
Actividades de Uranio y Radio en Muestras de Agua Subterránea de las Principales Ciudades del Estado de Chihuahua

Lourdes Villalba, Luis Colmenero Sujo

Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV).

Av. Miquel de Cervantes Saveedra 120

C.P. 31109 Chihuahua, México.

lourdes.villalba@cimav.edu.mx ; luis.colmenero@cimav.edu.mx

María Elena Montero Cabrera

Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV).

Av. Miquel de Cervantes Saveedra 120

C.P. 31109 Chihuahua, México.

elena.montero@cimav.edu.mx

Resumen

El uranio naturalmente se encuentra en cuatro estados de valencia +3, +4, +5 y +6 siendo el estado hexavalente el más soluble, el cual juega un papel importante en el transporte del uranio en el medio ambiente.

Las altas concentraciones de uranio en agua se encuentran no sólo en aguas cercanas a minas uraníferas, sino también se encuentran en algunas aguas minerales o bien en aguas que son extraídas de pozos profundos como sucede en el Estado de Chihuahua, donde las aguas subterráneas son la fuente fundamental de consumo.

El radio es un producto de desintegración del uranio, el contenido de radio en el agua es considerado la segunda fuente de radiactividad natural. La distribución de radio en el agua esta en función del contenido de uranio presentes en el acuífero.

Se determinó el contenido de uranio y radio en muestras de agua subterránea de las principales ciudades del Estado de Chihuahua de acuerdo a su número de habitantes. Se utilizaron los métodos de extracción para uranio y precipitación de sulfatos de Ba-Ra mediante la adición de portadores de bario para el radio. Las medidas de las actividades de uranio y radio se realizaron mediante un detector de Centelleo líquido portátil marca Thiathler-OY HIDEX.

Los resultados obtenidos han demostrado que el contenido de uranio y radio en disolución se encuentran en la mayoría de los pozos muestreados por encima de los niveles máximos permisibles que manejan las regulaciones mexicanas.

Los altos contenidos de uranio y radio puede atribuirse a la influencia del sustrato geológico propio de la zona ya que en el Estado de Chihuahua existen más de 50 yacimientos uraníferos.

1. INTRODUCCION

La concentración de uranio en el agua depende de condiciones tanto fisicoquímicas y geológicas, como de geográficas ambientales[1]. Las altas concentraciones de uranio en agua se encuentran no sólo en aguas cercanas a minas uraníferas, sino también se encuentran en algunas aguas minerales o bien en aguas que son extraídas de pozos profundos [2], como sucede en el estado de Chihuahua.

El uranio naturalmente se encuentra en cuatro estados de valencia: U^{+3} , U^{+4} , U^{+5} y U^{+6} , aunque sólo los estados tetra y hexavalente son los que se encuentran generalmente en el agua. El uranio hexavalente es el más soluble y forma el ion uranil $(UO_2)^{+2}$, el cual juega un papel importante en el transporte del uranio en el medio ambiente y éste ocurre siempre que el potencial electroquímico se encuentre bajo condiciones oxidantes [3]. En cuanto el uranio tetravalente se encuentra bajo condiciones reductoras siendo menos soluble en agua [4]. El uranio al ser ingerido contribuye grandemente a la dosis que recibe el público en general [5].

El radio es un producto de desintegración del uranio, el contenido de radio en el agua es considerado la segunda fuente de radiactividad natural. La distribución de radio en el agua está en función del contenido de uranio y torio presente en el acuífero, las propiedades geoquímicas de los sólidos y la vida media de cada isótopo. El radio presente en el agua subterránea se debe a la disolución de los sólidos del acuífero, producido por el retroceso directo de los núcleos en la frontera líquido-sólido durante su formación por desintegración radiactiva de sus progenitores en el sólido, y por desorción [6].

Actualmente existen diversos métodos para la determinación de uranio y radio de muestras ambientales, siendo el método de centelleo líquido [7] el que ofrece mayores ventajas por encima de técnicas convencionales [8], debido a que la preparación de las muestras resulta fácil y rápida.

