

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS DE CALIDAD DE AGUA DE LOS POZOS EN LA REGIÓN Y EN LAS PRINCIPALES CIUDADES DEL ACUÍFERO DE IRAPUATO-VALLE, GUANAJUATO, MÉXICO.

José de Jesús Mora Rodríguez¹; Carlos Gutiérrez Ojeda²; Luis González Hita²

Resumen – En base a la necesidad de conocer si un evento extraordinario de lluvias en el acuífero de Irapuato Valle afectó la calidad del agua subterránea extraída, se realizó un análisis estadístico a través de pruebas no paramétricas de datos ordenados por rango y de nivel nominal de los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos que determinan la calidad del agua. Se realizaron comparaciones de los monitoreos de tipo regional, además de monitoreos de los sistemas de abastecimiento de agua potable de las ciudades de Irapuato y Salamanca, Guanajuato (Gto). Con los resultados del análisis temporal, se infirió que, de manera regional se presentó una disminución en la concentración de los parámetros fisicoquímicos en el monitoreo de 2003, dicho efecto se verificó de manera local. Por otro lado, al comparar en base a la profundidad total de los aprovechamientos se observaron variaciones en la comparación de los aprovechamientos someros para 1979 y 2003, pudiéndose distinguir la captación del flujo local, el cual ya no se captaba en años recientes debido a la sobreexplotación y al descenso de los niveles del agua subterránea.

Abstract – On the basis of need to know if an extraordinary event of rains in Irapuato Valle's aquifer affected the quality of groundwater extracted, a statistical analysis was realized across nonparametric tests of datum arranged by range and nominal level of physical, chemical and bacteriological parameters that determine the quality of water. There were realized comparisons of regional type monitorings, besides of drinking-water supply systems monitorings of Irapuato and Salamanca, Gto. cities. With results of temporary analysis, there was inferred that, in a regional way one presented a decrease in the concentration of phisics and chemistry parameters in 2003 monitoring, thit effect was verified in a local way. On the other hand, on having compared on the basis of the total depth of wells variations were observed in the comparison of shallow wells for 1979 and 2003, there being able to be distinguished the captation of local flow, which already was not caught in recent years due to the overexploitation and decrease of levels of groundwater.

Palabras clave: métodos no paramétricos, monitoreo de la calidad del agua.

Keywords: non parametric tests, water quality monitoring.

¹ Universidad Politécnica de Valencia – Estudiante de doctorado – Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente — Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos – Camino de Vera S/N – CP E46022 – Valencia (España) – Tel: (+34) 96 3879890 – Fax: (+34) 96 3877981 – E-mail: – josmorod@doctor.upv.es

² Instituto Mexicano de Tecnología del Agua – Subcoordinación de Hidrología Subterránea – Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Mor., CP 62550, México. Tel: +52(777)329-3600, Tel y Fax: +52(777)329-3682, Email: cgutierr@tlaloc.imta.mx, lghita@tlaloc.imta.mx

INTRODUCCIÓN

La principal fuente de abastecimiento de agua para uso agrícola, industrial y urbano en la región de Irapuato Valle es subterránea, debido a la gran demanda se ha generando sobreexplotación en el acuífero y afectación en la calidad del agua. Por lo anterior, en 2003 se realizó un proyecto de contaminación difusa en el acuífero de Irapuato Valle con el objetivo de conocer las condiciones actuales de la calidad del agua. Durante el inicio del proyecto se presentaron lluvias extraordinarias e inundaciones importantes en la zona de estudio por lo que surgió la necesidad de conocer que tipo de efecto se presentó en la concentración de los parámetros medidos de los aprovechamientos durante el monitoreo. Se realizó el presente trabajo para obtener un marco de referencia de la calidad del agua subterránea, determinar su evolución en el tiempo y el espacio en base a la información de datos históricos para relacionar la calidad del agua con un evento extraordinario. Se analizaron los datos de calidad de agua a través de pruebas estadísticas como una opción práctica para obtener una comparación con un grado de certidumbre. Para obtener las respectivas evoluciones se realizaron comparaciones en base a pruebas no paramétricas que determinan si es posible considerar que dos muestras provienen de la misma población. Primeramente se realizó un análisis temporal, con el cual se infirió que probablemente la disminución en las concentraciones de los parámetros medidos en 2003 de manera regional pudo deberse a las inundaciones presentadas antes de ese monitoreo. Después se realizaron análisis considerando la profundidad total de los aprovechamientos con los cuales se verificó dicha inferencia.

DEFINICIONES

Estadística inferencial: también llamada estadística inductiva, se basa en el cálculo de probabilidades y a partir de datos muestrales, efectúa estimaciones, decisiones, predicciones u otras generalizaciones sobre un conjunto mayor de datos (Mason y Lind, 1995); las inferencias se expresan de dos maneras, como estimaciones de los parámetros respectivos o como pruebas de hipótesis referentes a sus valores. Con respecto a las estimaciones de los parámetros, las inferencias se presentan en forma de estimaciones puntuales o por intervalo. En el caso de las pruebas el procedimiento es similar al método científico, el cual observa la naturaleza, establece una teoría y después prueba su teoría respecto de la observación. Las pruebas de hipótesis se realizan en todos los ámbitos en los cuales puede contrastarse la teoría frente a la observación (Mendenhall et al, 1994). Esta parte de la estadística se basa en métodos paramétricos y no paramétricos; los paramétricos usualmente tienen que ajustarse a condiciones como tener una distribución conocida, con medidas tomadas en la escala de intervalo o razón. En caso de no tenerse uno o más de estos requisitos o supuestos, pueden usarse los no paramétricos, conocidos también como de libre distribución.

