03	< 0.06	309	29.3	
SIDEAPA No.36	-7.8	-61	0.43	36.3	< 0.03	0.29	< 0.03	< 0.06	166		
SIDEAPA No.37	-7.0	-59	< 0.1	130	< 0.1	< 0.3	< 0.1	< 0.2	867	48.3	
SIMAS No.1	-7.3	-60	0.13	49.1	< 0.03	< 0.09	< 0.03	< 0.06	181		
SIMAS No.16	-7.4	-61	0.12	45.8	< 0.03	< 0.09	< 0.03	< 0.06	133		
SIMAS No.54 Reposición	-8.0	-63	0.73	50.2	< 0.03	< 0.09	< 0.03	< 0.06	237		
SIMAS No.59	-7.9	-64	0.76	45.7	< 0.03	< 0.09	< 0.03	< 0.06	232		
SIMAS No.60	-7.4	-61	0.63	8.29	< 0.01	< 0.03	< 0.01	< 0.02	63.8		
SIMAS No.64	-7.4	-62	0.68	5.76	< 0.01	< 0.03	< 0.01	< 0.02	55.5		
SIMAS No.65	-7.7	-63	0.84	45	< 0.03	< 0.09	< 0.03	< 0.06	277		
SIMAS No.75	-7.4	-60	0.67	26.2	< 0.02	< 0.06	< 0.02	< 0.04	52.9		
SIMAS No.78	-7.4	-61	0.77	5.71	< 0.01	< 0.03	< 0.01	< 0.02	37.4		
Rancho Guadalupe	-7.7	-62	0.5	42.4	< 0.3	< 0.7	< 0.3	< 0.5	2210	110	300
Rancho La Cupula	-8.2	-65	1.81	4.14	< 0.01	< 0.03	< 0.01	< 0.02	30.4		260
Pozo Madero	-7.5	-60	1.16	9.32	< 0.02	< 0.06	< 0.02	< 0.04	250		
Pozo Madero (*)											
Pozo Tayson (*)											
Pozo San Pedro (*)											
331											
Pozo San Felipe (*)											
Pozo Dinamita (*)											

Tabla 3.7 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero de la Comarca Lagunera.

Identificación	Ca	Na	Sr	Na	Li	Be	Mg	Al	Si	K	Ca
	mg/L ICP-OES	mg/L ICP-OES	µg/L ICP-OES	µg/L ICP-MS							
San Fernando 4	66.9	44.1	880	> 35000	24	< 0.1	15900	9	15200	3390	> 20000
San Fernando 6	48.5	400	22000	> 35000	18	< 0.1	5430	3	12700	2430	> 20000
El Hormiguero	23.8	72.9	240	> 35000	45	< 0.1	482	< 2	19200	1740	> 20000
CAED No.2 (Jardín)	77.7	57.1	920	> 35000	28	< 0.1	16900	12	17400	3950	> 20000
Estadio	82.4	61.7	1190	> 35000	32	< 0.1	18200	10	15200	4490	> 20000
SIDEAPA No.1	104	65.4	1680	> 35000	56	< 0.1	> 20000	3	13800	4310	> 20000
SIDEAPA No.4	103	70.2	2230	> 35000	27	< 0.1	> 20000	4	13700	4190	> 20000
SIDEAPA No.5	105	70	1710	> 35000	57	< 0.1	> 20000	< 2	14100	4330	> 20000
SIDEAPA No.22	22.2	45.1	250	> 35000	27	< 0.1	431	9	17100	2140	> 20000
SIDEAPA No.23A	106	66.9	2310	> 35000	54	< 0.1	> 20000	< 2	13300	3940	> 20000
SIDEAPA No.36	92.7	55.9	570	> 35000	61	< 0.1	6780	< 2	15100	3420	> 20000
SIDEAPA No.37	320	81.8	5250	> 35000	84	< 0.1	> 20000	< 2	15800	6960	> 20000
SIMAS No.1	115		820	34100	55	< 0.1	6990	< 2	14600	4000	> 20000
SIMAS No.16	102		590	31300	55	< 0.1	7570	< 2	13800	4190	> 20000
SIMAS No.54 Reposición	92.9	89.9	1410	> 35000	74	< 0.1	18800	< 2	13700	4480	> 20000
SIMAS No.59	90.3	86.7	1350	> 35000	72	< 0.1	18900	115	13900	4470	> 20000
SIMAS No.60	43.4		400	24900	31	< 0.1	2390	< 2	13100	2660	> 20000
SIMAS No.64	36.4		440	29100	33	< 0.1	2030	< 2	15200	2620	> 20000
SIMAS No.65	100	81.2	2190	> 35000	66	< 0.1	19800	< 2	12400	4040	> 20000
SIMAS No.75	28	53	460	> 35000	63	< 0.1	1270	< 2	14800	3180	> 20000
SIMAS No.78	31.3		510	26600	30	< 0.1	2070	< 2	13900	2410	> 20000
Rancho Guadalupe	546	281	5850	> 35000	39	< 0.1	> 20000	< 2	12500	3200	> 20000
Rancho La Cupula	67.8			> 35000	87	< 0.1	462	< 2	13900	1450	8100
Pozo Madero	48.1	104	330	> 35000	87	< 0.1	455	< 2	17700	1510	> 20000
Pozo Madero (*)											
Pozo Tayson (*)											
Pozo San Pedro (*)											
331											
Pozo San Felipe (*)											
Pozo Dinamita (*)											