El presente estudio comprende el estudio de aguas subterráneas de las principales ciudades del Estado de Chihuahua, de acuerdo al número de habitantes de las mismas, o a la localización.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS Y METODOLOGÍA

Se muestrearon aguas de pozos de las ciudades de Aldama, Nuevo Casas Grandes, Cuauhtémoc, Camargo, Delicias, Chihuahua y Juárez.

Las propiedades principales como pH, temperatura y sólidos totales disueltos (TDS) se determinaron en el lugar mismo de muestreo. Las características como profundidad y transmisibilidad fueron proporcionados por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) y Instituto Nacional de Estadística Geográfica e información (INEGI) respectivamente.

En la tabla I, se muestran las propiedades y características principales de los pozos muestreados.

Tabla I. Propiedades y características de los pozos sometidos a muestreo

| Acuíferos | Profundidad (Min-Máx) | pH | T (°C) | Transmisibilidad ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) | TDS (mg/l) (Min-Máx) |
|-----------------|-----------------------|---------|--------|---|----------------------|
| Aldama | 24-200 | 7.0 | 18-20 | 10.0 | 400-800 |
| Casas Grandes | 200-300 | 6.5-7.0 | 18-20 | 2.3-23 | 250-300 |
| Cuauhtémoc | 80-120 | 6.5-7.0 | 18 | 5.9 | 100-400 |
| Camargo/Jiménez | 10-90 | 6.5-7.2 | 18-20 | 30 | 300-5000 |
| Delicias | 63-90 | 6.5-7.0 | 18-20 | 30 | 300-2000 |
| Chihuahua | 49-165 | 6.5-7.0 | 18-20 | 10.0 | 250-400 |
| Juárez | 171-327 | 6.5-7.2 | 20 | 1.8 | 400-1800 |

En cada punto de muestreo se tomaron 5 litros de agua, se aciduló hasta un pH de 2 con ácido nítrico concentrado y cada muestra se evaporó a diferente volumen dependiendo del contenido de sales presentes [9].

2.1. Medida de Isótopos de Uranio

Se utilizó un método de extracción para determinación de uranio basado en un procedimiento de extracción simple que consistió en combinar un agente extractor Bis(2-etilhexil) ácido fosfórico (HDEHP) con un cóctel de base tolueno o base DIN [5]. Este método se puso a punto para utilizar el detector de centelleo líquido portátil Thiathler-OY HIDEX.

Se tomo una muestra de 100 ml de agua previamente aireada (eliminación de radón). Se aciduló hasta alcanzar un pH de 1.3, se colocó en un embudo de separación, se agregaron 20 ml de líquido centellador Betaplate HiSafe (EG&G Wallac), 1.2 ml de HDEHP, se agitó vigorosamente durante 15 min. y se dejó en reposo hasta la separación de las dos fases. Luego se separo la fase orgánica en un vial de polietileno para centelleo líquido de 20 ml. El número de centelleos se registro posteriormente en el detector portátil Thiathler, con una separación alfa-beta por la forma de los pulsos. La medición se realizó por un período de 60 minutos.

Para el análisis relativo se preparó una muestra de referencia basada en 100 ml de agua tridestilada previamente aireada y acidulada, se añadieron 2 ml de una solución de U-232 con una actividad de $135.369 \pm 1.565 \text{ mBq}$, y 20 ml de Betaphase Hisafe. Posteriormente se colocó en un embudo de separación y se agitó vigorosamente por 15 min.

Al separarse las fases, la fase orgánica se colocó en un vial de polietileno de 20 ml. La eficiencia de detección de las partículas α emitidas por el U-232 en 6 desintegraciones sucesivas en equilibrio con sus hijos hasta el Pb-208 en estas condiciones fue $\epsilon = 0.66$.

La actividad específica del uranio extraído de la muestra de agua se determinó con la siguiente ecuación:

$$A_U \text{ (Bq/l)} = \frac{\text{Cuentas netas muestra estudio (actividad esp. estándar)}}{\text{Cuentas netas estándar U-232}} \quad (1)$$

Donde la actividad específica del estándar es igual a 2.7 Bq/l. En cada sección de medición se hizo el registro del blanco mediante un vial con Betaplate Hisafe puro, que se utilizó para el cálculo relativo y la determinación del error de las mediciones. Los errores relativos de origen estadístico de las actividades obtenidas estuvieron entre el 5 y 10%.

