

Herramientas estadísticas para el manejo de recursos hidráulicos subterráneos

Katia Luisa del Rosario Rodríguez
Centro Meteorológico Provincial. Matanzas. Cuba.
e-mail: katia.rosario@mtz.insmet.cu

RESUMEN

Las series mensuales de seis pozos de monitoreo de las aguas subterráneas del tramo hidrogeológico MI-5, de la provincia de Matanzas, Cuba, fueron analizadas por varias técnicas estadísticas, usando el software STATISTICA. Fueron determinadas las ecuaciones de regresión de mayor ajuste entre los pozos; se identificaron cinco tipos de tendencia, siendo la lineal y la de paso las más comunes. El efecto de memoria y el tiempo de regulación del acuífero fueron determinados mediante el análisis de la estacionalidad, a través de la función de autocorrelación, definiéndose cuatro tipos de sistemas de flujos en el acuífero. La periodicidad de las series fue estudiada a través del análisis espectral definiendo las frecuencias de monitoreo. La interpretación de los resultados identificó un mal manejo de los recursos hídricos subterráneos en el período 2003-2005.

Palabras clave: autocorrelación de sistemas de flujo, periodograma de frecuencia de monitoreo, regresión, tendencias de manejo.

Use of statistical tools for groundwater resources management

ABSTRACT

The monthly groundwater level time series of six monitoring boreholes of groundwater sector named MI-5, from Matanzas province, Cuba, were analysed applying several statistics techniques by using software STATISTICA. The best regression equations were determined for each monitoring station. Five types of trends were determined of which the step and linear trends were the most common. The memory effect and the regulation time of the aquifer were examined by means of seasonal analysis using the autocorrelation function; this analysis defined four types of aquifer flow systems. The seasonal patterns of the time series were examined by means of spectral analysis and the monitoring frequencies were defined. The general results showed a wrong management of the groundwater resources for the period 2003-2005.

Keywords: Autocorrelation of flow systems, periodogram-monitoring frequency, regression, trends management.

INTRODUCCIÓN

En sus inicios la hidrología estadística estuvo limitada principalmente a estudios de problemas del agua superficial, en particular a extremos hidrológicos. En la actualidad, el dominio estadístico de la hidrología se ha ampliado hasta abarcar problemas tanto de calidad como de cantidad de las aguas dentro del contexto de ambos sistemas, superficiales y subterráneos. Con tan amplio dominio, la estadística se ha convertido no solo en un método de análisis poderoso, sino también, en un lenguaje natural de la hidrología (Shahin et al. 1993).

Las variables hidrogeológicas tienen una dependencia espacial y temporal que las hace únicas en comparación con conjuntos de datos de otros campos. Es por ello que son necesarias herramientas especiales para la organización, presentación, interpretación, estimación y simulación de las variables hidrogeológicas y por lo cual se ha utilizado la Hidrogeoestadística que puede ser definida como un conjunto de herramientas estadísticas y geoestadísticas para la descripción, análisis, estimación y simulación de las variables hidrogeológicas (Zhou 1995).

Estas variables pueden ser clasificadas, desde el punto de vista de los sistemas de agua subterránea, como variables de entrada, que son definidas como factores que influyen en el sistema acuífero desde el medio ambiente, o como variables de salida, definidas como la respuesta del sistema de agua subterránea ante las entradas y las variables de estado, aquellas que caracterizan el estado del sistema acuífero (Zhou 1995).

El objetivo de este trabajo es proveer algunas técnicas estadísticas para la descripción y análisis de la variable de estado identificada como los niveles piezométricos de las aguas subterráneas, cuya utilización permitirá a los departamentos que controlan, monitorean y gestionan las aguas subterráneas, transformar los datos primarios, obtenidos de la red de monitoreo, en información, de forma tal que pueda ser utilizada por gestores de los recursos hídricos en la toma de decisiones para el uso racional de las aguas subterráneas

Al mismo tiempo se pretende que las técnicas estadísticas, metodologías y pasos aquí descritos, sean aplicados en las bases de datos de otros tramos, sectores o cuencas hidrogeológicas y generalizadas como herramientas de manejo de los recursos subterráneos. Los datos analizados fueron entregados por los especialistas que operan la red de monitoreo de las aguas subterráneas en la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico. Las observaciones corresponden a seis pozos de observación de frecuencia mensual de la cuenca hidrogeológica M-I, de la provincia de Matanzas, Cuba, con registros de niveles desde enero de 1987 hasta abril del 2011.

La cuenca hidrogeológica de estudio abarca un área de 476 km², se localiza entre las coordenadas conformes de Lambert: 423000 a 448500 Este y 339500 a 369000 Norte del sistema Cuba Norte, abarcando todo el territorio alrededor de la ciudad cabecera provincial, limitando al Norte con la línea de costa, al Sur con el parteaguas hidrogeológico de las vertientes Norte-Sur, al Oeste con el límite de la provincia Mayabeque y al Este, con el borde de la cuenca hidrogeológica M-II (figura 1). La cuenca M-I, dadas las características hidrogeológicas, fue subdividida en 5 tramos hidrogeológicos (Chong Li y Campos 1996). Los análisis que aquí se presentan corresponden al procesamiento de las series de los niveles de las aguas subterráneas de seis pozos del tramo hidrogeológico MI-5.

Este tramo hidrogeológico tiene una extensión superficial de 110 km², de ellos 80 km² abarcan la zona acuifera, 22 km² la poco acuifera y 8 km² de zona salina. Por las particularidades de formación, tránsito y descarga de las aguas subterráneas este tramo de cuenca se subdivide en 3 zonas hidrogeológicas: Ceiba Mocha, Manantiales de Bello y La Julia. El tramo hidrogeológico MI-5 es el más importante por la ubicación de un plan de cultivos varios con

riego de la zona de Ceiba Mocha, en la zona de La Julia y de los Manantiales Bello se ubican los grandes acueductos poblacionales de la ciudad de Matanzas.