Tabla 3.8 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero de la Comarca Lagunera.

Identificación	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga
	µg/L ICP-MS										
San Fernando 4	< 1	1.8	3	< 0.5	39.1	< 10	< 0.005	< 0.3	0.5	34.4	< 0.01
San Fernando 6	< 1	1.6	2	< 0.5	56.8	< 10	< 0.005	< 0.3	1.1	0.6	< 0.01
El Hormiguero	2	2.2	26.7	0.5	1	< 10	< 0.005	< 0.3	< 0.2	< 0.5	0.04
CAED No.2 (Jardín)	1	2	3.7	< 0.5	1.4	< 10	< 0.005	< 0.3	0.9	< 0.5	< 0.01
Estadio	< 1	1.6	4.2	< 0.5	0.8	< 10	< 0.005	< 0.3	1.3	0.7	< 0.01
SIDEAPA No.1	2	2	3.3	< 0.5	0.6	10	< 0.005	< 0.3	1	0.9	< 0.01
SIDEAPA No.4	< 1	1.7	4	< 0.5	1.3	< 10	< 0.005	< 0.3	2.2	4.5	< 0.01
SIDEAPA No.5	2	2	3.4	< 0.5	0.1	20	< 0.005	< 0.3	2.9	1.6	< 0.01
SIDEAPA No.22	1	2.2	20	< 0.5	0.4	< 10	< 0.005	< 0.3	1	< 0.5	0.02
SIDEAPA No.23A	2	2	3.3	< 0.5	< 0.1	20	< 0.005	< 0.3	1.5	3.4	< 0.01
SIDEAPA No.36	4	3.3	18.6	0.8	0.3	140	0.028	< 0.3	0.7	8.6	< 0.01
SIDEAPA No.37	4	3.6	3	< 0.5	1.1	460	0.127	0.6	2.9	13.7	< 0.01
SIMAS No.1	4	3.1	3	2.2	0.5	170	0.05	< 0.3	1	32.5	< 0.01
SIMAS No.16	4	3.1	2.4	2	0.3	150	0.042	< 0.3	0.9	< 0.5	< 0.01
SIMAS No.54 Reposición	3	2.9	5	< 0.5	< 0.1	130	0.016	< 0.3	2.1	< 0.5	< 0.01
SIMAS No.59	3	4.7	4.6	< 0.5	0.8	180	0.041	< 0.3	2	19.4	0.03
SIMAS No.60	3	2.9	4.3	0.5	< 0.1	70	< 0.005	< 0.3	0.4	3.6	< 0.01
SIMAS No.64	4	3.1	4.3	1	< 0.1	50	< 0.005	< 0.3	< 0.2	< 0.5	< 0.01
SIMAS No.65	3	2.7	3.9	1.7	1.1	160	0.028	< 0.3	1	< 0.5	< 0.01
SIMAS No.75	4	3.2	12.6	0.6	1.1	60	< 0.005	< 0.3	1.5	3.2	0.01
SIMAS No.78	4	3.1	6.8	0.9	0.2	50	< 0.005	< 0.3	0.2	< 0.5	< 0.01
Rancho Guadalupe	< 1	1.8	4.7	< 0.5	3.4	< 10	< 0.005	0.5	3.2	3.6	0.05
Rancho La Cupula	4	3.4	35.3	< 0.5	0.1	30	< 0.005	< 0.3	1.2	< 0.5	0.03
Pozo Madero	5	3.7	18.8	< 0.5	6	90	0.005	< 0.3	2.3	1.9	0.06
Pozo Madero (*)											
Pozo Tayson (*)											
Pozo San Pedro (*)											
331											
Pozo San Felipe (*)											
Pozo Dinamita (*)											

