

*Las caras del agua subterránea (Medina y Carrera, eds)*  
© IGME. Temas Aguas Subterráneas. ISBN: 84-7840-428-7

*Congreso en Memoria de Germán Galarza*  
*Barcelona. Septiembre de 2001*

## **BACTERIOLOGÍA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS: METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE MUESTREO EN ÁREAS URBANAS**

**J. González Castelain, F. Peluso y E. Usunoff**

Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), C.C.44 (7300) Azul, Argentina

### **RESUMEN**

El propósito de esta comunicación es presentar un método objetivo para la planificación del muestreo bacteriológico del agua subterránea en sectores urbanos, relacionando la intensidad de muestreo con una estimación expeditiva del riesgo sanitario por consumo humano de agua de baja calidad.

**Palabras clave:** Bacteriología, Muestreo, Riesgo, Calidad, Contaminación.

### **INTRODUCCIÓN**

La evaluación bacteriológica de las aguas subterráneas en áreas urbanas es de suma importancia para diagnosticar el estado sanitario del recurso. Esto permite planificar y emprender acciones para reducir el riesgo de consumo de agua de baja calidad, en particular donde la provisión de servicios de agua de red y de cloacas es reducida.

En esos sectores, el agua subterránea que se extrae para el consumo familiar y de animales domésticos puede encontrarse contaminada por los lixiviados de los pozos negros (pozos absorbentes) debido a diferentes causas (deficiencias en la construcción de los pozos absorbentes, ubicación inadecuada de los pozos de extracción con respecto a los pozos absorbentes, deficiencias en la construcción de los pozos de extracción, etc.). Esas causas y las características del contaminante microbiológico implican que no exista una relación entre la calidad del agua que se extrae de dos pozos diferentes, aún si ellos se encuentran cercanos, dado que:

- a. La dispersión o migración de los microorganismos en el agua subterránea es muy limitada, haciendo que los efectos de cada pozo absorbente sean de incidencia muy localizada, casi puntual.
- b. La distribución de los pozos de extracción contaminados es azarosa, aún dentro de un área reducida (ejemplo: una manzana). Las condiciones de construcción y ubicación relativa de

los pozos absorbentes y de extracción son particulares para cada lote, dependiendo básicamente de la orientación del lote en la manzana, de la distribución de las construcciones en cada lote y del sentido de flujo del agua subterránea en el lugar.

Ambas condiciones implican que pequeñas áreas conexas no compartan necesariamente la misma condición de calidad del recurso. En los sectores urbanos no consolidados (periurbano, subrural) coinciden la falta de servicios (y consecuentemente la mayor densidad de pozos negros y de extracción no centralizada) y la heterogeneidad en la ocupación del territorio, por lo que dos manzanas conexas pueden resultar con diferentes intensidades de uso de las aguas subterráneas, y su eventual estado de contaminación. Por lo tanto, la representatividad areal de los resultados obtenidos a partir de muestras de agua de un pozo de extracción es muy reducida.

Esto último implica la necesidad de una alta densidad de muestreo, a fin de robustecer la validez del diagnóstico del estado del recurso. Sin embargo, se plantea un compromiso entre el esfuerzo de muestreo y el uso eficiente de los recursos económicos y humanos, y con las disponibilidades de procesamiento del laboratorio. Bajo este escenario, debe realizarse un diagrama de muestreo cuyos resultados sirvan para diagnosticar eficientemente el estado del recurso, es decir que sean representativos.

El diagnóstico de la calidad bacteriológica de las aguas subterráneas está íntimamente relacionado con la evaluación del riesgo sanitario que ese recurso puede provocar por el consumo humano. Entonces, no debiera resultar extraño relacionar el diagrama de muestreo y el esfuerzo del mismo, en forma directamente proporcional con una estimación del riesgo sanitario que se desea medir. Sería recomendable poner un mayor esfuerzo de muestreo donde, a priori, se estime que la calidad del recurso está más comprometida, y donde la componente poblacional del riesgo sanitario sea de mayor magnitud.

Los sectores poblacionales que se encuentran en situación de mayor riesgo son generalmente (aunque no necesariamente) de bajos recursos. Según el CEPIS (1999), el 70% de los pobres no tienen agua tratada, y el 80% no poseen redes de alcantarillado. Por ende, también están involucrados otros factores de incidencia directa o indirecta relacionados con la situación socio-familiar, como el nivel sanitario general de la población afectada, el nivel educativo, el económico, la infraestructura habitacional, etc.. Estos factores modelan el escenario del riesgo aportando al mismo con una mayor probabilidad de contacto de la población con la fuente contaminada.