Prueba de U de Mann Whitney: Se utiliza cuando se seleccionan dos conjuntos aleatorios independientes de observaciones muestrales, de por lo menos de nivel ordinal. La prueba tiene por objetivo determinar si las dos muestras independientes, provienen de la misma población, la cual es el conjunto de todas las posibles mediciones de interés (Mason y Lind, 1995).

Prueba de la tabla de contingencia: Método de intercomparación mediante el análisis de datos de nivel nominal (Johnson, 1997), en la cual, las muestras de las poblaciones se clasifican en unidades con respecto a dos categorías, usualmente cualitativas. El análisis de la

tabla de contingencia se basa en la frecuencia más que en la concentración de los parámetros de la calidad del agua.

Prueba de la probabilidad exacta de Fisher: Permite analizar si dos variables dicotómicas están asociadas cuando la muestra a estudiar es demasiado pequeña y no se cumplen las condiciones necesarias para calcular el valor X^2 de manera adecuada en la prueba de la tabla de contingencia (Pértega Díaz, 2004).

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

La región del acuífero de Irapuato Valle, se localiza en la porción centro sur del estado de Guanajuato en México, cuenta con un área de 2.511 km², los principales municipios son Valle de Santiago, Salamanca, Irapuato, Jaral del Progreso, Cortázar y Pueblo Nuevo (figura 1). Considerando a Irapuato y Salamanca las principales ciudades. La actividad económica la encabeza el Distrito de Riego 011 en la agricultura; y en la industria, la refinera Antonio M. Amor de PEMEX y la central termoeléctrica de la CFE en Salamanca.

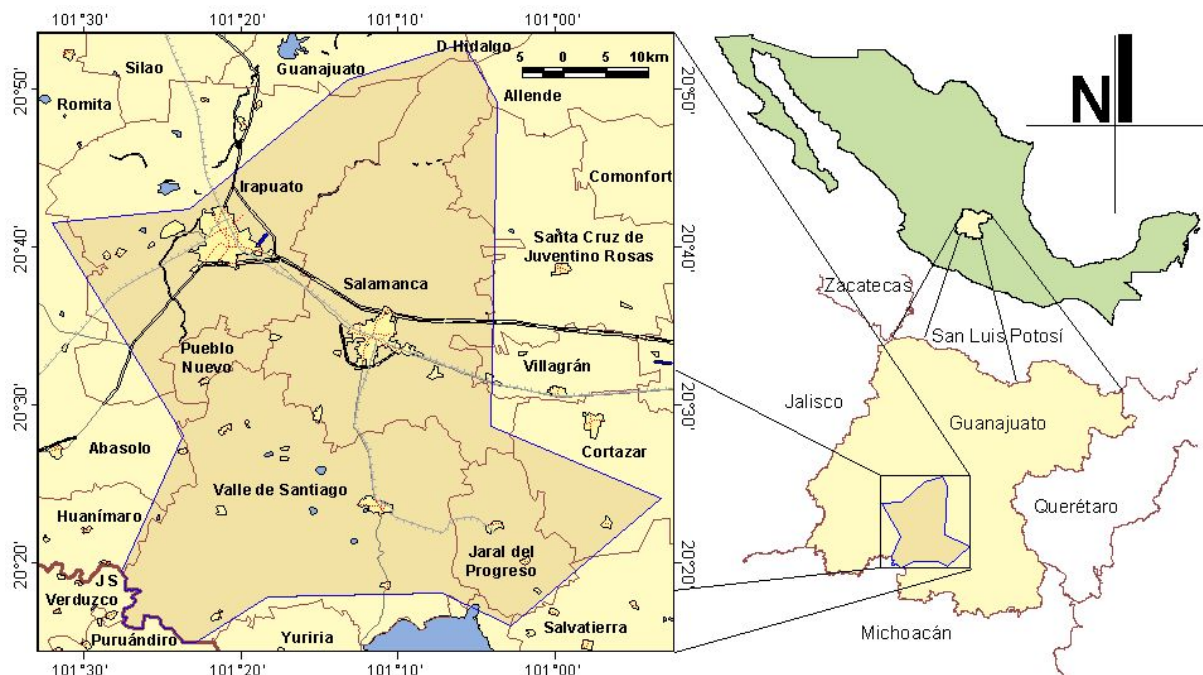


Figura 1. Localización de la zona de estudio

El agua subterránea en la zona de Irapuato Valle representa la principal fuente de abastecimiento de agua. La disponibilidad de éste recurso en la región se ha visto reducida en las últimas décadas debido a la fuerte demanda para actividades antropogénicas que se desarrollan (IMTA, 2003). Los problemas sobre el recurso subterráneo son de cantidad y calidad, por lo que la Comisión Nacional del Agua (CNA) solicitó al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua el Estudio de Contaminación Difusa en el Agua Subterránea en el Acuífero Irapuato-Valle, Gto. con el fin de conocer las condiciones en que se encontraba la calidad del agua subterránea.