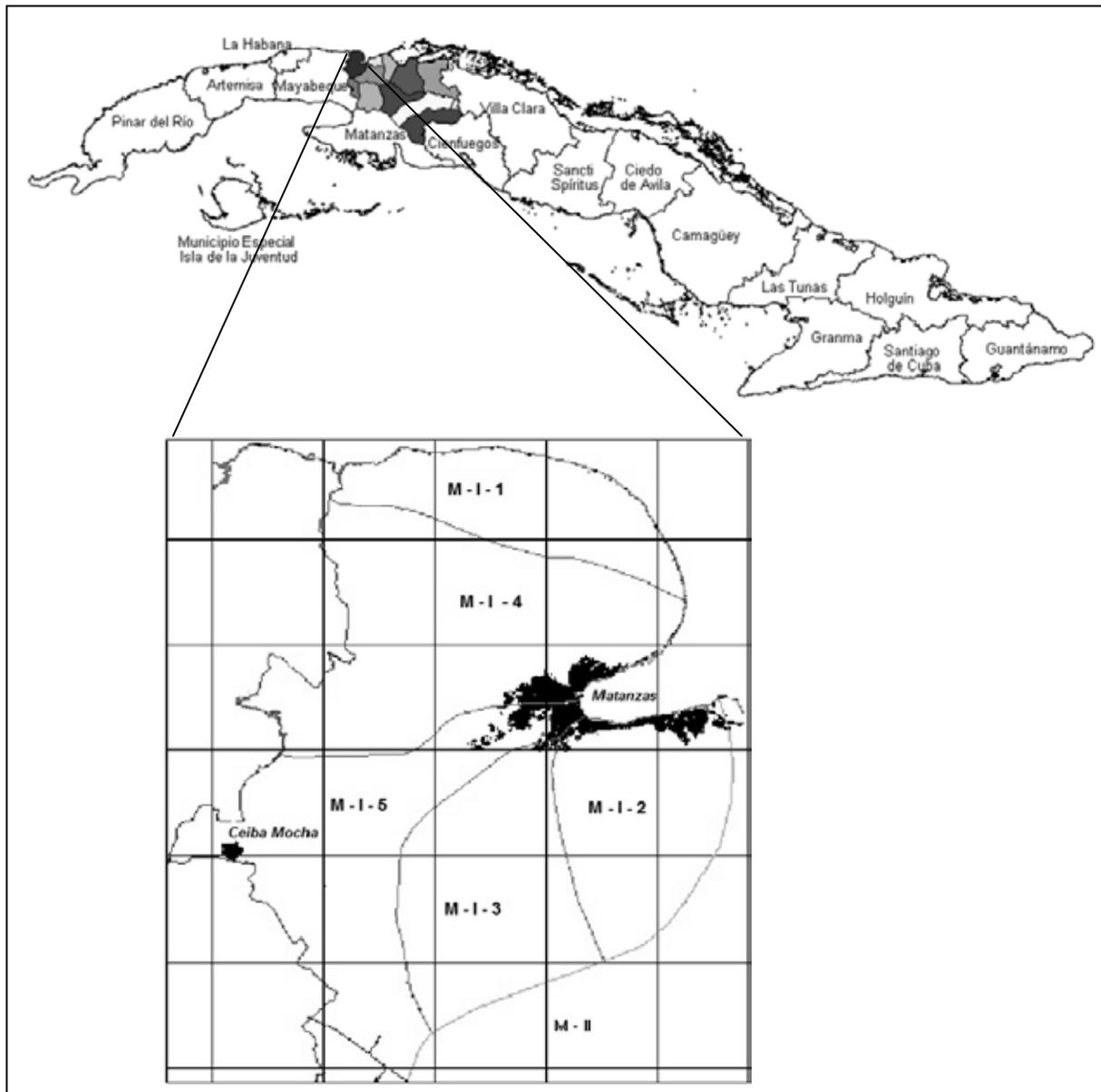


FIGURA 1. Ubicación de la cuenca M-I y sus tramos hidrogeológicos

En la zona de Ceiba Mocha los espesores oscilan entre 20-30 m, los niveles yacen a profundidades de 17-37 m, con una fluctuación anual de 3 - 4 m y cotas absolutas de 20 a 40 m. La Julia tiene espesores de 20-60 m, los niveles se encuentran a 12-33 m, con cotas absolutas de 1-2 m y una oscilación anual de 1-2 m. En la zona Manantiales Bello, los niveles de los pozos son de 3 - 8 m, con cotas absolutas de 21 m. El gradiente es del orden de 0.03 en la zona de Ceiba Mocha, mientras que en la zona baja de La Julia es de 0.0013.

Los caudales de aforo de los pozos son mayores de 50 l/s, con abatimientos de 1-8 m, para gastos específicos de 1-117 lps/m en la zona Ceiba Mocha. Mientras en La Julia, los caudales de los pozos son más irregulares, desde 2-3 l/s hasta mayores de 50 l/s con abatimientos de 1-11 m.

Los gastos específicos están entre 0,3 -120 lps/m. En las zonas de los Manantiales Bello, los gastos de los pozos son mayores de 100 l/s con abatimientos de 2-4 m, los gastos específicos entre 27-121 lps/m. Las trasmisividades (Chong Li y Campos 1996) son de 7000, 20000 y 10000 m²/d, para las zonas de Ceiba Mocha, La Julia y Bello, respectivamente.

La zona Ceiba Mocha, además de la alimentación por la infiltración local, recibe corrientes desde la cuenca Aguacate, que se calculan aproximadamente de unos 42 hm³/año (1300 l/s).

La surgencia con presión de los Manantiales Bello es originada por un corte del flujo del escurrimiento subterráneo normal desde la zona de Ceiba Mocha o áreas contiguas, por sedimentos impermeables condicionados por una falla transversal local (Guneva 1967). El caudal mínimo descargando hacia el río Cañas, en el período seco, es de 1.15 m³/s. La zona La Julia recibe también el escurrimiento de tránsito de las zonas de Ceiba Mocha y de Bello, así como aportes laterales de las descargas de los tramos hidrogeológicos M-I-3 y M-I-4. La dirección general del flujo es del Noroeste, descargando en la Bahía de Matanzas.

Los recursos medios explotables evaluados para cada zona (Chong Li y Campos 1996) son de 12.62 hm³/año para Ceiba Mocha, 11.58 hm³/año para La Julia y de 37.03 para los Manantiales Bello. Según los datos globales registrados, no especificados, la explotación de las aguas subterráneas en la cuenca es creciente de acuerdo con el incremento poblacional de los abastos en acueductos con valores desde 30,50 hm³ en el año 1978 hasta 48,44 hm³ en 1988, para toda la cuenca Hidrogeológica M-I. Según estudios recientes (Cuéllar et al. 2011), la extracción de las aguas subterráneas de La Julia y Bello está en el orden de 23.74 hm³/año.

METODOLOGÍA

La metodología se presenta en forma de pasos, siguiendo las experiencias de análisis estadísticos anteriores así como lo recomendado por la bibliografía de referencia. Primeramente, se realiza un estudio previo de los datos primarios basado en el análisis de los datos dudosos mediante los hidrógrafos, las tablas de frecuencia e histogramas y la descripción estadística de la variable mediante la estadística sumaria; posteriormente se realiza el ajuste de estos datos con las técnicas de correlación y regresión. Una vez estudiados los datos primarios, se caracteriza e interpreta cada variable mediante el análisis de series de tiempo. Todos los cálculos fueron realizados usando Microsoft Office Excel y el software STATISTICA v7.

ESTUDIO PREVIO DE LOS DATOS PRIMARIOS

Para aplicar métodos estadísticos complejos a una serie de datos es necesario convencerse de que los mismos sean fidedignos y representativos de la población considerada, es decir, que sean imparciales, independientes y homogéneos, lo cual debe comprobarse antes de cualquier análisis estadístico. Respecto a la fiabilidad de los datos debe señalarse que su medida está sujeta a errores instrumentales y humanos, que de forma general se clasifican en accidentales y sistemáticos, siendo en muchas ocasiones la combinación de ambos. Por ello un primer paso es identificar los datos dudosos y decidir sobre el uso o no de los mismos.