## **METODOLOGÍA**

### **Estimación del riesgo sanitario por consumo humano de aguas subterráneas**

Riesgo es la probabilidad que un efecto peligroso ocurra, o la relación entre la magnitud de un efecto y su probabilidad de ocurrencia. El análisis de riesgo surge de la existencia de una fuente potencial de peligro y de algún grado de incertidumbre acerca de sus efectos (Suter II, 1990).

Según un esquema básico (y más simple), un análisis de riesgo consiste en evaluar tres factores involucrados: (1) la fuente del riesgo, como un indicador de la calidad o la peligrosidad potencial de la misma; (2) los blancos susceptibles, estimados como la cantidad de población potencialmente afectable (daño humano); y (3) la exposición a la fuente, es decir, los aspectos del sistema natural y social y los mecanismos que éste genera, que actúan como reguladores de la posibilidad de que se afecte a los blancos potenciales, reduciendo o aumentando el riesgo de contacto entre la fuente y los blancos. El nivel de riesgo se calcula como el producto entre esos tres factores.

La evaluación areal de la calidad bacteriológica del agua subterránea interesa para definir la peligrosidad de ese agua como fuente de riesgo sanitario para la población, al ser extraída para consumo domiciliario. La identificación de la peligrosidad de la fuente debiera recibir un mayor esfuerzo en aquellos sectores del ejido urbano que presentan una mayor exposición a la fuente y una mayor cantidad de población expuesta (blancos), y donde se estime a priori las condiciones que favorecerían una mayor peligrosidad de la fuente. Como los factores de riesgo varían en los distintos sectores del ejido urbano, la densidad del muestreo debieran tener una variación espacial directamente proporcional al riesgo sanitario estimado. Para ello se propone hacer un análisis expeditivo del riesgo sanitario por consumo de agua subterránea de baja calidad bacteriológica, previamente al muestreo bacteriológico.

A menos que el muestreo bacteriológico forme parte de un estudio socio-económico del núcleo urbano, generar ex profeso la información necesaria implicaría la utilización de recursos humanos y económicos con los que no siempre se cuentan, o se desean minimizar. Por lo tanto, es favorable utilizar información previa, cuando se disponga de ella.

En Argentina, el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) realiza cada diez años un Censo Nacional de Población y Vivienda, y lo edita en formato digital (INDEC, 1998) a un costo accesible y, dado que puede ser utilizado para otras aplicaciones en la gestión pública, eventualmente puede adquirirse conjuntamente con otras oficinas públicas o por las autoridades municipales sin resultar una inversión importante.

La información que ofrece el banco de datos del INDEC está organizada por "radios censales", que consisten en áreas de la ciudad definidas por el mismo INDEC para el relevamiento del censo, pero que no obedecen a principios estadísticos o de las variables que mide. Dado la utilización de este banco de datos, la metodología para la evaluación areal de la calidad bacteriológica del agua subterránea que se presenta se ajusta a estos radios censales y utiliza las variables que el INDEC proporciona.

### **Estimación de la peligrosidad de la fuente**

La calidad bacteriológica del agua subterránea estaría comprometida en forma directa con la cantidad (densidad areal) de pozos absorbentes. Dado que la densidad areal de pozos absorbentes puede tomar valores muy elevados, y estos pueden resultar imprácticos para el manejo de la información, se la redujo a un rango de entre cero y uno, mediante una proporción

al valor más alto de densidad calculado para el área de estudio. Este cambio de rango permite que los valores resulten de una magnitud compatible con la de las otras variables que se van a utilizar para estimar el riesgo sanitario, es decir, con una variación entre 0 (en el caso hipotético de que toda la población del radio censal posea servicio de cloacas) y 1 (correspondiente al radio censal en que se presente la mayor densidad areal de pozos de extracción domiciliarios).

El cálculo de la densidad de pozos absorbentes como un valor relativo no afecta el objetivo primario de obtener una comparación del riesgo de consumo de agua de baja calidad bacteriológica entre distintos sectores del ejido urbano, sin pretender llegar a valores absolutos de ese riesgo.

### **Estimación del nivel de exposición**

La exposición (E) de la población al contacto con la fuente de riesgo estaría directamente relacionada con la probabilidad de consumo de agua subterránea, es decir, con la proporción de viviendas que poseen pozos de extracción (pPE). Esta variable actuaría como un regulador clave entre la fuente del riesgo y la exposición de la población blanco a esa fuente, ya que indica la cantidad máxima de población que podría consumir agua potencialmente no apta para ese uso, debido a la infraestructura de servicios existente. A este valor se le adicionan otros indicadores de índole socio-económica o de comportamiento, siempre agravadores de la exposición, como ser la proporción de viviendas con hacinamiento crítico (pHC), o la proporción de viviendas cuyo jefe de familia posee un nivel de instrucción bajo (pNI).