Para septiembre de 2003 se presentaron lluvias extraordinarias que registraron hasta 98 mm/día (precipitaciones muy superiores a la media observada en el registro 1959-2002) provocando inundaciones y declarándose zona de desastre a 7 de los 10 municipios que se encuentran en la zona de estudio (DOF, 2003). Con ello la CNA se interesó en conocer, si el evento extraordinario había afectado la calidad del agua subterránea.

La aplicación de los métodos no paramétricos se realizó en base a la necesidad de obtener una evolución temporal y a profundidad para determinar como ha sido la variación de la calidad del agua subterránea en el último muestreo, con ello, verificar si los parámetros que determinan la calidad del agua subterránea han disminuido o aumentado en base a las lluvias extraordinarias presentadas en septiembre de 2003.

Se han realizado monitoreos en el acuífero, principalmente de dos tipos. De manera regional en 1979 (SARH), 1998 (CEASG) y 2003 (CNA). Mientras que, localmente, se han realizado monitoreos en las ciudades de Irapuato y Salamanca (por la Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Irapuato, el Comité Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Salamanca y la Comisión Estatal de Aguas de Guanajuato), con fechas de 1997, 2001 y 2003 (figura 2).

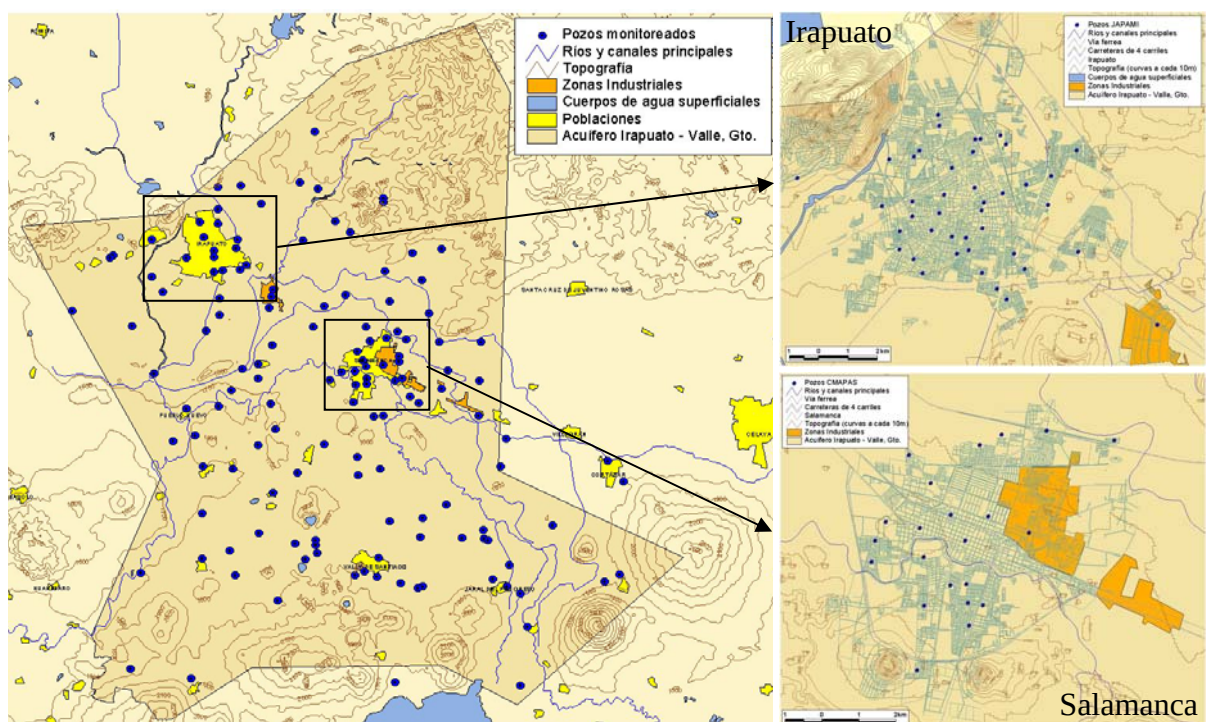


Figura 2. Sitios de monitoreo regional en 2003 y locales en Irapuato y Salamanca, Gto.

APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS NO PARÁMETRICOS DE NIVEL NOMINAL Y ORDENADOS POR RANGO PARA DATOS DE CALIDAD DEL AGUA

Las pruebas estadísticas no paramétricas se utilizaron debido a que en el 27 % de los análisis se utilizaron datos de nivel nominal. Se consideraron tres tipos de análisis estadístico, el uso de una u otra prueba depende de la cantidad de información generada en cada uno de los parámetros medidos. La decisión de considerar uno u otro método se discute en el reporte realizado por Helsel y Ragone en 1984 (citado en German, 1996). La prueba no paramétrica que determina si es posible considerar que dos muestras provienen de la misma población es la prueba de U de Mann Whitney.