Representación gráfica

La figura 2 muestra el hidrógrafo de uno de los pozos estudiados, pozo 9A. Como puede observarse los puntos señalados son valores extremos que no tienen relación alguna con el resto de los valores adyacentes, ni con el comportamiento de los valores en el tiempo. Estos valores son considerados como datos dudosos y fueron eliminados de la muestra para realizar el análisis estadístico, considerándolos como datos faltantes. En la figura 3 los datos dudosos fueron

eliminados y la escala fue adecuada, claramente se observa el cambio en el hidrógrafo y nuevas observaciones son consideradas, aunque no eliminadas ni sustituidas pues pueden estar dadas por pozos de extracción cercanos.

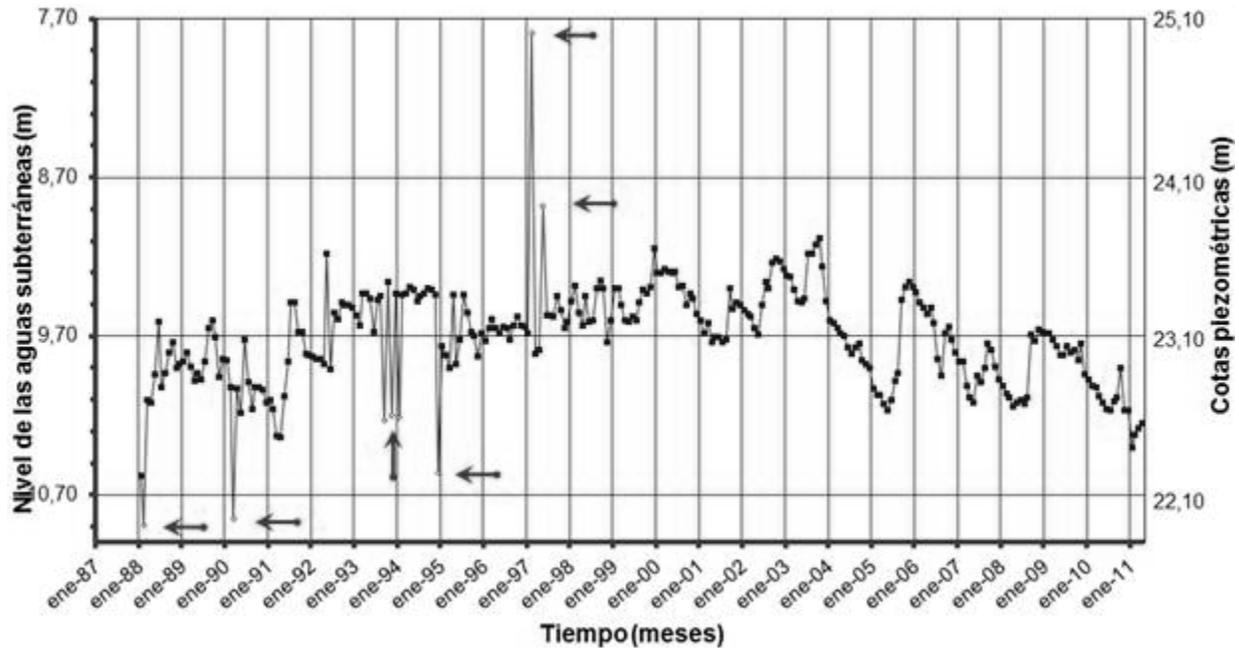


FIGURA 2. Representación de la serie de las profundidades de niveles observadas en el pozo 9-A y la identificación de los datos dudosos

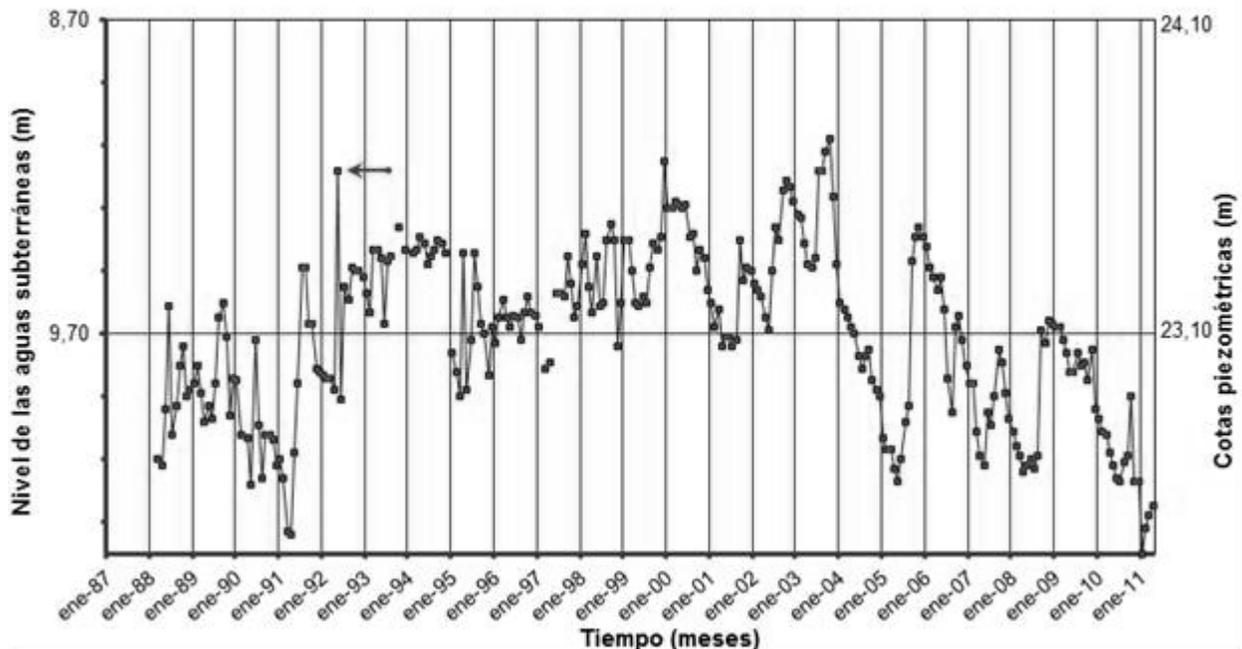


FIGURA 3. Representación de la serie de las profundidades de niveles observadas en el pozo 9-A con los datos dudosos eliminados

Distribución de frecuencia

Considerando los valores del pozo 9A sin una validación previa, se observa que el valor mínimo es 7,79 m y el máximo 10,89 m dando un rango de 3,1. Se tomó un ancho de clase de 0,2 que forma 16 intervalos, si se aumenta el ancho de la clase se reduce el número de intervalos, lo cual es más aconsejable, pero en este caso se ha tomado así para comparar con la validación. La distribución de las frecuencias se representa en la tabla 1.

