

RIESGO Y PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE CAUDALES DE EXLOTACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA. APLICACIÓN AL ACUÍFERO DE SANTIAGO

GABRIELA STEINBRÜGGE, JOSÉ F. MUÑOZ Y BONIFACIO FERNÁNDEZ

Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Universidad Católica de Chile.

Av. Vicuña Mackenna 4860. Casilla 306 Correo 22, Santiago, Chile.

Teléfono: (56 2) 686 4227; Fax: (56 2) 686 5876

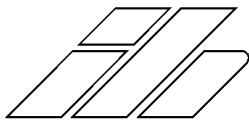
e-mail: gsteinbr@puc.cl

RESUMEN

La capacidad de los acuíferos es finita y su sobreexplotación puede tener consecuencias negativas para el medioambiente, por lo que se hace necesario contar con herramientas que permitan realizar una administración adecuada de los recursos. Para gestionar las aguas subterráneas se debe considerar la incertidumbre de los fenómenos hidrometeorológicos que afectan a la recarga del acuífero. Para ello, los modelos hidrogeológicos simulan su funcionamiento y entregan una gran cantidad de información. Su interpretación requiere de herramientas de apoyo que faciliten la comprensión del problema. En este estudio se presenta una metodología para analizar estadísticamente la respuesta de los acuíferos frente a diferentes modalidades de operación, estimar el riesgo asociado a las fallas en los sistemas de extracción, los caudales disponibles en cada una de las fuentes para diferentes probabilidades de excedencia y de este modo, establecer la seguridad del abastecimiento del acuífero en base a los resultados que entrega un modelo Modflow. Los procedimientos de análisis fueron aplicados al caso particular del acuífero de Santiago, que actualmente cuenta con una fuerte demanda y con muchos interesados en conseguir derechos para explotar los recursos.

ABSTRACT

The aquifer capacity is finite and its overexploitation may have negative consequences on the environment. It is necessary to carry out an appropriate administration of the resources. For groundwater management should be considered the uncertainty of the hydrometeorological phenomena that affects the recharge of the aquifers. Hydrogeologic models of aquifers simulate these phenomena, giving great amount of information. To be able to understand and take advantage of it, support tools are necessary to take proper decisions. This study presents a methodology to analyze the answers of the aquifers statistically in different operation modalities, determine the risk associated to the failures in the extraction systems, the available extraction flow in each one of the sources for different exceedance probabilities and the certainty of the supply for any aquifer simulated by using a Modflow model. The analysis procedures were applied to the particular case of Santiago's aquifer which faces a strong demand with many actors interested in getting the right to exploit the resources.



ANÁLISIS EN SERIES DE TIEMPO DE LAS NAPAS SUBTERRÁNEAS Y ESTUDIO DEL CASO PARTICULAR DEL ACUÍFERO DE SANTIAGO

1 Introducción

Es usual que se considere el agua subterránea como un recurso ilimitado que siempre es posible de extraer sin restricciones. Sin embargo, la capacidad de los acuíferos es finita, y la sobreexplotación puede causar un descenso incontrolado de los niveles de la napa freática. Es inminente el aumento de problemas de este tipo como consecuencia del explosivo incremento de la demanda por agua subterránea.

La gestión de las aguas subterráneas es una tarea compleja dada la gran cantidad de variables sujetas a incertidumbre que influyen en el sistema, tales como los fenómenos climáticos y la respuesta del acuífero frente a las diferentes políticas de extracción.

Cada usuario individual de un acuífero administra sus pozos de bombeo de acuerdo a sus intereses personales, a sus propias capacidades instaladas y a los derechos que tienen asignados en cada uno de ellos. Una gestión sustentable del agua subterránea, debe apuntar hacia el uso racional de los recursos, incorporando intereses sociales, económicos y ambientales y debe buscar maximizar el volumen total de agua bombeada, minimizar las probabilidades de falla del sistema y garantizar la sustentabilidad del recurso a mediano y largo plazo.

Hoy en día, la administración bajo incertidumbre de las aguas subterráneas es una tarea que en Chile carece de herramientas de apoyo que faciliten la comprensión del problema y la toma de decisiones.

