

Recibido: 25 / 11 / 2007, aceptado en versión final: 19 / 12 / 2007

Modelo de simulación de flujo estacionario del sistema hidrogeológico Ticlio

SIMULATION MODEL OF STATIONARY FLOW OF SYSTEM TICLIO HYDROGEOLOGICAL

Magally Acuña Azarte*

RESUMEN

En el presente trabajo se ha elaborado el modelo de simulación de flujo del agua subterránea en régimen estacionario en el ámbito de la Unidad minera Ticlio sobre 300 hectáreas de superficie y 4814 metros de altitud.

Geológicamente la unidad está constituida por acuíferos cársticos y acuitardos fisurados y clásticos, los cuales almacenan y conducen agua. La principal fuente de recarga de los acuíferos son las precipitaciones que ocurren durante los periodos lluviosos y los deshielos de los glaciares, los cuales se almacenan en las lagunas San Nicolás y Santa Catalina, constituyéndose estos en las fuentes de recarga de los acuíferos mencionados durante los periodos de estiaje.

La conductividad hidráulica y la transmisividad hidráulica estimadas analíticamente son 0.068 m/d y 6.48 m²/d respectivamente, valores que deberán ser corroborados mediante pruebas hidráulicas a ser efectuadas en pozos o piezómetros. El balance obtenido con el modelo de simulación de acuífero se conoce que el caudal de drenaje es 31.78 l/s valor muy cercano al caudal observado (30.20 l/s).

Palabras clave: Ticlio, acuífero, modelo.

ABSTRACT

In this paper has been developed the simulation model of groundwater flow in stationary regime in the area Ticlio mining unit has about 300 has surface and 4814 m.

Geologically this unity formed by the karst aquifer and fissured and clásticos aquitards, which stored water and lead. The main source of aquifer recharge rainfall are occurring during rainy periods and the thawing of glaciers, which are stored in the lakes San Nicolas and Santa Catalina, constituting in these sources of aquifer recharge mentioned during the periods of drought.

The hydraulic conductivity and hydraulic transmissivity are estimated in 0.068 m/d y 6.48 m²/d respectively, values that must be corroborated by testing water wells to be made or piezometers. The results obtained with the simulation model aquifer known that the flow of drainage is 31.78 l/s value very close to flow observed (30.2 l/s).

Keywords: Ticlio, aquifer, model.

* Máster Internacional Aprovechamiento Sostenibles de los Recursos Minerales-RED DESIR. E-mail: mallyta_04@yahoo.es

I. INTRODUCCIÓN

La minería juega un rol importante en el desarrollo económico del país y de las comunidades campesinas aledañas a las zonas de explotación. Asimismo, la minería utiliza una gran cantidad de agua subterránea y superficial que, con un adecuado aprovechamiento sostenible de los recursos minerales, puede ayudar a evitar la sobreexplotación de acuíferos y mitigar la contaminación al ambiente causadas por drenaje ácido en el interior de la mina, canchas de desmonte y de relaves, entre otros.

Por tal razón, la presente investigación consiste en estimar el caudal de drenaje del sistema hidrogeológico Ticlio; generada por la construcción de túneles de exploración de la compañía minera Volcán S.A. y proponer medidas de control sobre las reservas de aguas subterráneas y superficiales de las lagunas San Nicolás y Santa Catalina que se encuentran aledañas a la zona de exploración.

II. GENERALIDADES

Ubicación geográfica

El área de estudio se localiza entre la divisoria de las cuencas del Rímac y el Mantaro, entre las coordenadas UTM N-8716000- 8717500 y E-370500-372500.

Políticamente, el área de estudio se ubica entre los distritos de Chicla (provincia de Huarochirí, departamento de Lima) y Morococha (provincia de Yauli, departamento de Junín) respectivamente, a una altitud promedio de 4800 msnm.

Precipitación

Las mayores precipitaciones a nivel regional son frecuentes y duraderas, ocurren principalmente durante 4 a 5 meses del año en forma de lluvias, granizo o nevadas y se acentúan entre febrero y marzo. El período en el que, generalmente, no ocurren precipitaciones es en invierno, entre junio y agosto.