**TABLA 1. Frecuencia de los niveles medidos mensualmente.
Pozo de observación 9A**

Intervalos de clases	Frecuencia Absoluta	Frec. Abs. Acumulada	Frecuencia Relativa	Frec. Rel. Acumulada
$7,79 \leq x < 7,99$	1	1	0,44	0,44
$7,99 \leq x < 8,19$	0	1	0,00	0,44
$8,19 \leq x < 8,39$	0	1	0,00	0,44
$8,39 \leq x < 8,59$	0	1	0,00	0,44
$8,59 \leq x < 8,79$	0	1	0,00	0,44
$8,79 \leq x < 8,99$	1	2	0,44	0,89
$8,99 \leq x < 9,19$	6	8	2,67	3,56
$9,39 \leq x < 9,59$	66	92	29,33	40,89
$9,590 \leq x < 9,79$	56	148	24,89	65,78
$9,79 \leq x < 9,99$	35	183	15,56	81,33
$9,99 \leq x < 10,19$	21	204	9,33	90,67
$10,19 \leq x < 10,39$	5	209	2,22	92,89
$10,39 \leq x < 10,59$	2	211	0,89	93,78
$10,59 \leq x < 10,79$	0	211	0,00	93,78
$10,79 \leq x < 10,99$	2	213	0,89	94,67
<i>Faltantes</i>	12	225	5,33	100

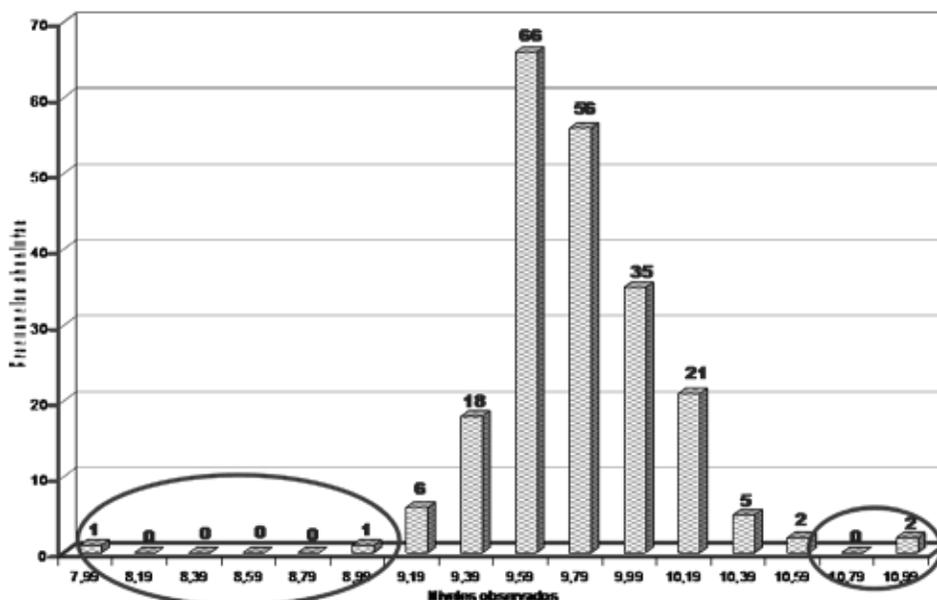


FIGURA 4. Histograma de la tabla 1

En la frecuencia absoluta es fácil ver que de un total de 225 observaciones de profundidad de nivel, sólo existen dos registros de 7,79 m a 8,99 m, e igual sucede de 10,59 a 10,99 m. Las frecuencias son analizadas de conjunto con el hidrógrafo y se decide que estas observaciones no deben tenerse en cuenta para el análisis; se recomienda que se estudie la anomalía.

En el ejemplo que se presenta fueron eliminadas las señaladas en la figura 2, resultando para el pozo 9A validado el valor mínimo 8,88 m y el máximo 10,34 m, para un rango de 1,46. Al tomarse el mismo ancho de clases se reducen los intervalos a 8. La distribución de las frecuencias se presenta en la tabla 2. Una idea visual más inmediata que la dada por las tablas la proporcionan los histogramas de las figuras 4 y 5.

TABLA 2. Frecuencia de los niveles medidos mensualmente, obtenida posterior a la validación de los datos del pozo de observación 9A

Intervalos de clases	Frecuencia Absoluta	Frec. Abs. Acumulada	Frecuencia Relativa	Frec. Rel. Acumulada
$8,88 \leq x < 9,08$	1	1	0,44	0,44
$9,08 \leq x < 9,28$	12	13	5,33	5,78
$9,28 \leq x < 9,48$	46	59	20,44	26,22
$9,48 \leq x < 9,68$	64	123	28,44	54,67
$9,68 \leq x < 9,88$	42	165	18,67	73,33
$9,88 \leq x < 10,08$	27	192	12,00	85,33
$10,08 \leq x < 10,28$	11	203	4,89	90,22
$10,28 \leq x < 10,48$	2	205	0,89	91,11
Faltantes	20	225	8,89	100

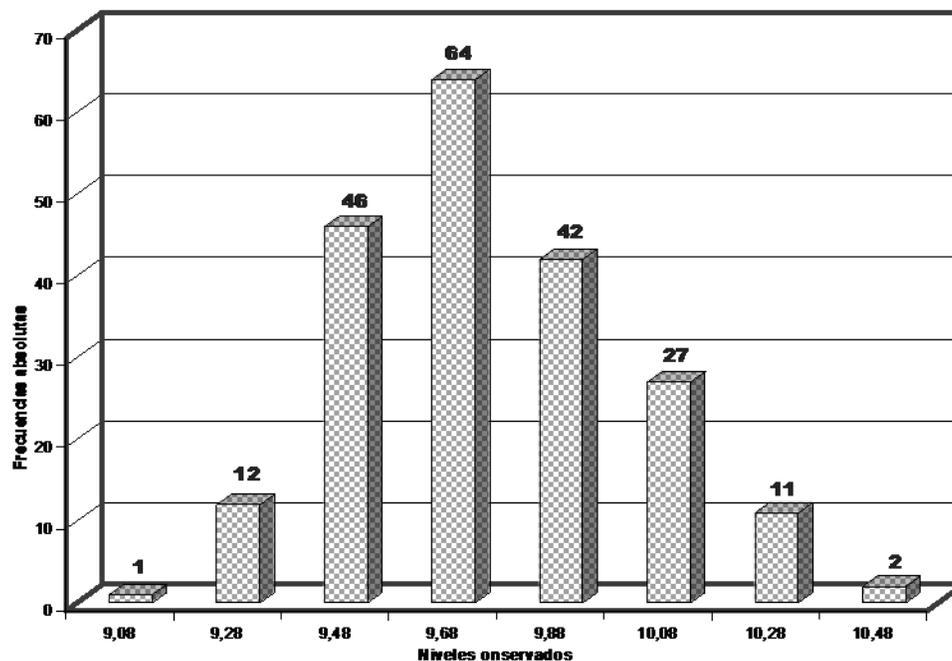


FIGURA 5. Histograma de la tabla 2

Estadística sumaria

Mediante la estadística descriptiva o sumaria se definen propiedades tales como la tendencia central, dispersión o variabilidad, asimetría y esbeltez. Como puede observarse en la tabla 3, las series analizadas muestran una distribución asimétrica. Esto indica que si se quieren realizar otros análisis los valores deben ser transformados para lograr una distribución normal. En este caso no se realizan por no ser necesarios para dar respuesta al objetivo de la investigación.