Para enfrentar estas dificultades se emplean modelos hidrogeológicos de los acuíferos, que simulan el comportamiento de la napa a lo largo del tiempo con sus sistemas de bombeo y entregan un importante volumen de resultados. Para poder interpretar estadísticamente los resultados de los modelos es necesario realizar múltiples y lentos procedimientos de análisis, los cuales no se encuentran al alcance de un usuario común.

La necesidad de contar con una herramienta de análisis estadístico que facilite la interpretación de dichos resultados motivó el desarrollo de este estudio, cuyo principal objetivo es analizar los efectos de la variación en las políticas de extracción de agua subterránea sobre un acuífero. La herramienta desarrollada para este efecto, permite determinar, fácilmente y con cierto grado de seguridad, el riesgo asociado a las fallas en los sistemas de extracción, los caudales disponibles en cada una de las fuentes para diferentes probabilidades de excedencia y de este modo, la seguridad del abastecimiento para cualquier acuífero que se encuentre previamente modelado.

Los procedimientos de análisis estadístico fueron aplicados al caso particular del acuífero de Santiago. Dicha zona resulta atractiva, ya que actualmente cuenta con una fuerte demanda y además existe una gran cantidad de usuarios interesados en explotar los recursos, quienes comienzan a visualizar la existencia de riesgos de falla frente a distintos escenarios de explotación.



2 Análisis Estadístico de los Niveles

Los modelos hidrogeológicos de los acuíferos, tales como el Modflow (McDonald & Harbaugh, 1988), constituyen una poderosa herramienta de simulación, que permite conocer la respuesta de las napas subterráneas a lo largo del tiempo frente a diversas sollicitaciones de recarga y descarga. Sin embargo, para aprovechar los resultados que ellos arrojan, es necesario realizar un análisis complementario que permita responder cuáles son los riesgos asociados a las fallas en los sistemas de extracción, cuáles son los caudales disponibles en cada una de las fuentes para diferentes probabilidades de excedencia y por ende, cuál es la seguridad del abastecimiento.

Las series de niveles de la napa generadas con los modelos para cada pozo de explotación están condicionadas a la política de extracción con que se haya simulado, de manera que si ella cambia los resultados del análisis estadístico se verán afectados. Se trata por lo tanto de probabilidades condicionadas a la política de extracción supuesta. (Dictuc S.A., 1999)

La aleatoriedad del comportamiento del sistema está dada por los efectos hidrometeorológicos que afectan a la recarga del acuífero. Para incorporar dicha incertidumbre al análisis, se generan series mensuales, representativas de la recarga, de una duración mínima de 30 años, que reflejen razonablemente condiciones de abundancia y escasez en la zona.

Los modelos entregan las series de niveles de la napa para los esquemas de explotación supuestos, los que constituyen los datos de entrada para el análisis estadístico.

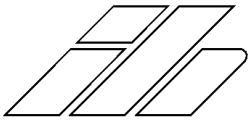
Como habitualmente no se requiere extrapolar valores con periodos de retorno mucho más allá de los observados en las muestras disponibles, el análisis apunta a ajustar un modelo probabilístico a una muestra y estimar sus parámetros con un alto grado de confianza. Las situaciones críticas en el problema de la administración de los acuíferos están centradas en los valores mínimos, es decir, valores de alta probabilidad de excedencia. En el límite, los niveles de la napa pueden llegar a ser valores cercanos a cero pero nunca negativos. Para asegurar la inexistencia de valores menores que cero, se trabaja directamente con los logaritmos de los niveles. (Dictuc S.A., 1999)

El procedimiento seguido para seleccionar los modelos de distribución de probabilidades de los niveles mensuales corresponde al descrito por el US Water Resources Council (1982) y por WMO (1989).

El primer paso del análisis es la eliminación de los valores anómalos de las series, que corresponden a aquellos datos cuya probabilidad de encontrarlos en una muestra del tamaño de la disponible es muy baja, por lo que altera los parámetros de la estadística.