2.2. Medidas de Isótopos de Radio

Para la determinación de la concentración de la actividad de radio mediante la técnica de centelleo líquido es necesario someter a la muestra a un proceso radioquímico de extracción de radio. Para ello se requiere de la preparación de un depósito uniforme y del menor grosor posible, en la que se encuentra el radio aislado de cualquier otro elemento radiactivo [10].

El método radioquímico de radio se basa en la utilización de BaCl_2 como portador [11]. En este método se parte siempre de un mismo volumen de agua al que se añade una cantidad de bario. Dada la similitud química del radio y el bario, ambos tendrán un comportamiento químico similar. Así el bario arrastrará en todo el proceso de extracción a la cantidad de radio que pudiera estar disuelta en la muestra [12].

El método radioquímico se divide en dos partes. La primera consistió en la precipitación de los isótopos de radio presentes en la muestra en forma de sulfatos mediante la adición de portadores de Ba^{+2} . El precipitado se recogió sobre un filtro de membrana Millipore de 47 mm de diámetro y 0.4 μm de tamaño de poro previamente pesado, a través del cual se filtro la muestra [13].

La segunda parte consistió en disolver el precipitado obtenido. Se añadieron 9 ml de NH_4OH 0.1 M y 2 ml de EDTA 0.2 M sobre el filtro, situando el pH entre 8 y 9, se calentó y se agitó suavemente hasta que el precipitado se disolvió completamente. Se evaporó hasta 7 ml. Finalmente se traspaso la disolución a un vial de vidrio de bajo contenido de potasio, de 20 ml de capacidad, se añadió líquido centellante Optiplase Hisafe (EG&G Wallac), suficiente para llenar el vial completamente. La muestra se agitó vigorosamente por un periodo de 3 minutos. El número de centelleos se registro posteriormente en el detector portátil Thiathler, en modo de separación alfa-beta. La medición se realizó por un período de 60 minutos.

Para el análisis cuantitativo se preparó un vial con una solución de 0.25 ml de Ra-226 certificada SRM 4965 del NIST de los Estados Unidos, en Optiplase Hisafe hasta completar 20 ml de solución, con una actividad resultante de 7.864 ($\sigma = 0.5\%$) Bq. Con esta muestra estándar se obtuvo la eficiencia de detección de las partículas α emitidas por el Ra-226 en 4 desintegraciones sucesivas en equilibrio con los hijos hasta el Pb-210, cuyo valor resultó ser $\varepsilon = 0.68$.

La actividad específica del radio extraído de la muestra de agua se determinó con la siguiente ecuación:

$$A_{\text{uradio}}(\text{Bq/l}) = \frac{\text{cps}\alpha}{t V \delta_{226} Rq \varepsilon} \quad (2)$$

Donde cps α es el registro por segundo en la ventana de partículas α del detector, V es el volumen en litros de la muestra de agua, t tiempo de conteo, δ_{226} coeficiente dependiente del tiempo transcurrido desde la preparación de la muestra hasta su conteo, Rq rendimiento químico y ε eficiencia. En cada sesión de medición se hizo el registro del blanco mediante un vial con Optiplase Hisafe puro, que se utilizó para el cálculo de la actividad y la determinación del error de las mediciones. Los errores relativos de origen estadístico de las actividades obtenidas estuvieron entre el 2 y 5%.

Para la puesta a punto de este método de extracción de radio, se llevó a cabo intercomparaciones con métodos como: emanación de radón mediante el sistema E-perm [14], y método radioquímico [11] para el proporcional de flujo LB770 perteneciente al Departamento de Física, Atómica, Molecular y Nuclear (FAMN) de la Universidad de Sevilla, España.

3. RESULTADOS

En la tabla II presentamos las actividades específicas en Bq/l de las actividades de uranio y radio encontradas en las muestras de agua subterránea de las diferentes localidades analizadas en el Estado de Chihuahua. La tabla III muestra los valores máximos y mínimos de cada localidad.