Las técnicas empleadas para la obtención de los valores de los parámetros en distintas fechas y con distintos laboratorios permiten realizar las pruebas de análisis ordenados por rango como es la prueba de U de Mann Whitney debido a que estas pruebas se basan en las concentraciones de los parámetros. Los parámetros en los que se aplica ésta prueba son principalmente fisicoquímicos medidos en campo e iones mayoritarios, los cuales generalmente presentan concentraciones por encima del límite de detección. En las pruebas de datos de nivel nominal, como es la prueba de la tabla de contingencia y la probabilidad exacta de Fisher, los límites de detección son determinantes. Los parámetros en los que se aplican estas pruebas son químicos, metales pesados y/o elementos traza y bacteriológicos. En estos parámetros generalmente se presentan concentraciones bajo el límite de detección por lo que al comparar dos monitoreos en fechas y laboratorios distintos se consideró el límite de detección más alto.

El procedimiento utilizado es el siguiente:

Se realiza el planteamiento de la hipótesis nula y alternativa, para este caso, la hipótesis nula es: la concentración del parámetro en cuestión que determina la calidad del agua no ha variado; y la hipótesis alternativa es: que ha existido una variación, la cual puede ser un aumento o disminución del parámetro.

Se selecciona un nivel de significancia, el cual es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando en realidad es verdadera, generalmente es de 0,05.

El cálculo del estadístico de prueba, se realiza a partir de los datos de las muestras.

La determinación del valor crítico se realiza a partir de la cantidad de datos que se tengan en ambas muestras a analizar, además se considera el nivel de significancia. Los valores críticos son los puntos divisorios entre la región de aceptación y la región de rechazo.

La regla de decisión se toma a partir del estadístico de prueba y del valor crítico, al compararlos, se decide si se acepta o se rechaza la hipótesis nula, con lo cual se concluye.

Primeramente se realiza la prueba de U de Mann Whitney, con la restricción de que al menos el 80% de los datos se encuentran por encima del límite de detección. Si lo anterior no se cumple, entonces se analiza mediante la tabla de contingencia, utilizando la misma metodología, no obstante, en lugar de obtener un estadístico de prueba, se cuantifican las frecuencias observadas y se calcula X^2 . Ésta prueba presenta también una restricción, las frecuencias esperadas para el cálculo de X^2 deben ser mayores de 5. Si lo anterior no es posible, se recurre a la probabilidad exacta de Fisher, en la cual se calcula la probabilidad para las frecuencias observadas y se obtienen las probabilidades de las frecuencias.

El procedimiento antes mencionado se realizó para cada parámetro que pudo ser comparado en la escala del tiempo; de manera regional se compararon 15, en Irapuato 20 y en Salamanca 18 parámetros. En cuanto a la profundidad total de los aprovechamientos, se clasificaron 3 distintos rangos de profundidad (de 0 a 250 m, figura 3) en base a la variación de la concentración del nitrato (IMTA, 2003). Para el monitoreo regional realizado en 2003 se obtuvieron 5 rangos, debido a que, en una segunda campaña de monitoreo se presentaron profundidades hasta de 700 m en los aprovechamientos.

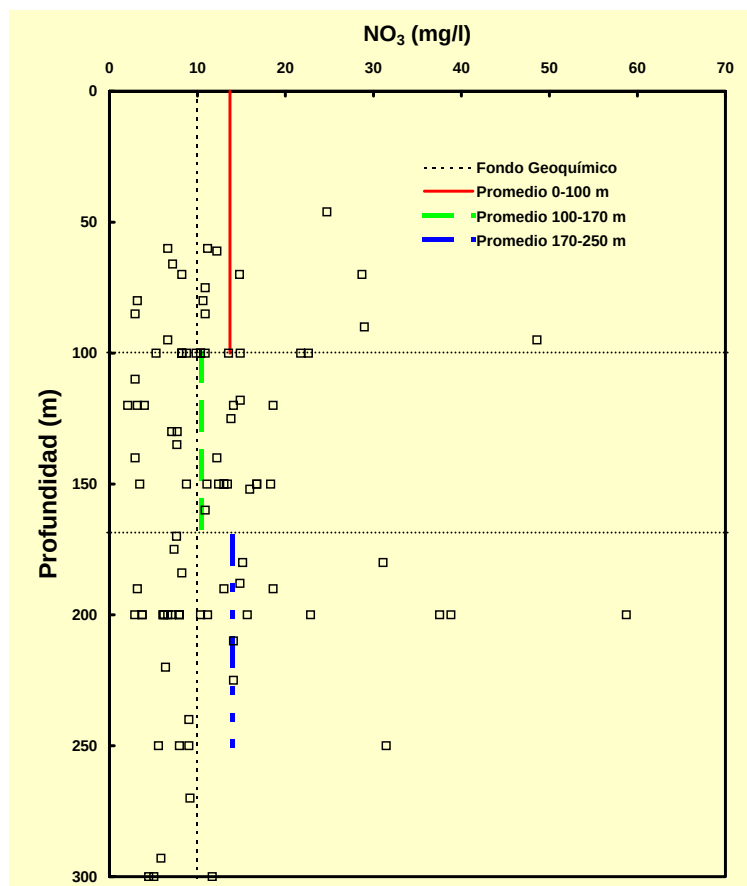


Figura 3. Variación de la concentración del nitrato en el monitoreo de 2003

RESULTADOS

De 1979 a 1998, siete de los once parámetros comparados aumentaron en sus concentraciones, tres parámetros se presentaron sin variación y solo un parámetro presentó aumento. Al comparar de 1998 a 2003, las concentraciones de ocho parámetros disminuyeron y seis se presentaron sin variación (tabla 1), la mayoría de las comparaciones presentaron la evolución, como la que se observa en la figura 4.