En la zona de estudio, la precipitación local fue estimada en función de la altura media de la microcuenca, a partir de la regionalización de los registros de las estaciones meteorológicas Marcapomacocha, Casapalca, Morococha, Yauli y Pomacocha que son las más cercanas y por contar con una data histórica desde el año 1957. En la Tabla N.º 1 se muestra las precipitaciones medias estimadas para la altura media de las microcuencas San Nicolás, Marmolejo, Galera y Santa Catalina.

Temperatura

Las temperaturas tienen pequeñas variaciones de estación en estación, con pronunciados cambios durante el día y la noche; sin embargo, en invierno (junio a setiembre) las variaciones diarias son bastante extremas. La temperatura anual promedio se estima que está entre 1.6 y 3.4 °C.

Las temperaturas máximas no varían mucho durante el año, manteniendo un rango de 8 y 9 °C y las temperaturas mínimas tienen un promedio anual de -6.9 °C.

Humedad

La humedad relativa promedio mensual fluctúa entre 80% a 90%, registrándose los mayores valores en los meses de enero, febrero y marzo y los menores valores en el mes de agosto.

Unidades hidrogeológicas

La mayor parte de los afloramientos que se encuentran en la zona son rocas intrusivas correspondientes a la diorita anticóna, además de dacitas y un poco de andesitas.

Ocasionalmente, hay intrusivos más recientes de cuarzo monzonitas, correspondientes al cuerpo mineralizante del yacimiento.

Este tipo de rocas, en general, tienen cierta permeabilidad superficial otorgada por fracturas, de acuerdo al grado de tectonismo y meteorización sufrida.

Tabla N.º 1. Precipitaciones para la zona de Ticlio

MICROCUENCA	Altura Media (m.s.n.m.)										PRECIPITACIÓN TOTAL (mm)															
											Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Annual			
Cuenca del río Rímac																										
San Nicolás	4,851	138.6	156.2	154	69.4	26.2	15	11.1	21	50.6	82.4	79.8	117.3	9,21.6												
Cuenca del río Mantaro																										
Santa Catalina	4,915	141.5	159.4	157.2	70.8	26.8	15.3	11.3	21.5	51.6	84.1	81.5	119.7	9,40.9												

Fuente: Estudio Hidrogeológico del Ámbito de la UEA Ticlio.

El origen de las aguas subterráneas en el área de la UEA Ticlio son, en su mayoría, producto de la percolación de las aguas meteóricas al subsuelo a través de los depósitos fluvio-glaciares, las cuales se almacenan en áreas permeables del suelo y de las rocas.

Características de los acuíferos

Según el Estudio Hidrogeológico del Ámbito de la UEA Ticlio (2007), menciona que la mayor parte de las aguas subterráneas parecen ser de circulación corta y subsuperficial, las cuales descargan en forma de manantiales de bajo caudal, humedales, o bofedales. Asimismo en el área de la UEA, hay tres tipos de acuíferos: los superficiales (localizados en fluvio-glaciares), los acuitardos (localizados en rocas intrusivas fracturadas) y los acuíferos cársticos (localizados en rocas calcáreas).

Tipos de acuíferos

Los acuíferos evaluados en Ticlio presentan características heterogéneas en función de su litología y tectónica, por lo que se pueden clasificar en función de su productividad y su comportamiento hidráulico (ver tabla 2).

Acuitardos

A las rocas ígneas aflorantes de Ticlio, se califican como acuitardos, debido a su escasa permeabilidad, restringida a las zonas de fracturamiento que pueden almacenar y/o transmitir agua subterránea en forma limitada debido a que no se hallan muy abiertas ya que la alteración de sus minerales sella diaclasas y fracturas. Por esta razón, estas rocas descargan agua en forma de flujo diseminado formando bofedales de ladera. Estas fuentes son de bajo caudal y relativamente son de régimen permanente.

Acuíferos cársticos

Los acuíferos cársticos son los más importantes en la zona; sin embargo, debido a que no presentan

descarga de aguas subterráneas en superficie pero sí en profundidad, se presentan en la parte más alta de la zona. Al parecer, esta unidad acuífera es la responsable de la descarga de aguas subterráneas en el frente de perforación de la rampa Ticlio, la que se acerca al cuerpo Ariana.