Tabla 3.9 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero de la Comarca Lagunera.

Identificación	Ge	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd
	µg/L ICP-MS										
San Fernando 4	0.19	16.4	1.3	5.97	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	1.9	< 0.2	0.03
San Fernando 6	0.2	14.9	14	3.96	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	1.3	< 0.2	0.03
El Hormiguero	0.71	141	2.7	2.45	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	6.1	< 0.2	0.09
CAED No.2 (Jardín)	0.18	17.9	2.5	6.33	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	2.2	< 0.2	< 0.01
Estadio	0.14	22.1	3.3	6.16	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	9.2	< 0.2	0.03
SIDEAPA No.1	0.15	24	4.1	8.34	> 200	0.007	< 0.01	< 0.005	11.1	< 0.2	0.05
SIDEAPA No.4	0.19	35.5	3.8	6.68	> 200	< 0.003	< 0.01	0.005	17.9	< 0.2	0.06
SIDEAPA No.5	0.15	24.3	4.2	8.43	> 200	0.005	< 0.01	< 0.005	11.3	< 0.2	0.09
SIDEAPA No.22	0.45	116	1.1	2.51	> 200	< 0.003	0.02	< 0.005	3	< 0.2	0.01
SIDEAPA No.23A	0.16	35.1	3.4	8.13	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	19.5	< 0.2	0.09
SIDEAPA No.36	0.18	59.2	5.2	4.24	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	6.3	< 0.2	0.01
SIDEAPA No.37	0.25	12	14.5	10.9	> 200	0.022	< 0.01	< 0.005	1.5	< 0.2	< 0.01
SIMAS No.1	0.22	7.49	5.7	5.97	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	0.4	< 0.2	< 0.01
SIMAS No.16	0.13	5.79	4.1	6.19	> 200	< 0.003	0.01	< 0.005	0.5	< 0.2	< 0.01
SIMAS No.54 Reposición	0.14	27.1	4.3	7.27	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	9.5	< 0.2	0.05
SIMAS No.59	0.14	25.6	3.7	7.39	> 200	0.048	0.13	0.008	9.6	< 0.2	0.01
SIMAS No.60	0.16	13.7	0.7	4.84	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	1.5	< 0.2	0.01
SIMAS No.64	0.29	20.2	0.8	4.95	> 200	< 0.003	0.15	0.049	4.2	< 0.2	< 0.01
SIMAS No.65	0.19	44	6.1	9.23	> 200	< 0.003	0.01	< 0.005	8.7	< 0.2	0.04
SIMAS No.75	0.44	73.7	4.9	4.75	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	2	< 0.2	< 0.01
SIMAS No.78	0.27	30.9	0.4	4.62	> 200	< 0.003	0.01	< 0.005	6.4	< 0.2	0.01
Rancho Guadalupe	0.4	> 200	5.6	8.14	> 200	0.014	0.44	< 0.005	20.4	< 0.2	0.09
Rancho La Cupula	0.38	> 200	1.2	2.21	184	< 0.003	0.03	< 0.005	3.5	< 0.2	< 0.01
Pozo Madero	0.78	54.8	0.9	3.74	> 200	< 0.003	< 0.01	< 0.005	3.7	< 0.2	< 0.01
Pozo Madero (*)											
Pozo Tayson (*)											
Pozo San Pedro (*)											
331											
Pozo San Felipe (*)											
Pozo Dinamita (*)											

Tabla 3.10 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero de la Comarca Lagunera.