Posteriormente se ajustan tres modelos alternativos a los logaritmos de los niveles mensuales; Log Pearson, Log Normal y Log Gumbel. Una vez ajustados los modelos se aplica un test de bondad de ajuste, seleccionando aquel que posee una mayor correlación con la serie empírica de niveles. Finalmente, usando el mejor modelo, es posible estimar los valores de los niveles para las diferentes probabilidades de excedencia que se deseen analizar.

Se define la probabilidad de falla de un pozo como la probabilidad de que el nivel de la napa esté bajo el nivel operativo. Dicha probabilidad indica la confiabilidad del pozo; mientras menor sea este valor, más tiempo se encontrará operativo.



Utilizando los parámetros del modelo de distribución de probabilidades ajustada, es posible obtener la probabilidad de falla para cada pozo y en cada mes. Este cálculo permite apreciar la eficiencia del sistema de extracción de agua, bajo el esquema de explotación supuesto, dadas las condiciones hidrometeorológicas de recarga de la zona. Es decir, si los pozos estarán totalmente operativos o si presentarán deficiencias.

Así mismo, el análisis estadístico permite estimar mensualmente, la probabilidad de cualquier nivel de operación y en forma inversa, los niveles para diferentes probabilidades de excedencia.

3 Análisis Estadístico de Caudales de Explotación

Es interesante saber cuáles son los caudales explotables seguros, que mantienen los niveles de la napa siempre sobre el mínimo nivel operativo. Mediante el análisis de los niveles de la napa y sus probabilidades, es posible estimar algunas estadísticas de los caudales de operación de un conjunto cualquiera de pozos.

El valor esperado del caudal disponible para cada mes y en cada pozo, se estima a partir del valor del caudal extraído de acuerdo a una política de explotación específica, en conjunto con la probabilidad de que cada pozo esté totalmente operativo (Muñoz et al, 2003) como:

$$E(Q_{p,m}) = \sum_{p=1}^{p=N} Q_{p,m} P_{p,m} \quad \forall m=1, 2, \dots, 12 \quad (1)$$

donde:

$E(Q_{p,m})$ = caudal esperado en el mes m para el pozo p.

$Q_{p,m}$ = caudal extraído de acuerdo a una política de explotación, en el pozo p, durante el mes m.

$P_{p,m}$ = probabilidad de que en el mes m el pozo p se encuentre operativo.

N = cantidad de pozos incluidos en el modelo.

La probabilidad del pozo operativo se puede estimar a su vez de la probabilidad de falla como:

$$P_{p,m} = 1 - PF_{p,m} = 1 - P(Niv_{p,m} < Niv_p^{Min}) \quad (2)$$

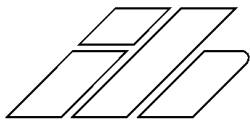
donde:

$PF_{p,m}$ = probabilidad de falla del pozo p, durante el mes m.

$Niv_{p,m}$ = nivel de la napa en el pozo p, durante el mes m.

Niv_p^{Min} = nivel mínimo de la napa en que en el pozo p permanece operativo.

Conocidos los niveles de operación mensuales en cada pozo, para diferentes probabilidades de excedencia, es posible calcular los caudales extraíbles para cada una de las respectivas probabilidades. Dicha variable es binaria y se estima de acuerdo al siguiente criterio:



$$\begin{aligned} Q_{p,m}^{Prob} &= Q_{p,m} & \text{si } Niv_{p,m}^{Prob} > Niv_p^{Op} \\ Q_{p,m}^{Prob} &= 0 & \text{e.o.c.} \end{aligned} \quad (3)$$

donde:

$Q_{p,m}^{Prob}$ = caudal extraíble en el pozo p, con probabilidad *Prob*, durante el mes m.

$Q_{p,m}$ = caudal extraído, considerado en el escenario de explotación, para el pozo p durante el mes m.