Acuífugos

Otra de las unidades hidrogeológicas clasificadas, son los acuífugos, compuestos por lutitas y arcillitas rojas de la formación Casapalca. Estas unidades de roca no son productores de agua y, por el contrario, actúan como estratos impermeables que controlan el flujo de las aguas subterráneas, impermeabilizando el lado sureste de la zona y favoreciendo la descarga hacia la cuenca del río Mantaro.

Geometría del acuífero

La geometría del acuífero se halla dispuesta en estratos con rumbo N 15° W a S 20° E a lo largo de la cumbre, con buzamiento casi vertical y muy plegado, la capa presenta un espesor aproximado de 200 m, la que se encuentra casi vertical con ligero plegamiento al NNE en profundidad. Los intrusivos de diorita Anticonca, que se encuentran rodeando a las calizas, se han calificado como “acuitardos” ya que su transmisividad es baja no habiendo registrado descargas importantes, salvo en algunos sectores como la laguna Santa Catalina donde la roca es más estable químicamente y presenta mayor intensidad de fracturamiento.

Este tipo de rocas de medios fisurados, tienen un funcionamiento de “bloques estructurales”, donde el flujo y la dinámica de las aguas subterráneas están controlados por fallas y fracturas.

El acuífero en esta zona se comporta como un acuífero libre; en los flancos más bajos, hacia la zona de Huacrachocha y en la zona de las lagunas, el acuífero se confina progresivamente por efecto de los depósitos fluvio-glaciares.

Tabla N.º 2. Unidades hidrogeológicas identificadas

UNIDADES	ACUÍFERO	ZONAS	TIPO DE ROCA	SUPERFICIE (Ha)	CAUDAL (L/s)
Acuífero	Cárstico	Ticlio San Nicolás	Calizas Terciario	72.6	41.95
Acuitardo	No consolidado	Laderas y pisos de valle	Morrenas y fluvio-glaciares	665.0	8.55
Acuitardo	Fisurados	Chanchará	Diorita, cuarzo monzonita	273.7	16.54
Acuífugos	Sedimentario	Huallhuay Huanta Punco	Lutitas y limolitas	18.7	0.0
Total				1,030.0	67.04

Fuente: Estudio Hidrogeológico del Ámbito de la UEA Ticlio.

III. RECARGA DEL ACUÍFERO

En general, la recarga de los acuíferos proviene de las precipitaciones y de la percolación superficial de algunos acuitardos, además del deshielo de las escasas nevadas que ocurren durante la temporada de lluvias.

El acuífero cárstico Jumasha tiene sus áreas de recarga en los alrededores de las lagunas de Ticlio (San Nicolás, Leoncocha Baja y Leoncocha Alta). Es en estas zonas que convendría observar y determinar el grado de infiltración, en base a pruebas de infiltración y permeabilidad.

Otros mecanismos que contribuyen en la recarga del acuífero a profundidad, son las percolaciones que ocurren a través de los tajos, chimeneas y labores mineras antiguas.

Estas zonas tienen un aporte significativo de agua, lo cual debería controlarse a fin de reducir la recarga del acuífero, especialmente cuando el nivel de las aguas de las lagunas sube hasta rebosar.

IV. BALANCE DE AGUA

Un análisis del balance de agua del área de estudio, proporciona la información útil sobre el flujo y recarga del agua subterránea que circula en el sistema. El balance de agua ha sido elaborado en base a los aforos y datos hidroquímicos obtenidos durante la fase de campo, además de los mapas y caudales generados a partir de los datos de las estaciones meteorológicas vecinas. Para el balance se ha tomado en cuenta la siguiente fórmula:

$$RETEVP++=$$

- Donde: P = Precipitación media anual
- EV = Evaporación real estimada
- ET = Evapotranspiración (solo para bofedales, casi no hay vegetación)
- R = Escorrentía ó flujo superficial y recarga de agua subterránea

Para determinar el equilibrio del agua, se han utilizado los datos de precipitación anual (P) de las estaciones meteorológicas Marcapomacocha, Pomacocha, Morococha, Yauli, Casapalca.

La precipitación calculada para la microcuenca Ticlio es de 1094 mm/año y la descarga promedio para la subcuenca Huacracocha es de 36.8 l/s (microcuencas Marmolejo, Galera y Santa Catalina).