Identificación	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm
	µg/L ICP-MS										
San Fernando 4	< 0.001	< 0.1	0.24	< 0.1	1.31	62.5	0.087	0.098	< 0.001	< 0.001	< 0.001
San Fernando 6	< 0.001	< 0.1	0.54	< 0.1	0.16	39.8	0.072	0.073	< 0.001	< 0.001	< 0.001
El Hormiguero	< 0.001	< 0.1	0.75	< 0.1	0.055	11	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
CAED No.2 (Jardín)	< 0.001	< 0.1	0.3	< 0.1	0.347	64.8	< 0.001	0.01	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Estadio	< 0.001	< 0.1	0.67	< 0.1	1.32	60.6	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.1	< 0.001	< 0.1	0.86	< 0.1	2.09	57	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.4	< 0.001	< 0.1	0.78	< 0.1	2.71	30.8	0.004	0.013	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.5	< 0.001	< 0.1	0.84	< 0.1	2.08	54.5	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.22	< 0.001	< 0.1	0.57	< 0.1	0.12	10.5	0.013	0.017	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.23A	< 0.001	< 0.1	1.02	< 0.1	3.35	34.2	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.36	< 0.001	< 0.1	0.43	< 0.1	0.196	40.9	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.37	< 0.001	< 0.1	0.34	< 0.1	1.65	47.7	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.1	< 0.001	< 0.1	0.34	< 0.1	0.266	56.8	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.16	< 0.001	< 0.1	0.36	< 0.1	0.3	41.3	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.54 Reposición	< 0.001	< 0.1	0.68	< 0.1	2.07	64.8	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.59	< 0.001	< 0.1	0.71	< 0.1	2.12	64.8	0.133	0.426	0.009	0.132	0.016
SIMAS No.60	< 0.001	< 0.1	0.41	< 0.1	0.381	29.6	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.64	< 0.001	< 0.1	0.5	< 0.1	0.417	27.5	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.65	< 0.001	< 0.1	0.48	< 0.1	6.1	36.1	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.75	< 0.001	< 0.1	0.35	< 0.1	0.176	62.5	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.78	< 0.001	< 0.1	0.46	< 0.1	0.639	24.6	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Rancho Guadalupe	< 0.001	< 0.1	0.15	< 0.1	10.8	16.7	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Rancho La Cupula	< 0.001	< 0.1	0.63	< 0.1	0.085	7.7	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Pozo Madero	< 0.001	1.9	1.03	< 0.1	0.455	8.8	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Pozo Madero (*)											
Pozo Tayson (*)											
Pozo San Pedro (*)											
331											
Pozo San Felipe (*)											
Pozo Dinamita (*)											

Tabla 3.11 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero de la Comarca Lagunera.

Identificación	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta
	µg/L ICP-MS										
San Fernando 4	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
San Fernando 6	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
El Hormiguero	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
CAED No.2 (Jardín)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Estadio	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.1	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.4	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.5	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.22	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.23A	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.36	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIDEAPA No.37	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.1	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.16	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.54 Reposición	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.59	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.005	< 0.001
SIMAS No.60	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.64	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.001	0.023
SIMAS No.65	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.002
SIMAS No.75	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
SIMAS No.78	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Rancho Guadalupe	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.009	0.001
Rancho La Cupula	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Pozo Madero	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Pozo Madero (*)											
Pozo Tayson (*)											
Pozo San Pedro (*)											
331											
Pozo San Felipe (*)											
Pozo Dinamita (*)											

Tabla 3.12 Parámetros de campo y resultados de laboratorio de muestras de agua en el acuífero de la Comarca Lagunera.