4 Herramienta de Análisis

Los modelos hidrogeológicos de los acuíferos permiten obtener series temporales de los niveles de la napa. Esta información es la base para realizar los análisis que permiten estimar los riesgos en el funcionamiento del sistema de bombeo o la seguridad en el abastecimiento. Dada la gran cantidad de pozos existentes se ha desarrollado un programa orientado especialmente al análisis estadístico de las series de niveles obtenidas a través del uso de Visual Modflow. El programa fue escrito en lenguaje Visual C++ y permite el manejo de gran cantidad de datos en poco tiempo. En él se resume todo el procedimiento de análisis estadístico de los niveles y caudales descrito anteriormente. Su uso no requiere de ningún tipo de manipulación de los archivos ya que está diseñado para leer directamente las salidas de Visual Modflow en su formato original. Los procedimientos han sido verificados con trabajos anteriores, los cuales han validado la eficiencia del programa.

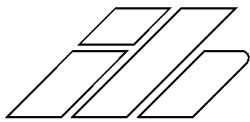
La herramienta entrega los siguientes resultados en un archivo de texto:

- Estadísticas básicas de las series de niveles mensuales, tales como promedio, varianza, desviación típica, asimetría y courtosis.
- Cantidad de pozos secos durante la simulación.
- Probabilidad de excedencia para los niveles especificados, como por ejemplo el nivel de falla.
- Nivel de operación para distintas probabilidades de excedencia.
- Caudales de operación con distintas probabilidades de excedencia.
- Niveles y caudales esperados para cada pozo.
- Caudal esperado para el conjunto de pozos del sistema completo.
- Calidad del ajuste estadístico a través del coeficiente de correlación.

5 Aplicación al Acuífero de Santiago

El acuífero de Santiago se ubica al este del valle de Santiago, con una superficie que alcanza los 150 Km². Formado principalmente por depósitos fluviales, de acuerdo a información obtenida del análisis de pruebas de bombeo, la permeabilidad promedio de los estratos aportantes varía entre 0,01 y 400 m/d.

La recarga del acuífero es estacional y se produce por la infiltración del río Mapocho y del río Maipo, de esteros y quebradas adyacentes, lateralmente desde cuencas que drenan directamente hacia el acuífero y principalmente por infiltración de riego y pérdidas en la red de agua potable.



En la zona de estudio existen alrededor de 2000 pozos. Los derechos de explotación asignados por la autoridad para las principales empresas sanitarias de la zona ascienden a los $11,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con el objeto de determinar la disponibilidad de aguas subterráneas en los pozos pertenecientes a un grupo de empresas, se analizó la respuesta del acuífero de Santiago frente a distintos escenarios de explotación. Para esto se utilizó el modelo hidrogeológico Modflow utilizado por la DGA(2000), correspondiente al sector Maipo-Mapocho, desarrollado por Ayala, Cabrera y Asociados Ltda.

La zona modelada corresponde al sector de interfluvio de los ríos Maipo y Mapocho, incluyendo los esteros Lampa y Colina por el norte y el río Angostura por el sur. El modelo posee un solo estrato en profundidad y 265 filas por 236 columnas en planta, con dimensiones de celda variables entre 100 y 620 m.

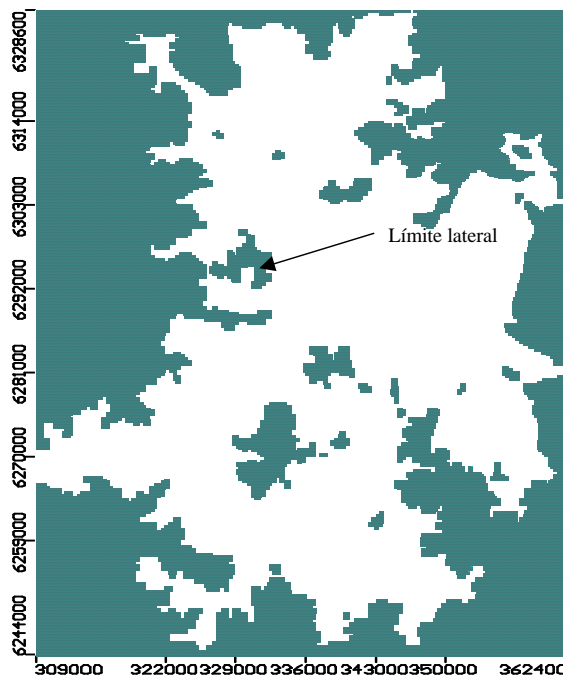


Figura 1: Geometría de la zona modelada para el acuífero de Santiago.