Análisis de asociación y dependencia de los puntos de observación

El análisis de asociación y dependencia de los puntos de observación se realiza a través del análisis de regresión y correlación y su importancia práctica en este trabajo radica en la sustitución de los datos dudosos y la obtención de los valores faltantes de un punto de observación en función de su dependencia con el resto de la red de monitoreo.

TABLA 3. Estadística sumaria de los puntos de observación del tramo MI-5

Estación	Observación	Media	Mediana	Mín	Máx	Var.	Desv. Est.	CV	Coef. Asimetría	Curtosis
P9A	205	23,15	23,19	22,22	23,72	0,07	0,26	0,01	-0,51	0,19
P108A	222	2,27	2,31	0,96	3,68	0,14	0,37	0,16	0,18	1,40
P109	222	3,47	3,48	1,68	6,15	0,65	0,81	0,23	0,17	0,65
P202	204	44,42	45,17	26,05	47,52	11,31	3,36	0,08	-3,77	16,56
P1012	46	31,57	31,72	29,81	32,84	0,63	0,79	0,03	-0,62	-0,19
P1013*	57	75,53	75,52	74,21	77,36	0,69	0,83	0,01	0,38	-0,41

*Los datos corresponden a la profundidad del nivel

Correlación

El análisis de correlación permite *investigar si dos o más variables están relacionadas y medir la intensidad de esta relación* (Pupo et al. 2004). Los resultados de la tabla 4 muestran que las variables más correlacionadas linealmente entre si son P9A, P202 y P1012.

Los coeficientes de correlación múltiple, presentados en la tabla 5, muestran en su mayoría una alta correlación de las variables dependientes con el resto de las variables. Esto va indicando las posibles ecuaciones de regresión lineal a utilizar para la estimación de cada variable en particular en caso de ser necesario.

TABLA 4. Correlaciones simples (r)

Variables	P108A	P109	P202	P1012	P9A
P108A	1				
P109	0,43	1			
P202	0,75	0,48	1		
P1012	0,68	0,76	0,89	1	
P9A	0,71	0,48	0,90	0,80	1

TABLA 5. Coeficientes de correlación múltiple (R)

$R_{9A.202\ 108A\ 109\ 1012} = 0,90$	Se considera P9A como variable dependiente
$R_{108A.9A\ 202\ 109\ 1012} = 0,75$	Se considera P108A como variable dependiente
$R_{109.9A\ 202\ 108A\ 1012} = 0,87$	Se considera P109 como variable dependiente
$R_{202.9A\ 108A\ 109\ 1012} = 0,96$	Se considera P202 como variable dependiente
$R_{1012.9A\ 202\ 108A\ 109} = 0,96$	Se considera P1012 como variable dependiente

Las correlaciones parciales que se muestran en la tabla 6 permiten tener una idea del orden de las variables a introducir en los modelos de ecuaciones para determinar su significación sobre la variable dependiente. Los resultados del análisis de correlación están muy vinculados al procedimiento de la selección de la ecuación de mejor regresión.

Regresión

El análisis de regresión ayuda a *determinar el modelo o ecuación matemática que mejor representa la relación existente entre las variables analizadas* (Pupo et al. 2004). El objetivo práctico de este análisis es el completamiento de los valores faltantes en una serie.

Se parte de considerar relaciones lineales entre las variables basados en la representación de los gráficos de dispersión. Se determinaron las ecuaciones de regresión de mejor ajuste para cada punto luego de realizarse todas las dójimas y verificación de supuestos necesarios.

Las ecuaciones de regresión ajustadas válidas para el tramo MI-5 se presentan en tabla 7.

TABLA 6. Coeficientes de correlación parcial

Variables independientes	Variable dependiente				
	P9A	P108	P109	P202	P1012
P9A		0,10	0,19	0,60	-0,15
P108A	0,10		0,11	0,27	-0,06
P109	0,19	0,11		-0,61	0,82
P202	0,60	0,27	-0,61		0,77
P1012	-0,15	-0,06	0,82	0,77	

TABLA 7. Ecuaciones de regresión ajustadas para cada variable y su validez

Variable	Ecuación de regresión
P9A	$P9A = 20,9608 + 0,0443779 * P202 + 0,0675949 * P109$
P108	$P108A = 0,663012 + 0,18406 * P109 + 0,0212 * P202$
P109	$P109 = -18,5903 + 1,54022 * P1012 - 0,567815 * P202$
P202	$P202 = -33,4189 + 1,78068 * P9A + 1,26465 * P1012 - 0,520329 * P109$
P1012	$P1012 = 9,94514 + 0,434133 * P202 + 0,433303 * P109$

Con estas ecuaciones se sustituyeron los datos dudosos y restituyeron los datos faltantes para el completamiento de cada una de las series analizadas.

CARACTERIZACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LAS SERIES DE NIVELES DE LAS AGUA SUBTERRÁNEAS.

Existen dos objetivos principales en el análisis de las series de tiempo (Pupo et al. 2004):

- a. Identificar la naturaleza del fenómeno representada por la secuencia de observaciones.
- b. Pronosticar los valores futuros de la variable de la serie de tiempo.

En el presente documento se realiza el análisis para la identificación de la naturaleza del fenómeno a través de la determinación de las componentes de las series de tiempo de los niveles de las aguas subterráneas.

Características básicas

Las características de las series de tiempo son descritas por su media, varianza y autocorrelación. La media y la varianza de las series analizadas que se describen en el tópico de estadística sumaria permiten identificar, en el caso de la media, las diferentes zonas acuíferas

representadas por los pozos de observación, y en de la varianza, al dar una medida de la dispersión de las observaciones con respecto a la tendencia central, indica aquellas zonas donde existe una mayor incidencia sobre el régimen de oscilación de los niveles. En el caso del 9-A existe una explotación y alimentación estables en el tiempo; el 108A no está en una zona representativa; el 109 fue sustituido y no se indicó en el registro; el 202 se ubica en una zona de explotación irregular y el 1012 y 1013 no tienen buenas condiciones de construcción

Autocorrelación

Esta característica se interpreta a través de los autocorrelogramas. El autocorrelograma disminuye con el incremento del espacio de tiempo y eventualmente se aproxima a cero. Esto significa que a menor espacio de tiempo entre dos valores de niveles, mayor es la correlación entre ellos.