Del mismo modo, para la microcuenca San Nicolás se ha calculado una precipitación de 1099 mm/año y para la microcuenca San Nicolás se ha calculado una descarga promedio de 10.7 l/s.

Para el cálculo de la evaporación real (EV) se ha usado la fórmula de Turc y asume que la única agua disponible para la evaporación es generada por la precipitación. Esta fórmula es la siguiente:

$$5.022/9.0/(LPPEV+=$$

$$\text{Donde: } L = 300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3$$

P : Precipitación media anual (mm)

T : Temperatura media anual (°C)

La temperatura analizada se basó la información de la estación Pomococha del periodo 1957-2006 que equivale a 2.1°C.

Asimismo, usando la fórmula de Turc, la evaporación real para la zona de Ticlio (Huacracocha y San Nicolás) fue estimada en 338.2 mm/año, equivalente al 30.6 % de la precipitación anual media y a un caudal de 90 l/s (324 m /hr).

En consecuencia, la evapotranspiración real (ET), que representa las pérdidas debido al consumo de la vegetación especialmente en la zona de los bofedales, fue calculada por el método de Thornthwaite, en 517.7 mm/año.

La recarga del agua subterránea fue establecida en 47.5 l/s en base a los datos de bombeo del interior de la mina, además de los datos de escorrentía superficial, establecidos mediante aforos y generación de caudales. Esto representa la cantidad total de

Tabla 3: Balance anual del agua subterránea en Ticlio

COMPONENTES	LÁMINA (mm/año)	CAUDAL (l/s)	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (%)
Precipitación (P)	1,099	294.0	100
Evaporación (EV)	338.2(1)	90.0	30.6
Evapotranspiración (ET)	517.7(2)	63	21.4
Escorrentía (Q)	175.84	94.2	32.0
Infiltración aguas subterráneas	132.26	47.5	16.0

(1) Las pérdidas por evaporación son para el área sin cobertura vegetal y lagunas.

(2) Las pérdidas por evapotranspiración son para el área sin cobertura vegetal y lagunas.

Tabla N.º 4. Características de las lagunas San Nicolás y Santa Catalina

LAGUNA	ESTADO ACTUAL			ESTADO SUPUESTO		
	Altitud (msnm)	Profundidad (m)	Capacidad (m ³)	Altitud (msnm)	Profundidad (m)	Capacidad (m ³)
Cuenca del Río Rímac						
San Nicolás	4814.00	11.03	83 070	4819.00	16.06	226 690
Cuenca del Río Mantaro						
Santa Catalina	4833.60	11.12	158 600	4837.00	14.52	314 210

Fuente: Estudio Hidrogeológico del Ámbito de la UEA Ticlio

agua perdida del sistema a través del flujo del agua superficial y la recarga del agua subterránea por infiltración.

En la tabla 3 se muestra el balance de agua del sistema hidrogeológico Ticlio.

V. RESULTADOS

Nivel de agua en las lagunas

La carga hidráulica de la laguna San Nicolás es 4814 msnm y el de la laguna Santa Catalina es 4833.60 msnm existiendo una diferencia de 19.6 m. Asimismo las características de las lagunas San Nicolás y Santa Catalina se muestran en la tabla N.º 4.

Propiedades hidráulicas del acuífero

Dada la importancia de las propiedades de los acuíferos a fin de analizar la dinámica de las aguas subterráneas se ha recurrido a estimaciones distintas a las pruebas comunes de bombeo como primera aproximación, hasta que se efectúen las pruebas hidráulicas en los piezómetros proyectados.