Tabla 1. Resultado de la comparación temporal regional

Parámetro	1979 / 1998	1998 / 2003
Conductividad eléctrica		
pH	o	
Temperatura	>	
Alcalinidad	o	<
Sólidos totales disueltos	>	
Calcio	>	
Magnesio	>	<
Sodio		
Potasio	>	<
Bicarbonato	>	<
Carbonato	<	o
Sulfatos		<
Cloruro	>	<
Dureza total	o	<
Hierro	o	<

Nota:

	No hay variación significativa entre las fechas
>	El parámetro aumenta en el tiempo
<	El parámetro disminuye en el tiempo
o	No se realizó prueba por falta de información

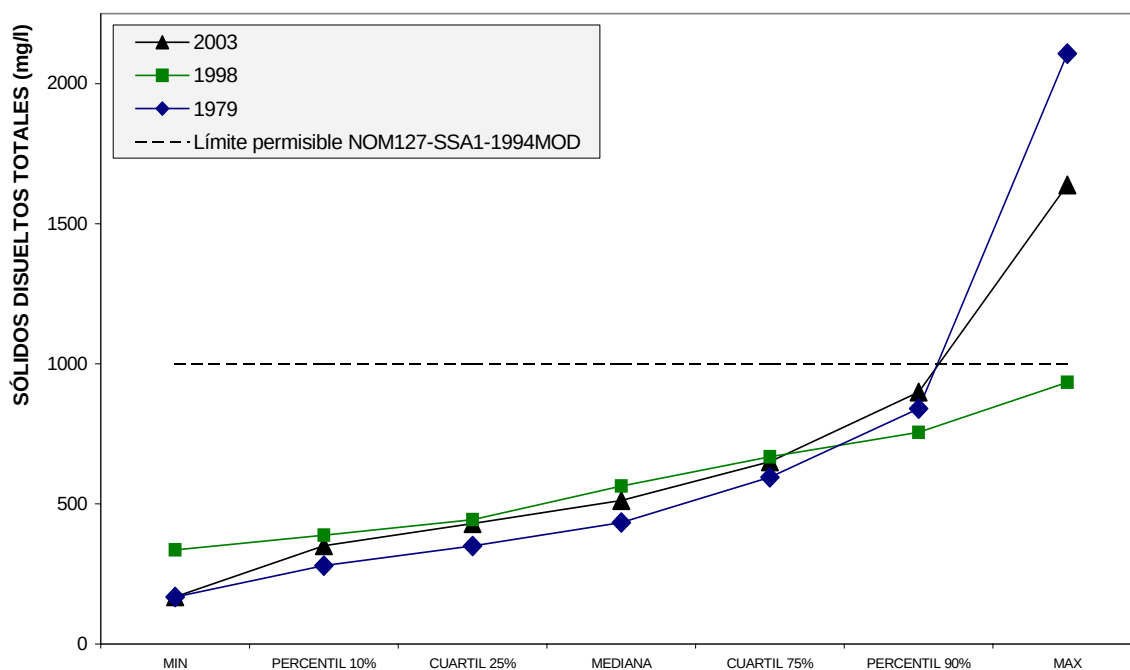


Figura 4. Variación temporal de la concentración de sólidos totales disueltos

Al realizar el análisis de manera local, en los resultados de la comparación en Salamanca, se observó que de 1997 a 2001 aumentaron seis parámetros, se mantuvieron tres, y disminuyó un parámetro. Pero de 2001 a 2003, solo aumentó un parámetro, se mantuvieron

cinco sin variación y disminuyeron otros cinco parámetros. Al comparar entre las fechas de estiaje y lluvia de 2003, once parámetros se mantuvieron sin variación, tres disminuyeron sus concentraciones y en dos parámetros aumentaron (tabla 2). Como en el caso del nitrógeno en nitrato, las concentraciones máximas del parámetro se presentan en 2001 (figura 5).