El autocorrelograma muestra la dependencia estacional (Molerio y Portuondo 1997; Pupo et al. 2004). Dado que el nivel a un tiempo dado depende del valor previo debido a la función de regulación del almacenamiento del sistema acuífero, el correlograma producido por los niveles de las aguas subterráneas muestra información relacionada con el tiempo que la influencia de una variable de entrada externa toma sobre el sistema acuífero, llamado efecto de memoria (Molerio y Portuondo 1997). Cuando el autocorrelograma decrece suavemente el sistema tiene un largo efecto de memoria indicando importantes reservas con gran inercia, esto significa que el acuífero tiene mayor tiempo para regular el volumen de agua almacenado. Cuando el autocorrelograma decrece rápidamente indica la presencia de un sistema con corta memoria y baja inercia, una variable externa de entrada como la lluvia puede provocar picos significativos pero la capacidad de almacenamiento del acuífero no es significativa.

En la figura 6 se muestra el autocorrelograma de la estación P9A. Como puede observarse el correlograma decrece suavemente indicando un largo efecto de memoria que, cuantificado por el límite de Andersen (0,2) es de 15 meses. Esto indica que en esta zona hay reservas significativas con un tiempo de regulación mayor de un año y esto explica la presencia del campo de pozos de Bello, donde se encuentran las fuentes de abasto más importantes del acueducto a la ciudad de Matanzas, de las cuales se extraen 13.74 hm³/año (Cuéllar et al. 2011).

Determinación de las componentes de las series

Las series de tiempo se generan por el efecto de factores sistemáticos y aleatorios. Estos componentes o factores provocan cambios a corto y largo plazo en las fluctuaciones de la serie y se identifican como: Tendencia, Variación estacional o estacionalidad, Variación cíclica o periodicidad y Variaciones Irregulares o residuales (Pupo et al. 2004).

Análisis de tendencia

Los valores de los niveles de las aguas subterráneas pueden cambiar debido a la explotación de las aguas subterráneas, al riego, a la contaminación y a los cambios climáticos.

Lo más importante del análisis de tendencia de los niveles de las aguas subterráneas debe ser visto en el contexto de:

1. Las características regionales del sistema acuífero para la toma de decisiones
2. La caracterización propiamente dicha del punto de observación
3. El manejo de los datos

El análisis de tendencia realizado en esta investigación tuvo como objetivos:

1. Conocer su comportamiento durante el periodo que recorren los datos
2. Comparar la variación de dos o más series

Las fluctuaciones de los niveles representados en los hidrógrafos, muestran diferentes tendencias que manifiestan variaciones con cambios de velocidad y variaciones con cambios de dirección. Al no reflejar una tendencia única se estimó esta componente mediante medias móviles. Al mismo tiempo, como las series tiene suficientes datos, se partitionaron convenientemente y se analizó el comportamiento para cada subgrupo de datos.

Para hacer un análisis comparando todas las series se transformaron sus valores en valores estandarizados permitiendo la comparación en una misma escala, sin importar que fuera nivel piezométrico o profundidad de nivel. Se utilizaron cotas y profundidades - por no contar con la cota de la estación 1013 - y al representar esta variable se cambiaron sus signos.

En la figura 7 se representan dos análisis de tendencias, de corto y largo plazo. La de corto plazo se realizó considerando el comportamiento de todas las observaciones representadas, determinándose varios períodos de tendencias crecientes y decrecientes, las cuales se resumen en la tabla 8.

Para una representación gráfica más clara del análisis de tendencia de largo plazo o hiperanual se determinó la media móvil para un período de 7 meses de la serie media de las observaciones estandarizadas, observándose, para los 24 años de registros mensuales analizados, ciclos de ascenso y descensos de aproximadamente 12 años, respectivamente.

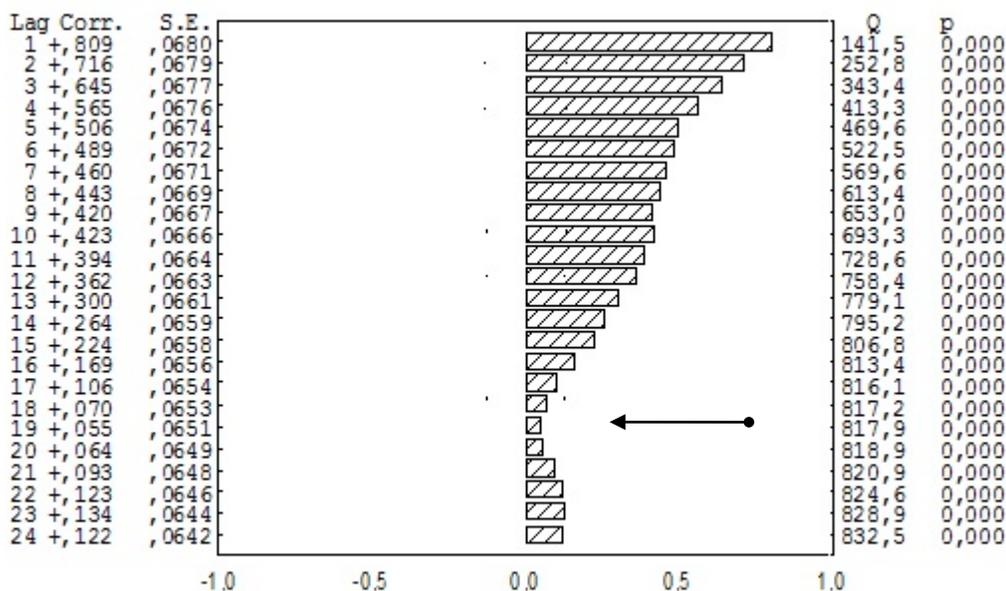


FIGURA 6. Autocorrelograma de la estación P9A

De acuerdo con el análisis de tendencias, en el período 2003-2005 hubo un mal manejo del acuífero por no analizarse la tendencia de descenso la cual se ha repetido en el tiempo, registrándose niveles cercanos a los mínimos.

Considerando los ciclos hiperanuales, es de esperarse que el período de sequía continúe hasta finales de 2012, aunque teniendo en cuenta los ciclos de las precipitaciones para esta cuenca, recientemente estudiados (Del Rosario y Petrova 2011), podría extenderse hasta 2014 o 2015. Por ello es de vital importancia que se tenga en cuenta este análisis en el balance de la demanda y entrega de agua para la explotación en este tramo hidrogeológico.

Estacionalidad

La estacionalidad se identifica por las variaciones periódicas que se producen de manera regular en un subperíodo de un año. En los hidrógrafos queda evidente la existencia de estacionalidad debido a la sucesión de períodos de descenso y ascenso de los niveles dentro del año hidrológico, lo cual, como es bien conocido se debe a los cambios climatológicos y atmosféricos.

Periodicidad

Esta componente es observada en todos los gráficos con cierta similitud para toda la cuenca. De hecho, los niveles de las aguas subterráneas muestran frecuentemente variaciones estacionales y cíclicas debido a las variaciones de las precipitaciones, tanto subanual como hiperanualmente, las cuales son la fuente principal de alimentación del acuífero y debido a las variaciones de la explotación del acuífero con fines de riego y abasto principalmente.

En este trabajo se propone que tales características periódicas de las series de los niveles de las aguas subterráneas sean estimadas por el Análisis Espectral (Fourier), también conocido por las llamadas Series Armónicas (Zhou 1995). El propósito de este análisis es identificar las fluctuaciones estacionales de diferentes longitudes.