Identificación	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
San Fernando 4	0.19	< 0.2	0.011	0.09	< 0.3	< 0.001	3.33
San Fernando 6	0.28	< 0.2	0.004	0.58	< 0.3	< 0.001	6.5
El Hormiguero	4.84	< 0.2	< 0.001	0.1	< 0.3	< 0.001	2.59
CAED No.2 (Jardín)	0.05	< 0.2	< 0.001	0.09	< 0.3	< 0.001	4.27
Estadio	0.27	< 0.2	0.209	0.05	< 0.3	< 0.001	5.25
SIDEAPA No.1	0.29	< 0.2	0.361	0.01	< 0.3	< 0.001	6.79
SIDEAPA No.4	0.33	< 0.2	0.486	0.08	< 0.3	< 0.001	7.85
SIDEAPA No.5	0.27	< 0.2	0.377	0.19	< 0.3	< 0.001	7.39
SIDEAPA No.22	2.86	< 0.2	< 0.001	0.49	< 0.3	< 0.001	2.27
SIDEAPA No.23A	0.4	< 0.2	0.607	0.02	< 0.3	< 0.001	7.75
SIDEAPA No.36	0.74	< 0.2	< 0.001	< 0.01	< 0.3	< 0.001	4.82
SIDEAPA No.37	0.06	< 0.2	0.02	< 0.01	< 0.3	0.003	13.6
SIMAS No.1	0.05	< 0.2	< 0.001	< 0.01	< 0.3	< 0.001	6.12
SIMAS No.16	0.06	< 0.2	< 0.001	0.02	< 0.3	< 0.001	5.52
SIMAS No.54 Reposición	0.23	< 0.2	0.232	0.04	< 0.3	< 0.001	7.95
SIMAS No.59	0.22	< 0.2	0.234	0.36	< 0.3	0.023	7.17
SIMAS No.60	0.25	< 0.2	< 0.001	0.01	< 0.3	< 0.001	2.3
SIMAS No.64	0.5	0.3	< 0.001	< 0.01	< 0.3	< 0.001	1.39
SIMAS No.65	0.29	< 0.2	0.247	0.07	< 0.3	< 0.001	6.34
SIMAS No.75	0.7	< 0.2	< 0.001	0.04	< 0.3	< 0.001	2.35
SIMAS No.78	0.5	< 0.2	< 0.001	< 0.01	< 0.3	< 0.001	3.16
Rancho Guadalupe	0.4	< 0.2	0.469	0.05	< 0.3	0.002	8.09
Rancho La Cupula	3.81	< 0.2	< 0.001	0.04	< 0.3	< 0.001	2.75
Pozo Madero	2.37	< 0.2	< 0.001	0.25	< 0.3	< 0.001	1.24
Pozo Madero (*)							
Pozo Tayson (*)							
Pozo San Pedro (*)							
331							
Pozo San Felipe (*)							
Pozo Dinamita (*)							

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL CAPITULO 1

4.1 Conclusiones

La instalación básica del Analizador se completó colocando el equipo en una mesa de trabajo junto con la bomba de vacío externa, se conectó la línea de gas entre el puerto de vacío del Analizador y la bomba de vacío externa, se conectaron los cables de alimentación CA con los botones de encendido en la posición de apagado, se conectó un tubo al orificio de escape de la bomba de vacío externa y se dirigió a al exterior para la ventilación de la mezcla de gases de aire/N₂ y H₂O de las muestras, se conectó el ratón, teclado, cable Ethernet y cable de la pantalla del monitor VGA a las conexiones en la parte posterior del Analizador.

En otra mesa se procedió al armado del automuestreador, se colocaron las 2 piernas al brazo automático XYZ, dejando un espacio entre las piernas de modo que el analizador se pudiera situar entre las mismas, las piernas se orientaron de tal modo que el lado más largo quedara en la parte delantera, se colocó el automuestreador sobre el analizador y las piernas se ajustaron firmemente al mismo. Se reunieron el soporte de estaciones, la estación de residuos, las dos estaciones de lavado, el soporte de la bandeja y la bandeja, y se colocaron en el automuestreador sin ajuste de los tornillos hasta estar en la posición correcta del vaporizador.

Se colocó el vaporizador de alto rendimiento en el carril del automuestreador, aflojando los dos tornillos en el soporte adjunto y ajustando a la posición final. Se conectaron los cables de alimentación CA del automuestreador y vaporizador, sin hacerlo todavía en la corriente eléctrica.

El vaporizador se conectó al analizador a través de una conexión USB y al tubo de gas (Inlet). Se aseguró que todos los cables de alimentación a la toma de corriente estuvieran conectados al analizador, vaporizador, bomba de vacío y automuestreador, manteniendo los interruptores en la posición de apagado. El automuestreador se deslizó con cuidado de su posición y se verificó que todas las conexiones estuvieran bien ajustadas.