Tabla II. Resultados de las actividades de uranio y radio en Bq/l.

| Pozo | U (Bq/l) | σ (Bq/l) | Ra (Bq/l) | σ (Bq/l) |
|-------------------------------|----------|-----------------|-----------|-----------------|
| Aldama | | | | |
| Manantial San Diego de Alcalá | 0,76 | 0,06 | 5.36 | 0.48 |
| Pozo San Diego de Alcalá | 0,27 | 0,05 | 0.66 | 0.08 |
| Pozo 1 | 1,39 | 0,05 | < DL | |
| Pozo 2 | 0,72 | 0,07 | < DL | |
| Pozo 4 | 0,41 | 0,09 | < DL | |
| Nuevo Casas Grandes | | | | |
| CG-2 | 0,28 | 0,05 | < DL | |

| | | | | |
|----------------------------|------|------|------|------|
| CG-4 | 0,28 | 0,05 | < DL | |
| CG-3 | 0,34 | 0,05 | < DL | |
| CG-1 | 0,19 | 0,06 | < DL | |
| Cuahtémoc | | | | |
| Pozo 14 | < DL | | < DL | |
| Pozo 10 | < DL | | < DL | |
| Pozo 5 | < DL | | < DL | |
| Pozo 7 | < DL | | < DL | |
| Pozo 18 | < DL | | 0,55 | 0,13 |
| Pozo 19 | < DL | | < DL | |
| Pozo 4 | 0,29 | 0,11 | < DL | |
| Pozo 6 | < DL | | < DL | |
| Pozo 22 | < DL | | < DL | |
| Camargo | | | | |
| PV10 | 0,38 | 0,09 | 0,51 | 0,16 |
| Pozo Gato Negro | 0,27 | 0,12 | < DL | |
| Pozo Nuevo | 0,25 | 0,12 | 0,65 | 0,16 |
| Pozo Las Cuatas | 0,45 | 0,08 | 0,51 | 0,16 |
| Delicias | | | | |
| Pozo Obrera | < DL | | < DL | |
| Pozo 169 | < DL | | < DL | |
| Pozo 9 | 0,40 | 0,09 | < DL | |
| Pozo 6 | < DL | | < DL | |
| Pozo 18 | 0,21 | 0,14 | < DL | |
| Pozo L. Urbano | 0,40 | 0,09 | < DL | |
| Pozo C. Serdán | 0,26 | 0,12 | < DL | |
| Pozo 10 | 0,28 | 0,12 | < DL | |
| Pozo 8 | < DL | | < DL | |
| Pozo 7 | 0,25 | 0,14 | < DL | |
| Pozo 15 | 0,60 | 0,07 | < DL | |
| Pozo 5 | 0,23 | 0,14 | < DL | |
| Chihuahua | | | | |
| Pozo 10 Sáuz | 0,67 | 0,07 | < DL | |
| Pozo 7 Sáuz | 0,71 | 0,07 | 0,30 | 0,10 |
| Pozo 2 Sáuz | 0,72 | 0,07 | < DL | |
| Pozo 4 Sacramento | 0,66 | 0,07 | 0,28 | 0,11 |
| Pozo 12 Sáuz | 0,60 | 0,07 | < DL | |
| Pozo 8 Sacramento | 0,76 | 0,06 | < DL | |
| Pozo 6 Sacramento | 1,02 | 0,06 | < DL | |
| Panamericana 3 | 0,57 | 0,07 | 0,87 | 0,17 |
| Mirador | 0,47 | 0,08 | 0,68 | 0,12 |
| Ranchería Juárez | 0,92 | 0,06 | 1,75 | 0,37 |
| Rebombeo Sacramento | 0,46 | 0,08 | < DL | |
| Aeropuerto 2 | 1,26 | 0,05 | 0,56 | 0,16 |
| Panamericana 4 | 1,22 | 0,05 | < DL | |
| Concordia | 0,62 | 0,07 | < DL | |
| Robinson 1 | 0,68 | 0,07 | 1,83 | 0,20 |
| Robinson 2 | 0,53 | 0,08 | < DL | |
| Tabalaopa N. Dios 3 | 0,45 | 0,08 | < DL | |
| Tabalaopa Aldama 1 | 0,49 | 0,08 | < DL | |
| Tabalaopa Aldama 3 | 0,50 | 0,08 | < DL | |
| Tabalaopa Aldama 5 | 0,51 | 0,08 | < DL | |
| Tabalaopa N. Dios 7 | 0,38 | 0,09 | < DL | |
| Tabalaopa N.Dios 2 | 0,59 | 0,07 | < DL | |
| Tabalaopa N.Dios 1 | 0,57 | 0,07 | < DL | |