Una aplicación práctica de este análisis es que puede sugerirse la frecuencia de monitoreo (Molerio 1992, Molerio y Torres 2002) y además se calculan los periodos de descensos y ascenso. Estos cálculos son realizados a partir de los periodogramas.

La tabla 9 muestra los resultados de los cálculos del análisis espectral aplicado a la serie del pozo 9A y la figura 8 el periodograma, gráfico que representa estos resultados.

TABLA 8. Tendencias detectadas en el comportamiento de los niveles de las aguas subterráneas del tramo hidrogeológico M-I-5

Tendencias	Períodos	Meses
Decrecientes	1989 – 1991	24
	1992 – 1993	12
	1999 – 2001	12
	2003 – 2005	24
	Oct 2005 – Abr 2008	6
	Dic 2008 – Abr 2011	5
Crecientes	1987 – 1989	24
	1991 – 1992	12
	1993 – 1995	24
	1995 – 2000	48
	May 2005 – Sep 2005	4
	May 2008 – Nov 2008	6
Ciclos hiperanuales		
Crecientes	Jul 1987 – Nov 1999	148 (12 años)
Decrecientes	Dic 1999 – Abr 2011	138 (11 años)

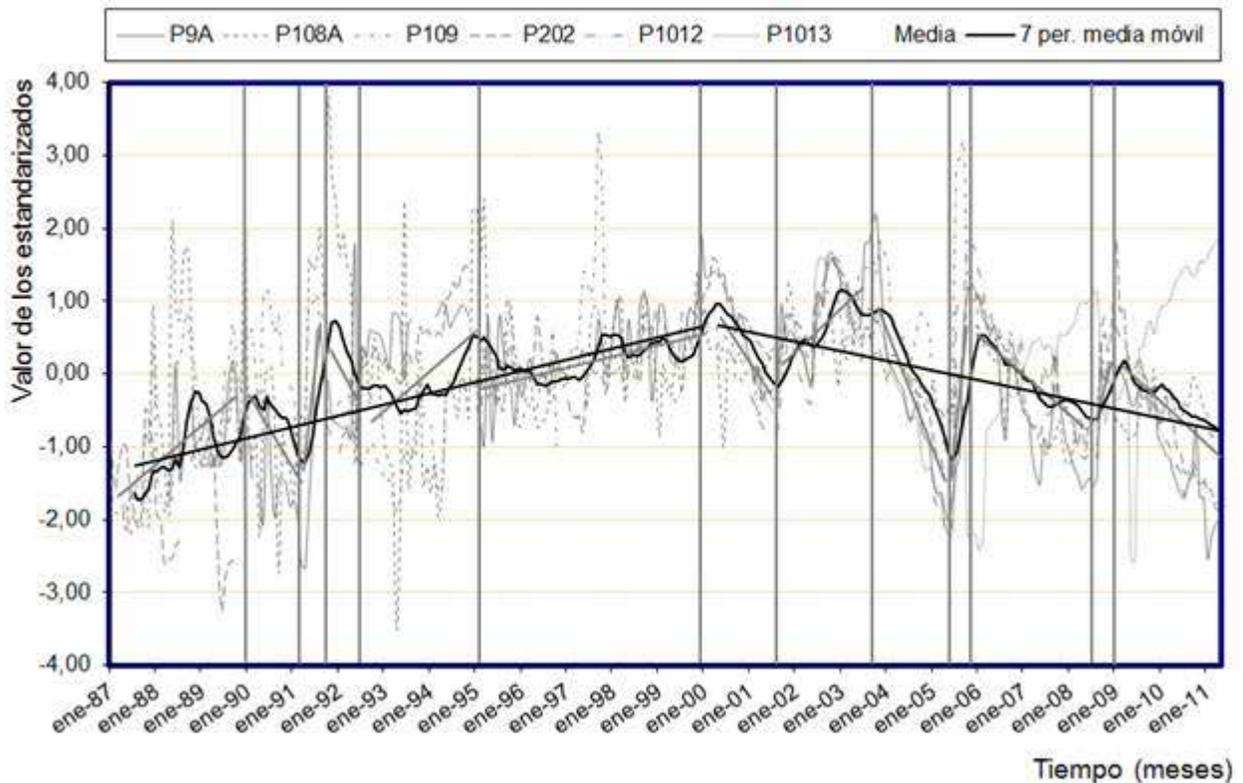


FIGURA 7. Tendencias identificadas para el tramo hidrogeológico M-I-5 mediante la representación de las variables estandarizadas

TABLA 9. Resultados del análisis espectral

Frecuencia	Período	Cosenos	Senos	Periodograma	Densidad
0		4,95E-06	-0	2,6E-09	1,307
0,005	212,000	-0,150	-0,022	2,440	1,620
0,009	106,000	-0,119	-0,055	1,825	1,487
...
0,132	7,571	0,001	-0,033	0,117	0,081
0,142	7,067	0,011	-0,013	0,030	0,033

De acuerdo con el tiempo de regulación las frecuencias de monitoreo para las estaciones analizadas pueden ser:

Estación	Frecuencia de Monitoreo
P9A	Semestral
P108A	Mensual
P202	Trimestral
P109	Trimestral
P1012	Trimestral
P1013	Trimestral

No obstante se recomienda mantenerlos mensuales ya que el registro es manual. Si se instalara un registrador automático programable, estas frecuencias indican el periodo de

programación para la recolección del dato, evitando perder información para su análisis y ahorro en el costo del monitoreo.

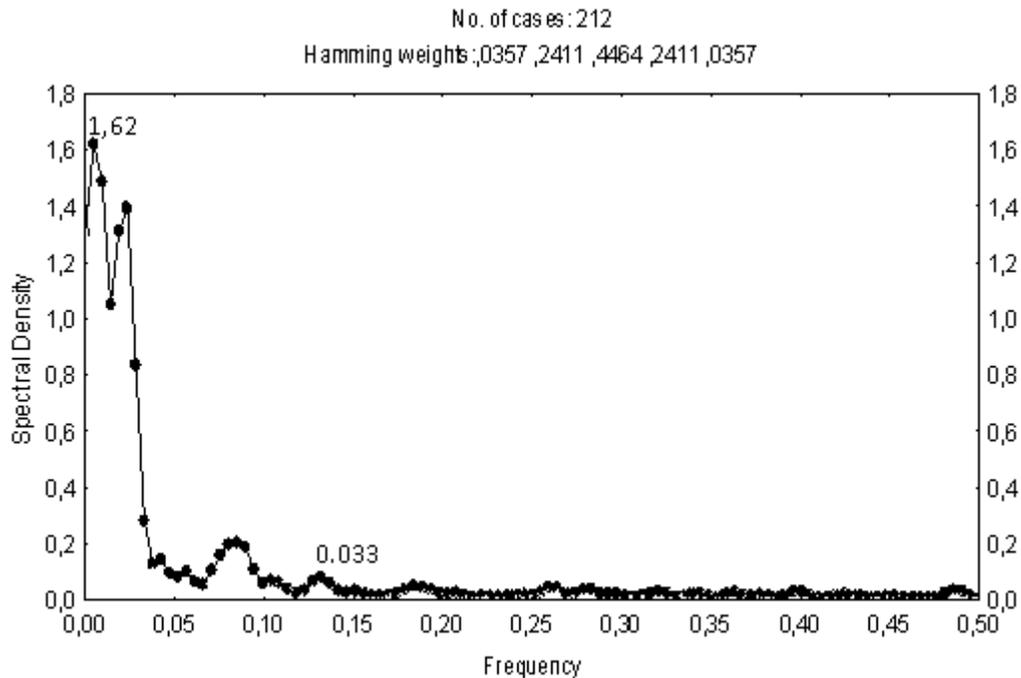


FIGURA 8. Análisis espectral de la serie mensual de las aguas subterráneas. Periodograma del punto de observación P9A

Interpretación de los resultados obtenidos del análisis de las series de tiempo

Los resultados de los análisis anteriormente descritos se presentan en forma de resumen en la tabla 10.