Las condiciones de borde del modelo de la DGA están constituidas por un borde impermeable lateral, borde impermeable de fondo, borde de nivel conocido, condición de dren y condición de río y utiliza una serie de recarga, de 48 años de duración, representativa de las condiciones hidrometeorológicas de la zona en estudio. Mediante el uso del modelo Modflow del acuífero, se analizó la probable respuesta del sistema frente a 3 políticas de extracción distintas, de un año de duración.

El modelo incluye 216 pozos pertenecientes a tres importantes empresas sanitarias de la región, además de otros 1720 pertenecientes a otros usuarios.

La primera política de extracción consideró, para los 102 pozos del grupo de empresas, caudales de bombeo iguales a los registrados en el año 2002. De acuerdo a la información proporcionada por la DGA, este equivale a un caudal total de explotación de $1,27 \text{ m}^3/\text{s}$ en promedio mensual. Para cada uno de los 1720 pozos externos, se



consideró una extracción constante, equivalente al total de los derechos otorgados, corregidos por un factor de uso definido por la DGA, lo cual suma un total de 21 m³/s.

Los caudales de extracción considerados para los pozos del grupo de empresas en la segunda política fueron los mismos que los de la primera política de explotación. Los pozos de terceros en cambio, se consideraron bajo un escenario de máxima explotación, equivalente al ejercicio total de los derechos otorgados, que alcanzan los 70 m³/s.

La tercera política de extracción representa la explotación máxima del acuífero. Se consideró un caudal de bombeo igual al derecho otorgado para cada uno de los pozos existentes en el acuífero, los pertenecientes al grupo de empresas sanitarias y los restantes de usuarios externos. Es decir, 81,7 m³/s distribuidos en 1936 pozos.

Cada una de las políticas de extracción se repite anualmente, 48 veces durante la modelación. De este modo, ellas son sometidas a los diferentes escenarios de recarga probables obteniéndose como resultado la respuesta física del acuífero.

Para cada pozo se conoce el nivel de operación mínimo al cual puede ser explotado. Esta información, en conjunto con las series de niveles arrojadas por el modelo, fue ingresada al programa de análisis estadístico, con lo que se pudo conocer la respuesta del sistema de bombeo y del acuífero frente a los distintos esquemas de explotación.

Durante la ejecución del modelo, ciertos pozos logran operar adecuadamente durante todo el periodo de análisis, mientras que otros se secan y sus niveles se deprimen hasta alcanzar la roca. En ese caso el modelo los suprime, de manera que las series se truncan y no registran valores a partir de esta circunstancia.

En la Figura 2 se resume el número de pozos que se secan y que se mantienen operativos, pertenecientes a cada una de las tres empresas sanitarias, al considerar las diferentes políticas de extracción.

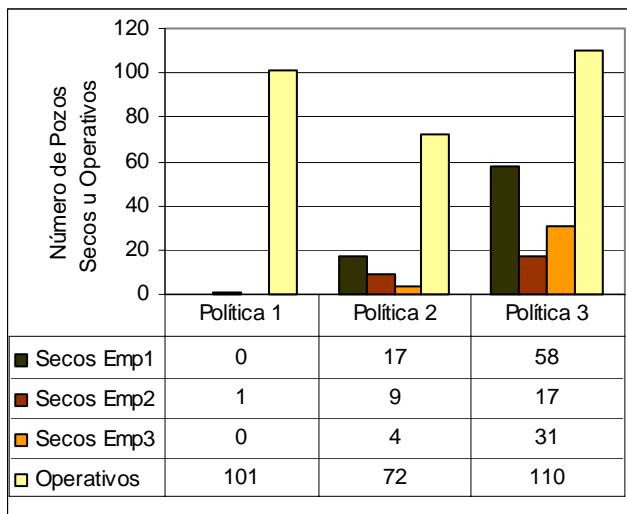
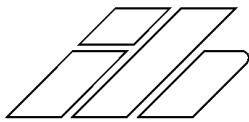


Figura 2: Comparación del número de pozos con probabilidad de secarse o de mantenerse operativo.