Actividades de U y Ra en Aguas Subterráneas del Edo. de Chih.

| | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|
| Tabalaopa N.Dios 4 | 0,82 | 0,06 | < DL | |
| Cerro de la Cruz | 0,45 | 0,08 | 0,92 | 0,31 |
| San Felipe | 0,61 | 0,07 | < DL | |
| Ferrocarril | 0,98 | 0,06 | 0,69 | 0,16 |
| Pozo Centro 8 | 0,81 | 0,06 | 0,55 | 0,16 |
| Pozo Villa | 0,90 | 0,06 | < DL | |
| Palacio del Sol | 0,69 | 0,07 | 2,66 | 0,25 |
| Pozo Centro 7 | 0,57 | 0,07 | 0,67 | 0,15 |
| Juárez | | | | |
| Pozo 154 | 0,27 | 0,12 | 0,64 | 0,11 |
| Pozo 17R | 0,23 | 0,14 | < DL | |
| Pozo 15R | < DL | | < DL | |
| Pozo 81 | 0,23 | 0,13 | < DL | |
| Pozo 23 | 0,47 | 0,08 | 0,82 | 0,31 |
| Pozo 176 | < DL | | 0,86 | 0,31 |
| Pozo 42R | 0,34 | 0,10 | 1,62 | 0,34 |
| Pozo 124 | 0,33 | 0,10 | < DL | |
| Pozo 82R | 0,53 | 0,08 | < DL | |
| Pozo 89R | 0,29 | 0,12 | < DL | |
| Pozo 149 | 0,26 | 0,12 | < DL | |
| Pozo 123 | 0,24 | 0,13 | < DL | |
| Pozo 100 | < DL | | < DL | |
| Pozo 88 | 0,32 | 0,11 | < DL | |
| Pozo 5 | 0,40 | 0,09 | < DL | |
| Pozo 1RR | 0,37 | 0,10 | < DL | |
| Pozo 47R | < DL | | < DL | |
| Pozo 122 | < DL | | < DL | |
| Pozo 13RR | 0,39 | 0,09 | < DL | |
| Pozo 115 | 0,21 | 0,14 | < DL | |
| Pozo 169 | < DL | | < DL | |
| Pozo 152 | < DL | | < DL | |

Limite mínimo de detección (DL): Uranio: 0.03 Bq/l, Radio: 0.16 Bq/l

Tabla III. Máximos y mínimos de uranio y radio en las localidades muestreadas.

| Localidad | Uranio (Bq/l) Máximo –Minimo | Radio (Bq/l) Máximo-Minimo |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Aldama | 1.39-0.27 | 5.36-<0.16 |
| Nuevo Casas Grandes | 0.34-0.19 | <0.16 |
| Cuauhtémoc | 0.29-<0.03 | 0.548-<0.16 |
| Camargo | 0.45-0.25 | 0.652-<0.16 |
| Delicias | 0.60-0.21 | <0.16 |
| Chihuahua | 1.26-0.42 | 2.65-<0.16 |
| Juárez | 0.53-0.21 | 1.65-<0.16 |

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En promedio los valores de las actividades de uranio en las muestras de las ciudades de Aldama y Chihuahua son claramente mayores a las encontradas en el resto de las

ciudades. Las actividades de radio en las muestras de las ciudades de Aldama y Chihuahua, como sucede en el caso del uranio, son más altas al resto de las ciudades, encontrándose el mayor contenido de radio en la muestra del manantial de San Diego de Alcalá, con un valor de 5.36 Bq/l. Este resultado puede estar relacionado con la temperatura (40°C) a la que se encuentra la muestra.

Estos altos contenidos de U y Ra se pueden atribuir a la influencia del sustrato geológico propio de la zona. Las ciudades se encuentran localizadas a unos cuantos kilómetros de la cuenca uranífera de Peña Blanca, donde se halla el 60 % de las reservas del país. Presumiblemente el subsuelo de las ciudades contiene uranio y los acuíferos incluyen rocas con altos contenidos de uranio.