Acorde con la morfología del agua subterránea, el comportamiento actual de las perforaciones inducen al acuífero comportarse de forma similar a un sumidero, consecuentemente muy similar a un flujo radial, cuya expresión para condiciones estacionarias podemos escribir como:

$$S' = rRTQs \ln 2'$$

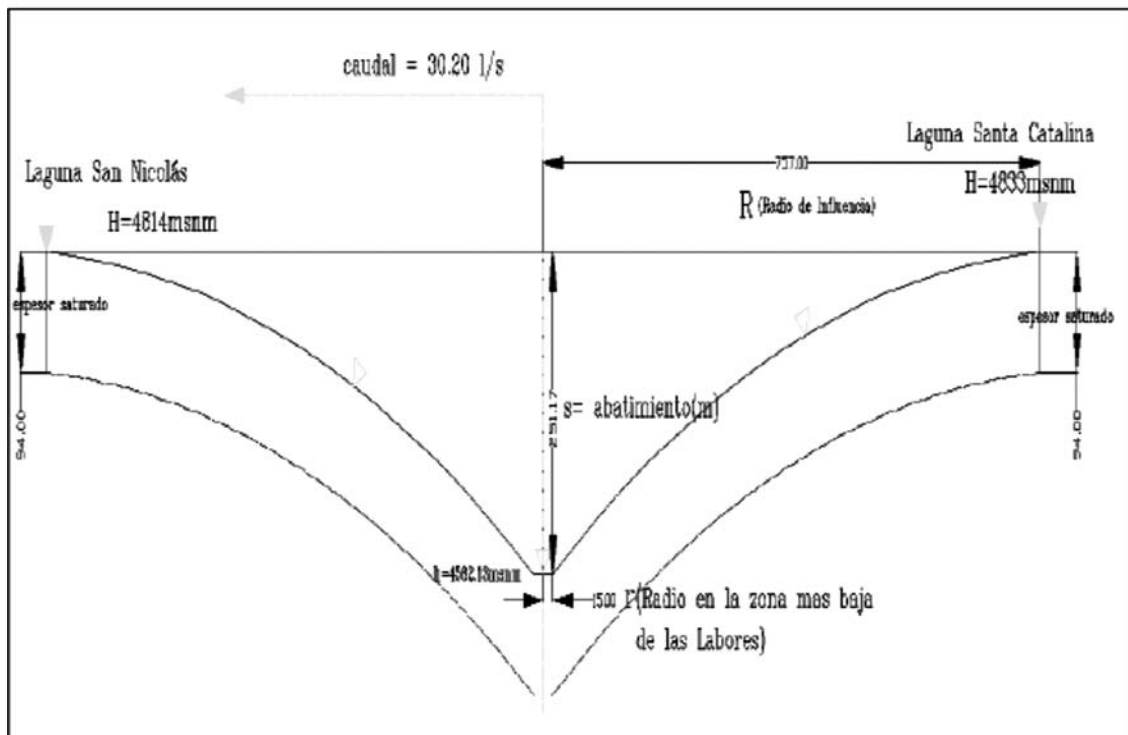


Figura N.º 1. Esquema del modelo conceptual.

Donde:

- s' : Abatimiento₃ corregido para acuíferos libres
- Q : Descarga (m³/d)
- T : Transmisividad (m²/d)
- R : Radio de influencia (m)
- r : Radio del cono de abatimiento mas bajo (m)

El abatimiento, s' , es la diferencia entre las carga hidráulica de la laguna Santa Catalina igual a 4833.60 msnm y la carga mas baja del cono de abatimiento igual a 4582.43 msnm, estimado en 251.17 m.

La descarga, Q , corresponde al caudal de bombeo desde las ₃ minas igual a 30.20 l/s equivalente a 2609.28 m³/d.

El radio de influencia, R , ha sido considerado la mitad de la distancia entre las lagunas Santa Catalina y San Nicolás, igual a 757 m.

Radio, r , en el cono de abatimiento más bajo, es igual a 15 m, aproximadamente en la isolínea 4582.43 msnm. El esquema conceptual antes expuesto se muestra en la figura 1.

Con los valores antes descritos, el valor de transmisividad estimado es 6.48 m²/d, considerando el espesor saturado de 94 m (por debajo del nivel freático), se ha estimado en 0.068 m/d la conductividad hidráulica.

No se han determinado los rendimientos específicos del acuífero cárstico y del fisurado; sin embargo, a partir de pruebas realizadas en formaciones similares a las del proyecto, se conocen que los rendimientos específicos varían de 0.16 a 0.18, mientras que en las formaciones fisuradas, el rendimiento específico promedio es 0.01. Estos valores podrán ser estimados con mayor precisión con los resultados de las pruebas hidrodinámicas a ser realizados en los piezómetros proyectados.