Tabla 2. Resultado de la comparación temporal local en Salamanca

Parámetro	Ago 97 / May 01	May 01 / Jul 03	Jul 03 / Dic 03
Conductividad eléctrica	>		
pH	>	<	<
Temperatura			
Sólidos totales disueltos	>	<	
Sodio	o	o	<
Fluoruro	o		
Sulfato	>		
Cloruro	<		>
Nitrógeno en nitrato	>	<	
Arsénico	o	o	<
Dureza total		o	o
Hierro	>	<	
Manganeso	o	o	
Nitrógeno en nitrito		o	o
Plomo	o	o	>
Fenoles	o	o	
Coliformes totales	o	>	
Coliformes fecales	o	<	

Nota:

	No hay variación significativa entre las fechas
>	El parámetro aumenta en el tiempo
<	El parámetro disminuye en el tiempo
o	No se realizó prueba por falta de información

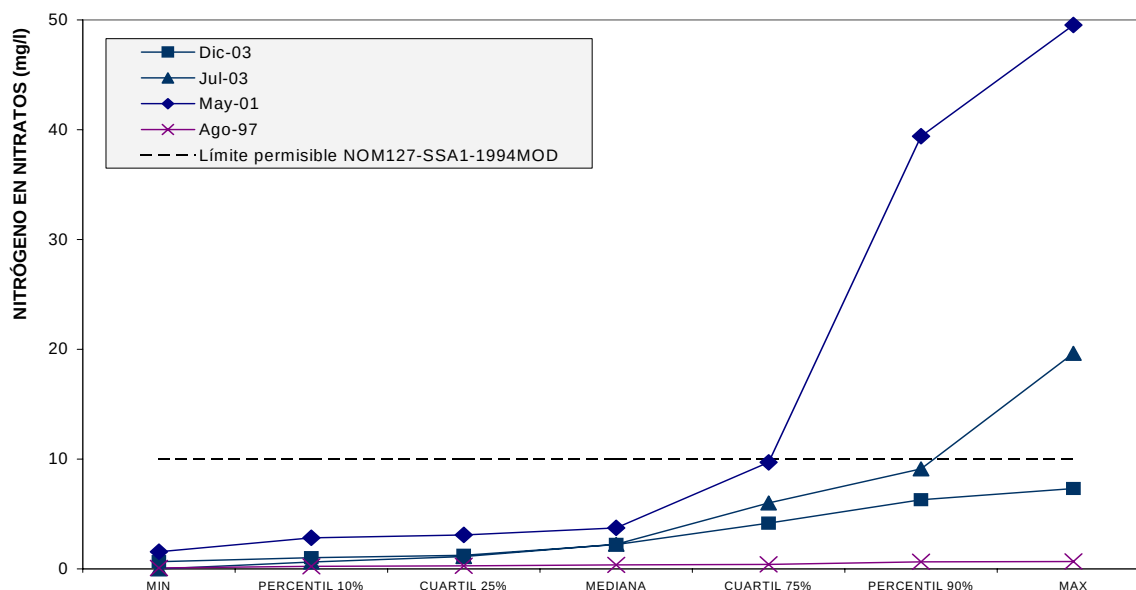


Figura 5. Variación temporal de la concentración de nitrógeno en nitratos

En cuanto al análisis realizado en base a la profundidad total de los aprovechamientos, se observó la captación del sistema de flujo local para 1979 y 2003 (Mora, 2005). En 1979, la captación se realizaba por medio de norias y pozos, las concentraciones de siete parámetros eran mayores en los aprovechamientos someros y en cuatro se mantuvieron sin variación (tabla 3). Con respecto a la profundidad total de los aprovechamientos, cuatro parámetros presentaban mayor concentración en los aprovechamientos someros, seis no presentaron variación y uno aumentó con la profundidad. El cloruro fue uno de los parámetros que presentó concentraciones mayores en los aprovechamientos someros debido probablemente a la captación de flujos locales afectados por contaminación antropogénica (figura 6).

Tabla 3. Resultado de la comparación a profundidad para 1979

Parámetro	Noria / Pozo	0-100 / 100-170 (m)
Temperatura		>
Conductividad eléctrica	<	<
Sólidos totales disueltos	<	<
Calcio		
Magnesio	<	
Sodio	<	
Potasio		
Bicarbonato	<	<
Carbonato	<	
Sulfato		
Cloruro	<	<

Nota:

	No hay variación significativa entre los tipos de aprovechamiento
>	El parámetro aumenta con la profundidad o es mayor en los pozos
<	El parámetro disminuye con la profundidad o es menor en los pozos