La exposición se calculó como 
$$E = pPE * [1 + (pHC + pNI)]$$

El INDEC (1998) define la condición de hacinamiento crítico cuando en la vivienda habitan tres o más personas (de cualquier sexo y edad) por cada cuarto en capacidad de ser utilizado como dormitorio. El hacinamiento crítico puede considerarse estimador de una alta intensidad de uso del recurso subterráneo en la vivienda, debido a un mayor caudal de extracción y una mayor carga contaminante eventualmente vertida en un pozo absorbente. También podría indicar una mayor probabilidad de contacto con la fuente, aumentando el riesgo por exposición. En este sentido, el hacinamiento crítico presupone falencias en las condiciones higiénicas de la población (componente comportamental) y de la infraestructura sanitaria de la vivienda, dada la alta densidad de habitantes en un espacio reducido. Posiblemente, la población de la vivienda se encuentre afectada por otras limitaciones socioeconómicas (económicas, sanitarias generales, alimentarias, etc.).

El nivel de instrucción de la población puede actuar como un estimador del grado de conciencia de los problemas emergentes del uso de agua de baja calidad bacteriológica, y de los recaudos que deben tomarse para minimizar los riesgos por su uso. Es también un regulador comportamental de la exposición a la fuente. Se consideró un nivel de instrucción bajo cuando el jefe de familia posee un nivel inferior al ciclo secundario completo.

### Estimación de la población blanco

Si bien toda la población está sometida a cierta probabilidad de consumir agua de baja calidad bacteriológica, la población infantil y de ancianos presenta una mayor posibilidad de afectación ante la misma situación de riesgo. Estos grupos etáreos presentan una mayor probabilidad de contacto con la fuente o una mayor vulnerabilidad a las enfermedades de origen hídrico, por lo que se ponderó la densidad de población por las proporciones de población de lactantes (pPL) menores de 2 años (ponderado en forma doble que los otros dos grupos), la infantil (pPI) de entre dos y hasta cinco años de edad, y la de ancianos (pPA) mayores de 65 años.

La población blanco (B) se calculó como  $B = \delta P * [1 + (2 * pPL + pPI + pPA)]$  donde  $\delta P$  es la densidad de población.

### DENSIDAD DE MUESTREO

El riesgo sanitario calculado es independiente de la superficie del radio censal, es decir, resulta una densidad areal dado que la exposición a la fuente y los blancos potenciales son relativos a la cantidad de viviendas (y en forma transitiva a la población del radio censal) y la estimación de la peligrosidad de la fuente es una expresión relativa a la totalidad del área de estudio (el ejido urbano). Ya que los radios censales no poseen la misma área, se ponderó el riesgo sanitario calculado por el área del radio censal obteniendo un “riesgo sanitario areal” para cada radio censal.

Según el objetivo planteado, la distribución de las muestras a tomar en cada radio censal debe ser directamente proporcional al riesgo sanitario areal calculado para ese radio censal, a fin de satisfacer el objetivo de invertir mayor esfuerzo de muestreo en los sectores donde el riesgo sanitario por consumo de agua subterránea de baja calidad bacteriológica sea mayor. Esa proporción puede expresarse como:

$$\frac{RSA_i}{\sum RSA_i} = \frac{n_i}{N} \quad \text{ó} \quad n_i = \frac{RSA_i * N}{\sum RSA_i}$$

donde  $RSA_i$  es el riesgo sanitario areal calculado para cada radio censal  $i$ ,  $n_i$  es el número de muestras a extraer en cada radio censal y  $N$  es el número total de muestras que se extraerán en el área de estudio.

### DISTRIBUCIÓN DE LAS MUESTRAS DENTRO DEL RADIO CENSAL

Dado que el radio censal se considera homogéneo con respecto a las variables utilizadas para la estimación del riesgo sanitario, la distribución de las muestras que corresponden a cada radio censal se debería realizar también en forma aproximadamente homogénea, es decir, uniformemente.