TABLA 10. Resumen de los resultados obtenidos del análisis de las series de tiempo

Pozo	Autocorrelograma			Periodograma	
	Límite de Andersen (meses)	Aleatoriedad en meses	Respuesta periódica	Banda espectral frecuencia	Tiempo de regulación (meses)
P9A	15	21	Estacional	0.14	7
P108A	5	9	No estacional	>0.50	<2
P202	15	19	No estacional	0.27	3.6
P109	14	27	Estacional	0.43	2.3
P1012	8	11	No estacional	0.36	2.8
P1013	11	13	No estacional	0.23	4.3

Del análisis conjunto y comparativo de los resultados presentados y siguiendo la clasificación sugerida por Molerio y Portuondo (1997), se identifican cuatro tipos de sistema de flujos en el acuífero cársico del tramo hidrogeológico MI-5 (tabla 11). Comparando este análisis con la

zonificación del tramo hidrogeológico estudiado, realizada por Chong Li y Campos (1996), se puede identificar que la zona de los Manantiales Bello tiene un tipo de flujo inercial con alto efecto de memoria; la zona Ceiba Mocha la representa un flujo inercial con efecto de memoria medio y La Julia es de tipo no inercial con bajo efecto de memoria.

TABLA 11. Tipos de sistema de flujos en el acuífero cársico del tramo hidrogeológico MI-5 a partir del análisis espectral

Tipo	Efecto de memoria	Banda espectral (BE)	Autorregulación	Respuesta estacional
Inercial	Alta	Muy estrecha $BE < 0.17$	Muy alta ≥ 7 meses	Estacional
	Media	Estrecha $0.18 \leq BE < 0.30$	Alta 4 – 6 meses	No estacional
No inercial	Baja	$0.30 \leq BE < 0.45$	Baja 2 – 4 meses	Estacional
	Nula	$0.46 \leq BE$	Muy baja < 2 meses	No estacional

CONCLUSIONES

La aplicación de técnicas estadísticas simples permitió determinar los datos dudosos en cada uno de los casos de estudio. Mediante el análisis de asociación se determinaron las ecuaciones de regresión para el cálculo de valores faltantes de cada serie a partir de su dependencia con el resto que conforma la red de monitoreo.

El análisis de tendencia mostró el comportamiento de los niveles de las aguas subterráneas en las diferentes áreas de estudio detectándose que las tendencias coinciden independientemente del tipo de acuífero y ubicación geográfica. Se detectó que en el período anterior 2003-2005 hubo un mal manejo del acuífero por no analizarse la tendencia de descenso la cual se ha repetido en el tiempo, registrándose niveles cercanos a los mínimos registrados en años anteriores tales como 1988, 1991 y 1993.

La interpretación de los autocorrelogramas y periodogramas permitió determinar las frecuencias óptimas de monitoreo para cada punto de observación. Estas frecuencias indican el periodo de programación para la recolección del dato, evitando perder información para su análisis y ahorro en el costo del monitoreo. Se pudieron identificar cuatro tipos de sistema de flujo en el acuífero cársico del tramo hidrogeológico MI-5, lo cual indica que la red de observación actual permite el conocimiento del sistema acuífero que representa.

Se considera que las técnicas estadísticas utilizadas, junto a otras que pueden añadirse, pueden ser aplicadas en las bases de datos de otros tramos, sectores o cuencas hidrogeológicas y generalizadas como herramientas de manejo de los niveles de las aguas subterráneas, así como servir de información básica para la selección del período de calibración en la modelación matemática.

REFERENCIAS

- Chong Li, A. y Campos M. J.** (1996). “Esquema regional precisado de aprovechamiento integral de los recursos hídricos y agrarios de las provincias Matanzas, Habana y Ciego de Ávila. Tomo Hidrogeología: recursos de las aguas subterráneas. Segunda versión. Provincia de Matanzas”. Código de archivo: G-351. Empresa Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, INRH, Colón. Matanzas, Cuba.
- Cuéllar, A.; Del Rosario, K.; Petrova V. y Acosta D.** (2011). “Evaluación del estado actual de la cuenca M-I”. Informe Técnico 077-08-02C-11. Empresa Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, INRH, Colón. Matanzas, Cuba.
- Del Rosario, K. y Petrova V.** (2011). “Estudio hidrológico de la formación y comportamiento del escurrimiento superficial de la cuenca San Agustín – Cañas – San Juan”. Informe Técnico 077-08-02C-11. Anexo 1. Empresa Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, INRH, Colón. Matanzas, Cuba.
- Guneva S.** (1967). “Estudio hidrogeológico de la cuenca Cañas-Manantiales Bello. Provincia Matanzas”. Código de archivo: G-2. Empresa Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, INRH, Colón, Matanzas, Cuba.
- Molerio, L. F.** (1992). “Técnicas estadísticas y de la teoría de la información en el diseño y control de las redes de monitoreo de las aguas subterráneas en el carso”. 1er. Taller Iberoamericano de Informática y Geociencias, Academia de Ciencias, La Habana, Cuba.
- Molerio, L. F. y Portuondo, Y. Y.** (1997). “Técnicas geomatemáticas aplicadas a la hidrogeología”. Notas de clase, CENHICA, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Circulación restringida 69. La Habana, Cuba.
- Molerio, L. F. y Torres, J. C.** (2002) “Métodos geomatemáticos de diseño y optimización de redes de monitoreo de aguas subterráneas”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXIII, No. 2, pp. 38 – 45. Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana, Cuba.
- Pupo, J.; González, E.; Neninger, D. y Gómez, R.** (2004). “Análisis de regresión y series cronológicas”. Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba.
- Shahin, M., Van Oorschot, H. J. L. and De Lange, S. J.** (1993). “Statistical Analysis in Water Resources Engineering”. Ed. A.A. Balkeman, Rotterdam, The Netherlands.
- Zhou, Y.** (1995). “Hydrogeoestatistic”. Lectures notes, HH327/96/1. International Institute for Hydraulic Engineering, Delft, The Netherlands.