5. CONCLUSIONES

El total de pozos muestreados en este trabajo fueron 87. De ellos 36, localizados en Aldama (4), Camargo (3), Delicias (1), Chihuahua (24) y Juárez (4), se encontraron actividades específicas totales de isótopos alfa-activos por encima de los límites máximos permisibles que las regulaciones mexicanas han determinado para consumo humano, de 0.56 Bq/l. [15], por lo cual sería necesario proporcionar al agua de dichos pozos un tratamiento previo al consumo.

REFERENCIAS

1. Per O-K Hakam, S. Douiha, A. Choukri, J-L Reyss. "Measurement of activities and activity ratios of U and Ra radio-isotopes in some natural water samples in the Western Sahara at the Sub of Morocco". *Memorias Conference on Radioactivity in the Environment*. (2002).
2. H.M Fernandes, Mariza Franklin, H. Veiga Lene. "Acid rock drainage and radiological environmental impacts a study case of the uranium mining and milling facilities at Pocos de Caldas". *Waste Management*. **Vol 18**, pp. 169-181. (1998).
3. J.D. Bejarano, A. Martín Sánchez, F. Tomé Vera. "Natural Isotopic Separation of uranium in the Guadiana Basic." *Journal Radioanal. Nucl. Chem.* pp 291-298 (1987).
4. Surinder Singh y Baldey Singh. "Uranium, Radium and Radon measurements in the environs of some areas of Hamirpur District, Himachal Pradesh using solid state nuclear track detectors". *Memorias International Conference on Radioactivity in the Environment*. (2002).
5. V. Gómez Escobar, F. Tome Vera, J.C. Lozano, A. Martín Sánchez. "Extractive procedure for uranium determination in water samples by liquid scintillation counting". *Applied Radiation isotope*. **Vol. 49**. No. 7. pp 875-883 (1998).
6. Joselene Oliveira, Barbara Paci Mazzilli, María Helena Oliveira Sampa, Edmilson Bambalas. "Natural radionuclides in drinking water supplies of Sao Paulo State, Brazil and consequent population doses". *Journal Environmental Radioactivity*. **Vol. 53**. pp. 99-109. (2001).
7. T. Cook Gordon, Charles J. Passo, Brian Carter. *Handbook of Radioactivity Analysis*. pp.332-381 (1998).

8. W.C. Lawrie, J.A Desmond, D. Spence. S. Anderson, C.E. Edmondson. "Determination of radium-226 in environmental and personal monitoring samples". *Applied Radiation and Isotopes*. **Vol. 53** pp. 133-137 (2000).
9. S. Chalubnik. y J. Lebecka. "Determination of Radium isotopes samples by Low background liquid scintillation spectrometer Quantulus". *Advances in Liquid Scintillation Spectrometry . Memorias International conference*. pp 327-335 (1990).
10. R. García-Tenorio, M. García-Leon, G. Madurga y C. Piazza. "Preparación de muestra de actínidos y Ra para espectrometría alfa por el método de electrodeposición". *Anales de Física*. **Vol. 82** , pp 123-127(1986).
- 11.- S. Chalubnik., J. Lebecka, A. Mielnikow, B. Michalik. "Determination of Radium in water: Comparison of methods. *Advances in Liquid Scintillation Spectrometry*". *Memorias International conference*. pp 103 – 109 (1994).
12. A. Martínez-Aguirre. y M. García-León. "Uranium and Radium isotopes in the Guadalquivir river, southern Spain". *Radiation Protection Dosimetry*. **Vol. 45**. No. ¼. pp. 249-252 (1992).
13. L. Villalba, A. Martínez Aguirre, L. Colmenero Sujo, E.M. Montero. "Determinación de uranio y radio en muestras de agua de los alrededores de la ciudad de Chihuahua". *Memoria del Congreso Nacional de la Sociedad Nuclear Mexicana*. (2001).
14. P. Kotrappa. y W.A. Jester. "Electrets ion chamber radon monitors measure dissolves ^{222}Rn in water". *Health Physics*. **Vol. 64**. No. 4. pp. 397-405 (1993).
15. PROY-NOM-127-SSA1-1994, 1999. PROYECTO de Modificación a la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.(1999).