La primera política de extracción casi no presentó problemas de pozos secos. La segunda política hace que se seque un 29% de los pozos en estudio. Como era de esperarse, la última fue la que tuvo más problemas, llegando a secarse un 49% del total.

El programa de análisis estadístico entrega las probabilidades de falla para cada uno de los pozos en estudio en un mes cualquiera. Si dicha probabilidad es inferior al 2% se considera que la operatividad del pozo es muy segura y se clasifica como estable. Por el contrario, si la probabilidad de falla en un mes es mayor que el 10%, se habla de pozos cuya explotación es poco segura con el esquema planteado, ya que fallaría al menos una vez cada diez años en ese mes y se clasifica como débil. Las situaciones intermedias se clasifican como pozos medios en su funcionamiento. (Dictuc S.A., 1999) A continuación se presenta una tabla que sintetiza los resultados obtenidos.

Política 1

mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estables	90	90	90	89	90	90	89	90	89	88	88	90
Medios	1	1	1	2	1	1	2	1	2	3	3	1
Débiles	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>Total</i>	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101

Política 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estables	15	16	16	15	17	15	16	17	17	18	19	16
Medios	6	3	2	3	1	3	2	2	5	4	3	6
Débiles	51	53	54	54	54	54	54	53	50	50	50	50
<i>Total</i>	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72

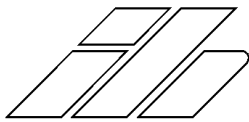
Política 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estables	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	5
Medios	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Débiles	104	105	105	105	105	105	105	105	104	104	103	104
<i>Total</i>	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110

Tabla 1: Conteo de pozos estables, medios o débiles como resultado las tres políticas de extracción.

Se observa que para la política 1, la gran mayoría de los pozos se comportan de manera confiable ya que sus probabilidades de fallar son menores al 2%, y en muchos casos no se les detectó ningún mes con niveles inferiores a su nivel de caída. Por el contrario, más del 70% y 95% de los pozos, en las políticas dos y tres respectivamente, presentan algún tipo de falla con probabilidades significativas.

Finalmente, interesa conocer cuáles son los caudales disponibles efectivamente en el sistema de extracción. En la Tabla 2 se resume esta información para diferentes probabilidades de excedencia y además, se presentan los caudales esperados totales para el conjunto de pozos en cada mes.



Política 1

Prob/mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q 98%	1.07	0.93	0.91	0.84	1.01	1.07	1.06	1.50	1.63	1.58	1.34	1.45
Q 90%	1.07	0.93	0.91	0.84	1.02	1.07	1.06	1.50	1.64	1.62	1.37	1.45
Q 50%	1.09	0.94	0.93	0.87	1.04	1.09	1.08	1.52	1.66	1.68	1.39	1.47
E(Q)	1.08	0.93	0.91	0.85	1.03	1.08	1.07	1.51	1.65	1.65	1.38	1.46

Política 2

Prob/mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q 98%	0.08	0.11	0.13	0.12	0.17	0.12	0.09	0.19	0.26	0.20	0.16	0.16
Q 90%	0.08	0.11	0.13	0.12	0.17	0.12	0.09	0.19	0.26	0.20	0.16	0.16
Q 50%	0.08	0.11	0.13	0.12	0.17	0.12	0.09	0.19	0.26	0.20	0.16	0.16
E(Q)	0.21	0.23	0.23	0.22	0.28	0.25	0.21	0.35	0.41	0.35	0.28	0.30

Política 3

Prob/mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q 98%	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.25	0.22
Q 90%	0.25	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.25	0.25	0.25	0.25
Q 50%	0.29	0.26	0.26	0.26	0.28	0.29	0.26	0.28	0.29	0.29	0.30	0.30
E(Q)	0.32	0.31	0.30	0.30	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31	0.32	0.32	0.32

Tabla 2: Caudales (m^3/seg) extraíbles mensualmente para diferentes probabilidades de excedencia y caudales esperados como resultado las diferentes políticas de extracción.