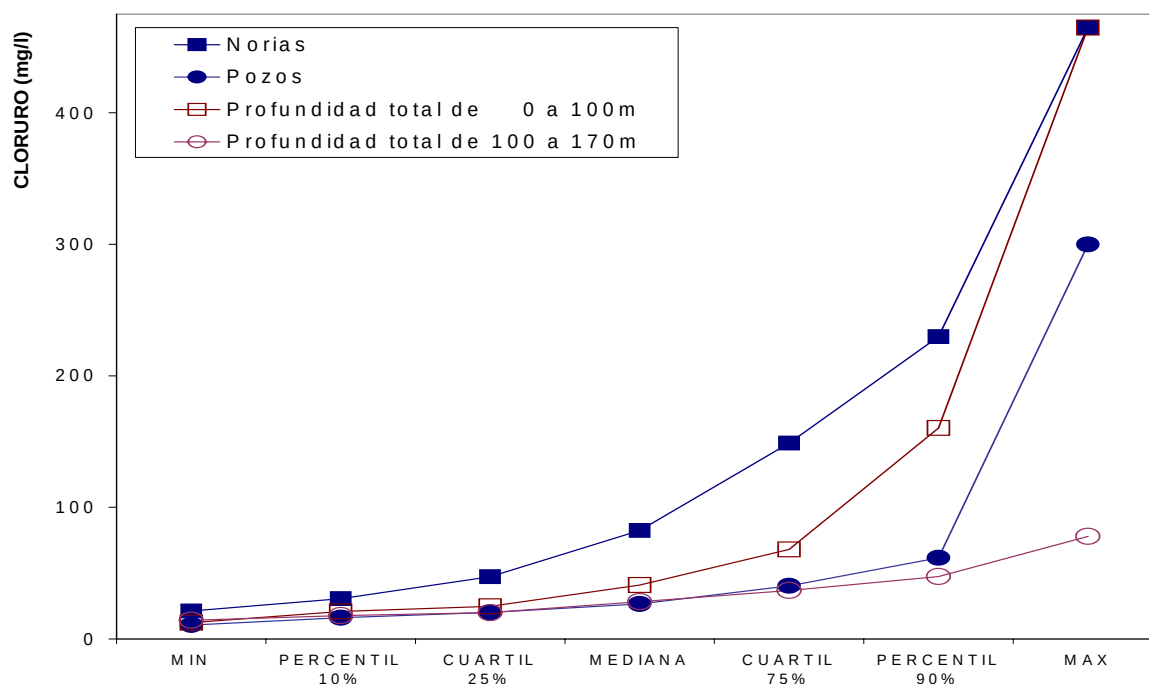


Figura 6. Variación de la concentración del cloruro a profundidad en 1979

En 1998, no se observaron variaciones en los parámetros de los pozos comparados, entre las profundidades de cero a 170 metros de profundidad, infiriendo que la captación de esos aprovechamientos era de flujo intermedio y regional, ya que el flujo local no podía ser captado debido a la sobreexplotación del acuífero y al descenso de los niveles del agua subterránea (Mora, 2005).

Pero en 2003 se observó aumento de concentraciones en siete parámetros en los aprovechamientos someros que varían hasta los 100 metros de profundidad (tabla 4), gráficamente se puede observar tal comportamiento en la figura 7. Infiriendo que el flujo local se volvió a captar, probablemente debido a la recarga de flujos preferenciales relacionado a las inundaciones presentadas en fechas anteriores a éste monitoreo.

Tabla 4. Resultado de la comparación a profundidad para 2003

Parámetro	0 – 100 (m) 100 - 170	100 – 170 170 – 250	170 - 250 250 - 350	250 - 350 500 – 700 (m)
Conductividad eléctrica	<			
pH		<	<	>
Temperatura			>	>
Potencial Redox			<	<
Oxígeno disuelto				
Alcalinidad	<			
Sólidos totales disueltos	<			
Calcio			<	<
Magnesio	<		<	<
Sodio			>	>
Potasio				
Bicarbonato	<			

Parámetro	0 – 100 (m)	100 – 170	170 - 250	250 - 350
	100 - 170	170 - 250	250 - 350	500 – 700 (m)
Fluoruro			>	>
Sulfato				
Cloruro	<			
Nitrógeno en nitrato				
Arsénico				<
Dureza total	<		<	<
Hierro				
Manganeso				
Nitrógeno en nitrito				
Plomo				
Fosfatos	>			
Coliformes totales				
Coliformes fecales				

Nota:

	No hay variación significativa entre las profundidades
>	El parámetro aumenta con la profundidad
<	El parámetro disminuye con la profundidad