Estructuración del modelo matemático

La discretización del sistema acuífero en diferencias finitas, se ha realizado empleando mallas cuadradas

$\Delta x = 20$ m y $\Delta y = 20$ m, habiéndose inicializado la discretización del sistema con 75 filas y 100 columnas, haciendo un total de 7500 mallas, cubriendo una superficie estimada en 300 ha.

El tamaño de las mallas está destinado a analizar problemas de zonas con altas concentraciones de pozos de bombeo, zonas de napa freática alta, zonas con sistema de drenaje (rampa Ticlio). El sistema ha sido inicializado con la siguiente información referida a sus coordenadas, basado en un archivo previamente elaborado denominado discretizacion.dxf.

El sistema de acuífero discretizado se muestra en la figura N.º 3.

Condiciones de frontera del modelo

Las condiciones de frontera del modelo fueron de tipo físico, tales como las lagunas San Nicolás y Santa Catalina a nivel constante, y la rampa Ticlio (4432.5 msnm) considerado como dren.

La figura N.º 4 muestra las lagunas, la ubicación de las lagunas y el dren (rampa Ticlio) en formato Visual Modflow.

Distribución espacial de las conductividades hidráulicas

Las conductividad hidráulica del acuífero cárstico es 30 m/d, acuitardo fisurado es 0.074 m/d y del acuitardo clástico 0.068m/d.

La figura N.º 5 muestra la distribución espacial de las conductividades hidráulicas del acuífero y sus respectivos valores.

Balance de agua

Los resultados del balance hídrico, obtenidos mediante el modelo de simulación en régimen estacionario, tienen las siguientes componentes:

IN: Recarga desde Lagunas = 2744.03 m³/día (recarga desde las lagunas hacia el medio fisurado)

Tabla N.º 5. Coordenadas UTM del sistema hidrogeológico

Descripción	Coordenadas UTM	
	Este (m)	Norte (m)
Display área (ventana de trabajo)	X1= 370500	Y1=8716000
	X2 =372500	Y2= 8717500
Model Origin (origen del modelo)	X= 370500	Y = 8716000
Angle (ángulo del mallado)	$\Theta = 0$	
Model Corners (vértices del modelo)	X1= 370500	Y1= 8716000
	X2 = 372500	Y2= 8715500

El sistema de acuífero discretizado se muestra en la figura N.º 3.