Para el suministro de N₂ seco se utilizó la configuración B "*Automuestreador con vaporizador de alto rendimiento (A0212)*". El cilindro de N₂ seco se conectó a la línea de gas del puerto de "Purga WLM" del analizador. Se utilizó una T para alimentar por medio de tubería los puertos de purga y muestreo del vaporizador.

Finalizado todo lo anterior, se conectaron los cables de alimentación CA a la corriente eléctrica. Primero se abrió el suministro de N₂ seco a una presión de 3.0 ± 0.5 psi (0.2 ± 0.03 bar) posteriormente el interruptor de la bomba de vacío externa se colocó en la posición de encendido, así como, el del vaporizador. Se conectó el eliminador de corriente

al automuestreador y por último el interruptor del analizador se colocó en la posición de encendido.

El vaporizador se configuró correctamente con el fin de lograr su mejor rendimiento. El ajuste del puerto de inyección del vaporizador se estableció de tal manera que la jeringa estuviera en la posición correcta, en el centro de la guía de la aguja, con una profundidad de inyección de 24 mm de acuerdo a la distancia de la copa metálica del *liner* del vaporizador, 5 mm es igual a una profundidad de inyección de 28 mm, 4 mm a 27 mm, etc.

Se instalaron tapones y septos a las estaciones de lavado, de residuos y al puerto inyector del vaporizador, se colocaron en el soporte la bandeja y los viales, se instaló la jeringa. Posteriormente, la calibración del automuestreador se realizó con el software "*Picarro Autosampler Training Utility Version xyz*". Se comprobó la alineación de la aguja, la posición del puerto inyector del vaporizador, la posición del Vial 1 de la bandeja, del puerto de residuos y la posición e intercambio de la jeringa.

Para comprobar el funcionamiento del equipo analizador láser se llenó un vial con un mínimo de 200 μ L de agua desionizada, se llenó la estación 1 de lavado con solvente (Metil 1 Pirrolidinona 2, *NMP*), se colocó septo a la estación de residuos y al puerto inyector del vaporizador, se esperó hasta que la interfaz gráfica del usuario (GUI) comenzara a registrar mediciones para luego iniciar "*Autosampler Control*" y "*Coordinator*". Para hacer la prueba se seleccionó el método y trabajo de fábrica. Al finalizar el ejercicio pudo comprobarse que el equipo registraba resultados del análisis. En general, todos los componentes se encuentran funcionando.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda utilizar el vaporizador de alta precisión (A0211) como sugerencia del OIEA para unificar la metodología de trabajo a nivel mundial.

Se recomienda para alcanzar y mantener a largo plazo la exactitud y precisión de la importancia en los análisis isotópicos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, una serie de pruebas de rendimiento estandarizadas de isótopos de agua, plantillas de rutina de análisis de muestras, guías recomendadas de procedimientos y el software LIMS (*Laboratory Information Management System*) para el procesamiento de datos del analizador láser, que es una aplicación de base de datos relacional de Microsoft Access desarrollada específicamente para los usuarios de analizadores láser como un esfuerzo conjunto entre el Servicio Geológico de EE.UU. (USGS) y la Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA). Esta nueva aplicación de software automatiza todas las correcciones de datos de los analizadores, y proporciona a los usuarios un sistema de gestión de información de laboratorio (LIMS), de proyectos, de muestras y de datos del analizador; además, es gratuita del USGS (<http://isotopes.usgs.gov/investigación/temas/lims.html>) y del OIEA (http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_sampling.html#lms).

Para las mediciones se recomienda utilizar los estándares de agua de referencia de isótopos primarios disponibles para ^2H y ^{18}O (^{17}O), VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), VSMOW2 y SLAP2 (*Estándar Light Antartic Precipitation*) que están disponibles en el OIEA (www.iaea.org), en el NIST (www.nist.gov/srm/), o en el USGS (<http://isotopes.usgs.gov/>), en cantidades limitadas para cada 3 años, destinados para uso diario en el laboratorio como estándares de calibración.

Es fundamental para los isótopos, mantener cuidadosamente los estándares dentro del laboratorio, de lo contrario un mal almacenamiento puede derivar en la inexactitud del rendimiento del equipo láser, el enriquecimiento de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ por evaporación afecta los resultados negativamente.