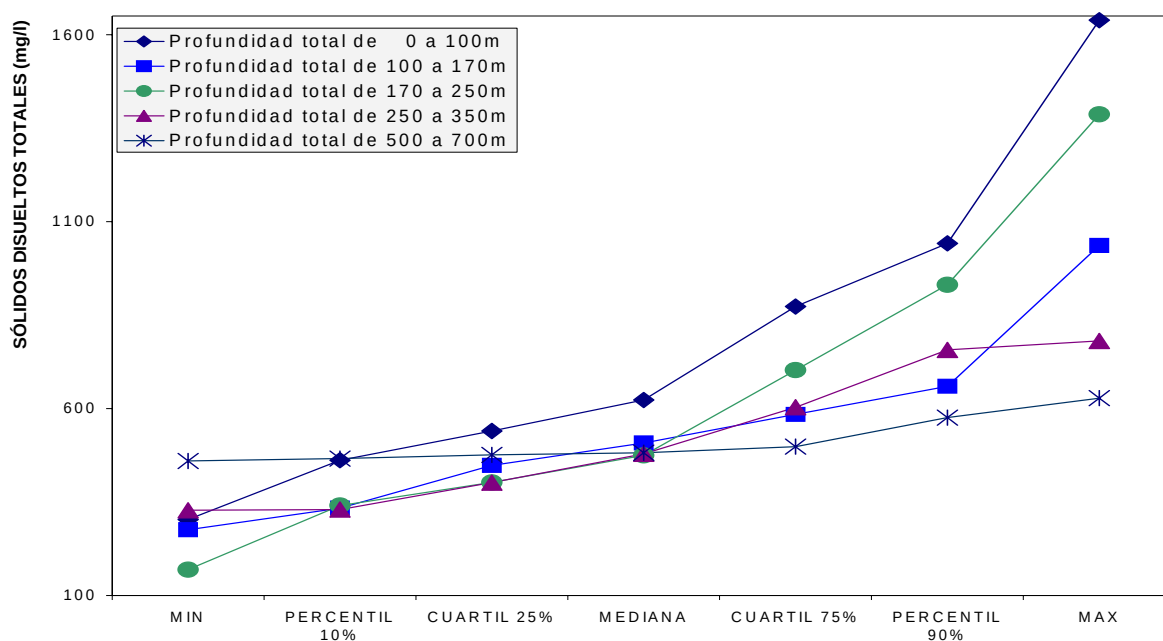


Figura 7. Variación de la concentración de sólidos disueltos totales a profundidad en 2003

CONCLUSIONES

Los análisis estadísticos realizados en el tiempo y a profundidad permitieron observar el efecto de las lluvias extraordinarias en el monitoreo de 2003. Con respecto a la comparación temporal, se observó que de 1979 a 1998 se presenta incremento en la mayoría de las concentraciones comparadas, pero de 1998 a 2003 se observa una disminución en la mayoría de las concentraciones de los parámetros comparados. A partir de la comparación a profundidad de los aprovechamientos monitoreados en 2003 se observó la presencia de las

mayores concentraciones en las captaciones menos profundas confirmando la presencia de flujos locales y el efecto del evento extraordinario el cual se corrobora con afectación de origen antropogénico, en la calidad del agua subterránea.

La disminución de la mayoría de los parámetros comparados de 1998 a 2003 puede deberse a que el muestreo realizado en 2003 se hizo después de una temporada extraordinaria de lluvias, en la cual se inundó parte del valle durante varios días.

En las ciudades de Irapuato y Salamanca se presentó un efecto similar al observado en la comparación regional realizada entre las fechas de 1998 y 2003. En la mayoría de las comparaciones se presentan una tendencia en la que las mayores concentraciones se observan en 2001.

En base al análisis estadístico a profundidad para 1979 se pudo corroborar la existencia de flujos locales que se captaban a través de norias y pozos poco profundos, los cuales presentaban mayores concentraciones en varios parámetros.

Al realizar la comparación entre las profundidades de 0 a 100 y de 100 a 170 m en 2003, se presentaron las mayores concentraciones en los aprovechamientos más someros. Este efecto puede deberse a las lluvias extraordinarias ocurridas antes de dicho muestreo.

Las pruebas utilizadas son una manera práctica de considerar monitoreos realizados históricamente ya sea de organismos operadores que abastecen de agua a las ciudades o de grandes regiones que incluyen zonas agrícolas, debido a que mucha información que no es sistematizada, muchas veces no se utiliza para su estudio. Se recomiendan como buena alternativa para obtener un punto de referencia y una evolución de la calidad del agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DOF, Diario Oficial de la Federación, *Declaratoria de desastre natural para efectos de las Reglas de Operación del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN)*, en virtud de los daños provocados por las inundaciones atípicas ocasionadas a causa de las lluvias torrenciales que se presentaron del 5 al 17 de septiembre de 2003, en diversos municipios del Estado de Guanajuato. Viernes 26 de septiembre de 2003. [http—
www.cafce.gob.mx-web-doc-FONDEN_Septiembre_\(26-SEP_2003\).pdf.url](http://www.cafce.gob.mx-web-doc-FONDEN_Septiembre_(26-SEP_2003).pdf.url)
- German, E. R. *Analysis of nonpoint-source ground water contamination in relation to land use: Assessment of nonpoint-source contamination in central Florida*. U. S. Geological Survey Water-Supply paper 2381-F. 1996, 60pp.
- IMTA, *Estudio de contaminación difusa en el agua subterránea en el acuífero Irapuato-Valle, Gto., Jiutepec, Morelos*: IMTA, Coordinación de Tecnología Hidrológica, Subcoordinación de Hidrología Subterránea. Diciembre de 2003, 323 pp.
- Johnson, R., *Estadística para ingenieros*, Editores Miller y Freud, 5ª edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., Naucalpan de Juárez, Edo. de México, 1997, 630 pp.

Mason, R. D. y Lind, D.A., *Estadística para administración y economía*, 7ª edición, Alfaomega grupo editor, S.A. de C.V., México, D.F., 1995, 911pp.

Mendenhall, W. et al, *Estadística Matemática con Aplicaciones* 2ª edición, Grupo editorial Iberoamérica, S.A. de C.V. México, D. F., 1994, 772 pp.

Mora R, José de Jesús, *Análisis Estadístico de Datos de Calidad de Agua Basado en un Sistema de Información Geográfica, Aplicación al Acuífero de Irapuato-Valle, Gto.* Tesis para obtener el grado de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Agosto de 2005.

Pértega Díaza Sonia y Pita Fernández Salvador, *Asociación de variables cualitativas: El test exacto de Fisher y el test de McNemar*.

<http://www.fisterra.com/mbe/investiga/fisher/fisher.asp> Actualizado el 14/11/2004. Visitada el 16/05/2005