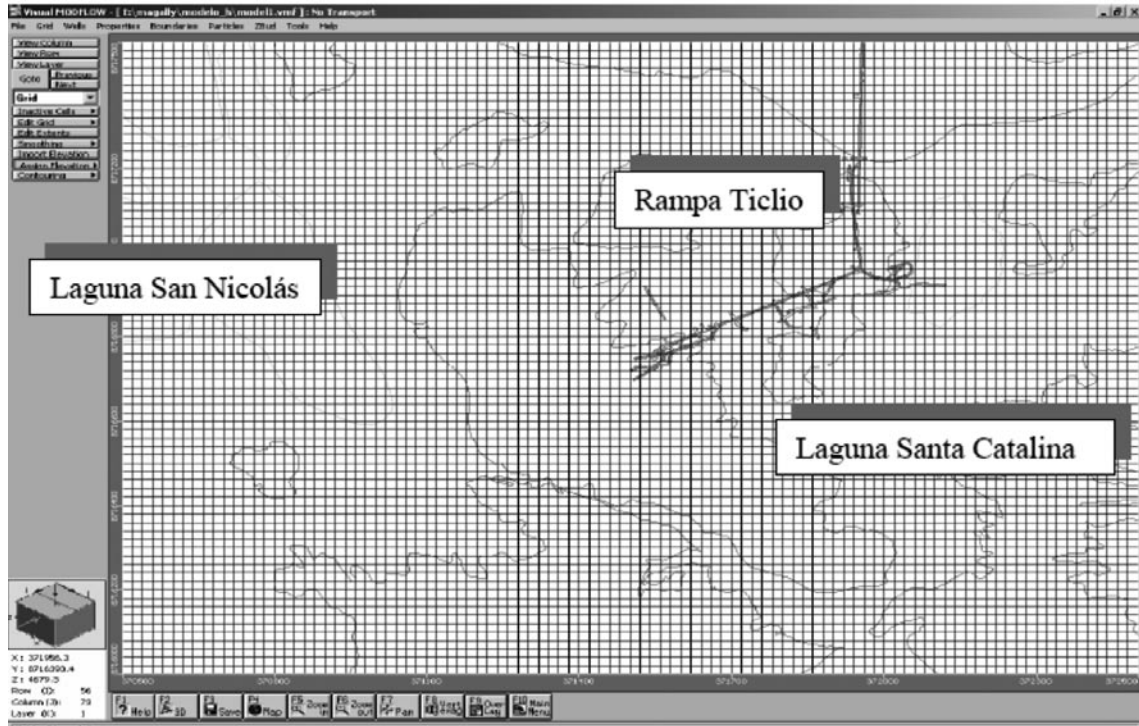


Figura N.º 3. Discretización del sistema.

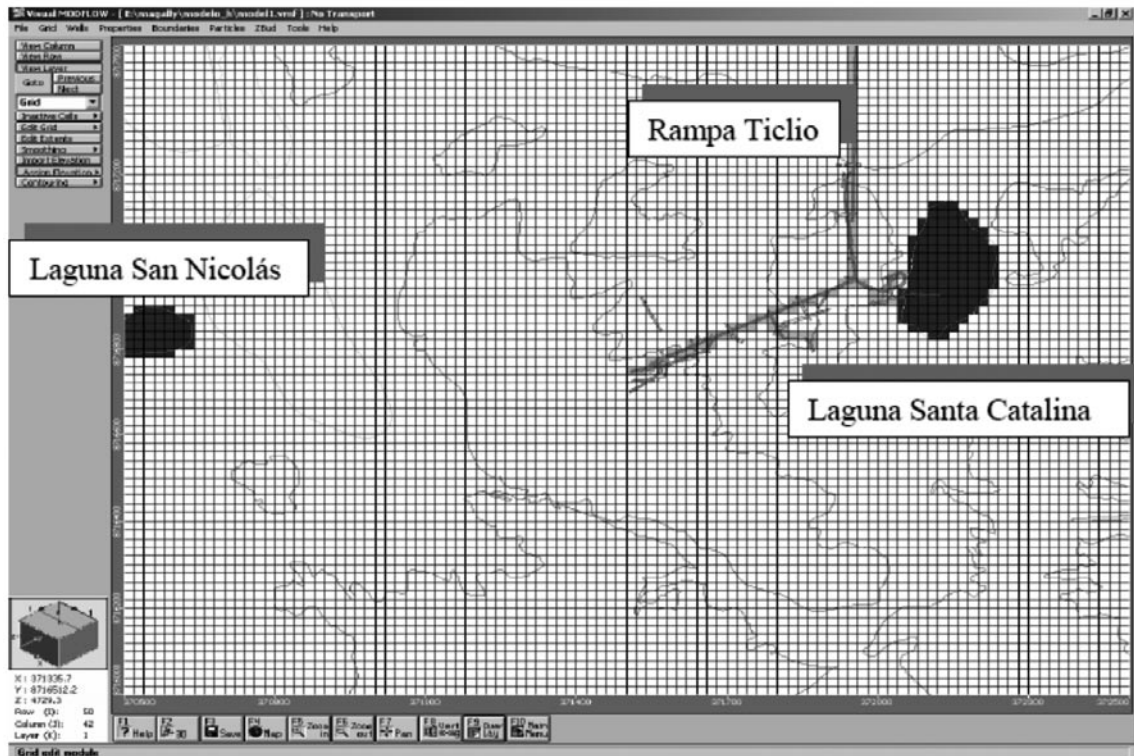


Figura N.º 4. Condiciones de frontera del modelo.