El método de elección de la vivienda donde se va a tomar la muestra dentro de cada manzana debe estar prefijado antes de llegar al lugar del muestreo, a fin de no introducir involuntariamente ningún tipo de sesgo por parte del operador. Si la decisión se toma en el lugar, es posible que pueda haber alguna tendencia en “elegir”, en forma voluntaria o no, cierto tipo de vivienda, lo que podría afectar la objetividad del muestreo. Por lo tanto, antes de iniciar el muestreo se debe definir un mecanismo para designar la vivienda de la que se extraerá la muestra dentro de cada manzana, como ser una posición determinada del lote a muestrear en la manzana (ejemplo: tercer lote comenzando desde la esquina noreste, contando en sentido horario). Ante la imposibilidad de tomar esa muestra, por no haber vivienda, por no poseer pozo de extracción o por no tener autorización de los propietarios, entonces se tomaría de la vivienda más cercana que lo permita, siguiendo un sentido prefijado (horario o antihorario).

## **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

El trabajo describe una metodología objetiva para asignar distintas intensidades de muestreo de agua subterránea en un área urbana, según una estimación a priori del riesgo sanitario por consumo de agua subterránea de baja calidad bacteriológica. Permite aumentar la exactitud del diagnóstico areal del estado del recurso, optimizando el esfuerzo de muestreo y salvando las dificultades que presenta la variable por su baja representatividad areal debido a los efectos puntuales y la distribución aleatoria de los pozos absorbentes en los sectores periurbanos, que actúan como fuente principal de alteración de la calidad del agua subterránea. La metodología para el diseño del muestreo es simple y rápida, siempre y cuando se cuente previamente con información socio-poblacional del lugar, o bien se releve esa información cuando el muestreo del agua subterránea esté inserto en un proyecto de estudio más amplio de corte social.

En el caso de la Argentina, el banco de datos del Censo Nacional de Población y Vivienda (INDEC, 1998) permite contar con información que puede ser utilizada para este fin, a un costo accesible. Sin embargo, el uso de este banco de datos implica algunas limitaciones o desventajas:

1. La información no está actualizada. Dado que el Censo se realiza cada diez años, la información pierde vigencia a lo largo del período que transcurre entre dos censo. De las variables de importancia para el caso, algunas pueden tener una marcada desactualización en el tiempo transcurrido, no correlacionable entre ambos momentos, como ser la cantidad de población total (si existen fenómenos migratorios marcados), la cantidad de población infantil (lactantes y menores de 5 años) o la extensión de la red de servicios sanitarios. Debería evaluarse la aplicabilidad en cada caso particular.
2. información que ofrece el banco de datos del INDEC está organizada por “radios censales”, que consisten en áreas de la ciudad definidas por el mismo INDEC para el relevamiento del censo, pero que no obedecen a principios estadísticos o de homogeneidad de las variables que mide. Por lo tanto, son heterogéneas en cuanto a superficie y población, e incluso en las características socio-económicas que podrían definir sectores urbanos con riesgos sanitarios diferentes.
3. El uso del banco de datos del Censo del INDEC obliga a ajustar el diseño del muestreo y la

expresión de los resultados a los límites impuestos por los radios censales. Pese a estas desventajas, la información del INDEC permite llegar al objetivo planteado.

Estas desventajas podrían salvarse (siempre que sea relevante, o bien que resulte como proyecto accesorio) mediante un muestreo de las condiciones sociales de la población. Este muestreo de las variables socio-habitacionales y de población permitiría no sólo actualizar los datos preexistentes, sino también redefinir los límites de las áreas a analizar (radios) según criterios de homogeneidad interna, lo que posibilitaría disminuir la superficie de cada área (radio) y, eventualmente, aumentar la cantidad de ellas, redundando en una mayor exactitud en los resultados.

La metodología para la estimación del riesgo que aquí se presenta, se ha desarrollado utilizando exclusivamente las variables sociales que figuran en el banco de datos del Censo 1991 del INDEC (1998) y que resultan relevantes para el propósito del muestreo. La realización de un relevamiento socio-económico ad-hoc permitiría introducir otras variables no consideradas aquí y que pueden resultar relevantes para estimar el riesgo sanitario.

La metodología propuesta resulta adaptable a distintas condiciones locales y a la información disponible, y es permeable al enriquecimiento con otro tipo de información no incluida en este trabajo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- CEPIS, 1999. Calidad del agua. Se consulta en <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/calagua/elagua.html>.
- INDEC. 1998. Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda 1991 por Frecuencias y Radios Censales para la ciudad de Salliqueló. Información en soporte informático. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- OPS. 1988. Guías para la calidad del agua potable. Volumen 3, Control de la calidad el agua potable en sistemas de abastecimiento para pequeñas comunidades. Publicación Científica no. 508. 132 págs..
- Suter II G., 1990. Uncertainty in environmental risk assessment. In Von Furstenberg Ed. Acting Under Uncertainty: Multidisciplinary Conceptions. Kluwer Academic Publishers.