5. CONCLUSIONES DEL CAPITULO 3

Los datos geoquímicos dieron los siguientes resultados para Madero:

- 1 -. Muestras de agua superficiales tienen valores bajos de arsénico (25 mg/L) y hierro (0,3 mg/L).
- 2 -. Muestras de aguas profundas tienen valores altos de arsénico (hasta 211 mg/L) y hierro (hasta 6 mg/L).
- 3 -. El diagrama de estabilidad hierro muestra que el agua del estrato superficial se encuentra en una zona de baja solubilidad, y de aguas profundas en una zona de alta solubilidad.
- 4 -. El sedimento contiene arsénico y se asocia principalmente con óxidos de hierro.
- 5 -. Cuando se disuelven los óxidos de hierro, arsénico contenido se libera en la producción de las aguas subterráneas altas concentraciones ($113 \text{ mg/L} \leq \text{Como} \leq 211 \text{ mg/L}$).

Bibliografía

Álvarez J. M. (1961) Provincias fisiográficas de México. Sociedad Geológica Mexicana 34(2),17.

Appelo C.A.J. and Postma D. (1993) Geochemistry, Groundwater and Pollution. Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands. 536 pp.

Briones-Gallardo R., Vázquez-Rodríguez G. and Monroy-Fernández M.G. (2009) Arsenic mobility in the rhizosphere of the tolerant plant *Viguiera dentate*. p 387- 393. In J. Bundschuh, M.A. Armienta, P. Bhattacharya, J. Matshullat and A.B. Mukherjee (Eds.). Natural arsenic in groundwater of Latin America. Serie: Arsenic in the Environment Vol. 1. p 742. CRC Press/Balkema. AK Leiden, The Netherlands. ISBN: 978-0-415-40771-7.

Clark, I.D., y Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, N.Y., U.S.A., 63–108 y 287-290.

Drever, J.I. (1997) The Geochemistry of Natural Waters. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 436 p.

González-Hita, L. y Sánchez, L.F. (1992). *Las técnicas isotópicas, una herramienta eficaz para el diagnóstico y evaluación de las aguas subterráneas*. Ingeniería Hidráulica en México. 64-85.

Hem, J. D. (1960) Chemistry of iron in natural water, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1459-B, p. 33-55.

IAEA, (2005). Isotopes in the water cycle, past, present and future of a developing science.

IAEA, VIENNA, 2009, Laser Spectroscopic Analysis of Liquid Water Samples for Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes.

INEGI (1988) Carta hidrológica de aguas subterráneas. Dirección general de geografía del territorio nacional, México, Torreón G13-9 (Escala 1/250000).

Leonard I. Wassenaar, Tyler B. Coplen, and Pradeep K. Aggawal. Environmental Science & Technology. 2013. Approaches for Achieving Long-Term Accuracy and Precision of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ for Waters Analyzed using Laser Absorption Spectrometers.

Molina A. (2004) Estudio hidrogeoquímico en la Comarca Lagunera, México. Dissertation, National University of Mexico.

Keon N.E., Swartz C.H., Brabander D.J., Harvey C. and Hemond H.F. (2001) Validation of an arsenic sequential extraction method for evaluating mobility in sediments. Environmental Science & Technology 35, 2778-2784.

Nagorski S.A. and Moore J.N. (1999) Arsenic mobilization in the hyporeic zone of a contaminated stream. *Water Resources Research* 35, no. 11:3441-3450.

Picarro, Inc. 2012. Installation: L2110-*i* Analyzer and its Peripherals

Picarro, Inc. 2012. Operation, Data Analysis, Maintenance, Troubleshooting: L2110-*i* Analyzer and its Peripherals

SSA (2002) Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994. Official Journal of the Federation.

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

Tamayo J. L. (1982) Geografía moderna de México. Editorial Trillas, México.

Tardy, M. (1974) Les grands traits structuraux du secteur transverse de Parras, Sierra Madre Oriental, Mexique. Conference géologique des Caraïbes VII, Saint Francois, pp. 595-605.

Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry* 51, 844-851.

Welch A.H. and Lico M.S. (1998) Factors controlling As and U in shallow groundwater, southern Carson Desert, Nevada. *Applied Geochemistry* 13, no. 4:521-539.