Como se observa en la tabla de caudales, la política 1 efectivamente logra bombear los $1,27 m^3/seg$ en promedio mensualmente. Sin embargo, al aplicar la segunda política, el caudal extraído efectivamente queda muy por debajo de la meta producto del aumento de los pozos secos y con fallas. Esta situación se hace crítica al aplicar la última política, ya que la máxima tasa de bombeo teórica es de $11,7 m^3/seg$, mientras que la máxima tasa efectiva alcanza apenas los $0,3 m^3/seg$, con un 50% de probabilidad. Cabe notar que la última política permite extraer un caudal total superior al de las dos primeras. Esto se debe exclusivamente a que se consideró un mayor número de pozos con bombeo. Mientras más alta es la probabilidad de excedencia, menor es el caudal que se puede asegurar. Sin embargo, en la Tabla 2 se observa que la variación de los caudales respecto de las probabilidades es mínima. Esto se debe a que son variables binarias, cuyo valor es nulo o bien, equivalente al caudal de extracción en ese pozo. En consecuencia, para que exista una diferencia en el caudal de extracción entre dos probabilidades, es necesario que los niveles de la napa asociados a ellas correspondan a diferentes estados de operatividad del pozo.

6 Conclusiones y Comentarios

El desarrollo de la herramienta de análisis estadístico ha favorecido la estandarización de los procesos de análisis, de manera que siempre sean realizados bajo los mismos supuestos y consideraciones. La automatización de los procedimientos matemáticos ha entregado mayor confiabilidad a los resultados, puesto que se eliminan los posibles errores de cálculo producidos al estimar manualmente los parámetros y probabilidades de cada uno de los pozos, en los diferentes periodos de tiempo. El uso del programa de análisis, permite estudiar varias políticas de explotación de recursos, ya que el problema ha dejado de ser el tiempo de análisis y las limitantes se han trasladado al tiempo de ejecución de los modelos.



Como ejemplo de aplicación, se utilizó un modelo hidrogeológico, que describe el funcionamiento del acuífero de Santiago frente a diferentes escenarios de recarga y descarga, en combinación con la herramienta de análisis estadístico. De este modo, se determinó la disponibilidad de agua subterránea en los pozos. La respuesta del acuífero de Santiago, ha puesto en evidencia que no es posible extraer en forma sustentable en el largo plazo todos los derechos disponibles ya que los niveles tienden a bajar hasta secar definitivamente los pozos. El funcionamiento del acuífero no permite explotar el total de los derechos subterráneos otorgados y por lo tanto, dichos derechos no constituyen un caudal de abastecimiento seguro.

Una de las futuras aplicaciones del programa de análisis es el cálculo de la capacidad máxima extraíble de los acuíferos, sustentable en el tiempo. También se empleará en el perfeccionamiento de las políticas de extracción, orientadas hacia una optimización de los recursos. Se pretende desarrollar un proceso de optimización de las instalaciones de bombeo, que apunte a maximizar el caudal extraído, sujeto a las restricciones de capacidad instalada y de preservación del medio ambiente. El programa será utilizado en el reconocimiento de las factibilidades y en el control de la eficiencia de las estructuras de explotación óptimas encontradas.

7 Referencias

. DGA. Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas del Río Maipo y Mapocho. Realizado por AYALA Y CABRERA CONSULTORES LTDA para la Dirección General de Aguas, MOP. 2000.

DICTUC S.A. Estudio hidrológico de fuentes superficiales y subterráneas de Aguas Cordillera S.A. Santiago, Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Hidráulica y Ambiental, Octubre 1999.

McDONALD, M.G. and A.W. HARBAUGH. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. *Techniques of water resources investigations 06-A1*, USGS 1988.

J. F. Muñoz, B.Fernández y C. Escauriaza. Evaluation of Groundwater Availability and Sustainable Extraction Rate for the Upper Santiago Valley Aquifer, Chile. Aceptado para publicar en *Hydrogeology Journal*, 2003

US DEPARTMENT OF THE INTERIOR GEOLOGICAL SURVEY. Guidelines for determining Flood flow frequency. *Bulletin # 17B*, Interagency Advisory Committee on Water Data, March 1982.

WORDL METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Statistical distributions for flood frequency analysis, *Operational Hydrology Report 33*, Geneva, Switzerland 1989.