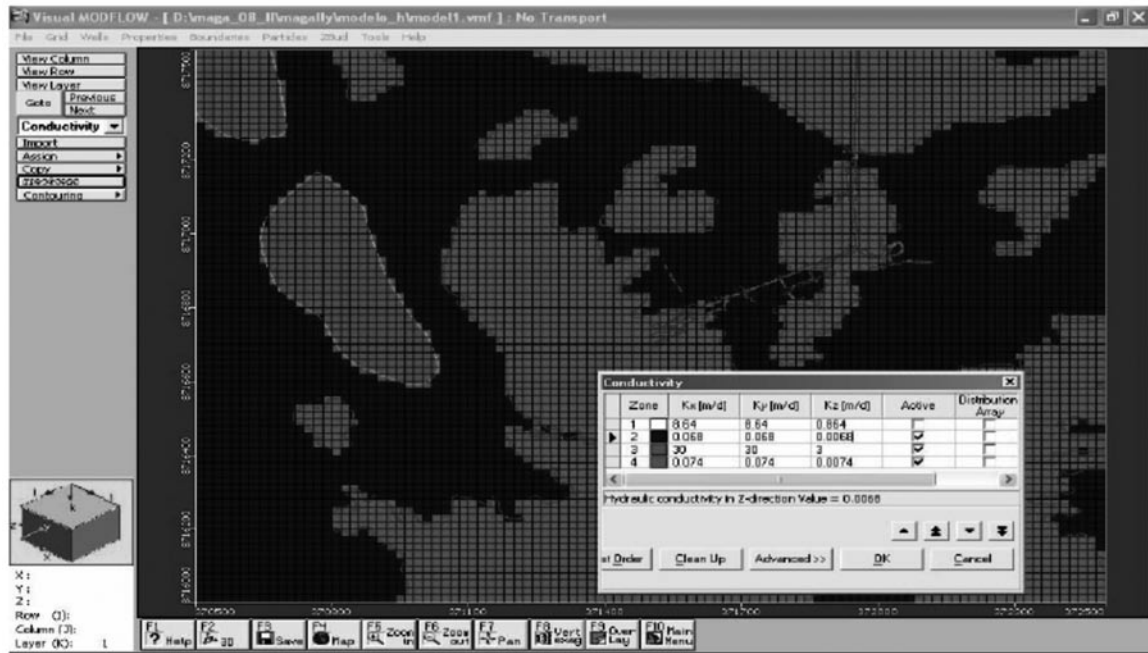


Figura N.º 5. Distribución espacial de las conductividades hidráulicas.

Total IN = 2744.03 m³/día

OUT:

Túneles = 2745.18 m³/día

Total OUT = 2745.18 m³/día

IN - OUT = -1.15 m³/día

error = -0.04%

De la comparación entre el caudal aforado (30.20 l/s) y el calculado por el modelo (31.78 l/s) lo que significa una diferencia de 5.23% valor que califica al modelo como apropiado para simular escenarios en régimen de flujo estacionario.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La transmisividad y la conductividad hidráulica estimadas analíticamente son 6.48 m/d y 0.068 m/d, respectivamente.

Acorde con el balance hídrico estimado con el modelo numérico el caudal de drenaje es 31.78 l/s, valor que se encuentra muy cercano a la descarga observada (30.2 l/s), lo que garantiza la validez del modelo para simular otros escenarios en régimen estacionario.

Se recomienda instalar pozos de observación o piezómetros con el propósito de efectuar pruebas hidráulicas y conocer las propiedades hidráulicas del acuífero.

Instalación de piezómetros, para observación de niveles y calidad de agua subterránea en el tiempo.

Elaborar el modelo de flujo de agua y contaminantes en régimen transitorio con el propósito de simular diferentes escenarios.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BAQUERO, J. y FERNÁNDEZ, R. (2007). *Hidrogeología minera y ambiental*. Síntesis de conceptos fundamentales. Impresos: Gráficas Montereina, p. 233.
- [2] BENÍTEZ, Alberto (1972). *Captación de aguas subterráneas*. 2da edición, Editorial DOSSAT S.A, p. 619.
- [3] GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luís I. FERRER, Mercedes, ORTUÑO, Luís y OTEO, Carlos (2004). *Ingeniería geológica*. Pearson. Prentice Hall. ORYMU S.A., p. 269-270.
- [4] SANZ, E. (2004). *Hidráulica subterránea aplicada*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección Escuelas, p. 215.
- [5] VILLANUEVA, M. y IGLESIAS, A. (1984). *Pozos y acuíferos: Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, Talleres Gráficos IBERGESA. P. 426.