

# APLICAÇÃO DO SOFTWARE MIKE SHE NA MODELAGEM NUMÉRICA INTEGRADA DO FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA E SUPERFICIAL NAS MINAS N3, N4 E N5

Thiago Elias Silva<sup>1</sup>, Sandro Mateus da Silva<sup>2</sup>, Nilson Guiguer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Watergeo Solutions. Av Luiz Paulo Franco, 385, sl 511/512. Belo Horizonte (MG).

thiago.silva@watergeosolutions.com.br

<sup>2</sup> Enterprise Inc. 573 Seagram Drive. Waterloo (ON) Canadá. empresa2@gmail.com Vale, S. A. – Minas de Ferro de Carajás, Rodovia Raimundo Mascarenhas, s/n. Parauapebas (PA). sandro.mateus@vale.com

<sup>3</sup> Universidade do Lugar. Rua dos Fundos, 456. São João (MG). ual@gmail.edu Water Services and Technologies, Rod. Mauricio Syrotsky Sobrinho 5145 Loja 5, Florianópolis (SC). nilson.guiguer@waterservicestech.com

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Inglês (Estados Unidos), Não Realce

Formatado: Português (Brasil), Não Realce

**Palavras-Chave:** Hidrogeologia; Modelagem Numérica; MIKE SHE

## INTRODUÇÃO

As minas de N3, N4 e N5 estão localizadas no complexo ferrífero de Serra Norte (Complexo Minerador de Carajás), no município de Parauapebas, porção centro-sul do estado do Pará. A área abrange uma variedade de litotipos e formações geológicas que, em função do caráter litológico predominante, do comportamento hidrodinâmico e das características morfo-estruturais podem ser agrupadas em cinco unidades hidrogeológicas distintas: aquíferos porosos recentes (cangas), aquíferos em hematitas, aquíferos em jaspilitos, aquíferos em rochas máficas e unidades confinantes (rocha máfica decomposta e semidecomposta, xisto e, diques e sills de rocha básica). Durante a modelagem foi utilizado o aplicativo computacional MIKE SHE, desenvolvido pela DHI Group, que, diferentemente de outros softwares geralmente utilizados na modelagem de águas subterrâneas na mineração, abrange os principais processos do ciclo hidrológico e suas interações, permitindo a modelagem integrada de águas subterrâneas e superficiais.

## MONTAGEM DO MODELO COMPUTACIONAL

O modelo numérico engloba as minas de N3, N4 e N5 e seus entornos, apresentando área total aproximada de 250 km<sup>2</sup>. A malha apresenta espaçamentos regulares em planta (células de 90 x 90 metros) e 20 camadas com espessuras variáveis, resultando num total de ~~800.000~~ 800.000 células, o que garantiu uma precisão numérica aceitável. Células de fluxo nulo foram adotadas em todas as bordas, com exceção para as áreas de rios e da barragem do Gelado, onde foram adotadas as cotas referentes aos respectivos corpos hídricos.

Paras as células do modelo foram discretizadas 12 propriedades hidrodinâmicas distintas (Tabela 1), as quais foram associados valores isotrópicos de condutividade hidráulica. Para a distribuição das propriedades foram utilizados os modelos geológicos de blocos das minas de N3, N4 e N5, que foram importadas para o MIKE SHE através de uma rotina computacional elaboração especificamente para a modelagem. Os modelos geológicos de blocos englobam, basicamente, as áreas das minas e a discretização do restante do modelo foi realizada a partir de mapeamentos geológicos de superfície.

Durante a modelagem, foi assumida, inicialmente, a precipitação média anual obtida para área, que foi ajustada durante o processo de calibração, resultando em um valor de 1845 mm/ano, uniforme em toda a área. Foi adotada uma Evaporação Potencial (EP) uniforme de 1108 mm/ano, referente a média ~~anual~~ ~~(anual~~ (Watergeo, 2017), e uma Evapotranspiração de Referência constante de 1321 mm/ano. A evapotranspiração efetiva foi calculada pelo próprio MIKE SHE, a partir dos parâmetros associados a cada tipo de vegetação presente na área modelada e dos parâmetros assumidos para a zona não saturada, associada a solo arenoso-argiloso de intemperismo.

O fluxo em cursos d'água foi simulado pelo módulo MIKE11, acoplado ao MIKE SHE por meio de um coeficiente de drenança, responsável por transmitir água entre os rios e as zonas saturadas e/ou não saturadas. Os dados disponíveis não permitiram a discretização detalhada das calhas dos cursos d'água e, sendo assim, foi adotada uma representação simplificada, onde a troca de água com o fluxo subterrâneo se dá através da condição de contorno de drenos.

Tabela 1. Propriedades hidrodinâmicas.

Prop.	Litologia	Condutividade hidráulica (m/dia)	
		Calibração	Modelos anteriores
1	Máfica sã	0,07	0,008 - 0,02
2	Jaspilito	0,02	0,01 - 0,05
3	Xisto	0,03	-
4	Máfica semidecomposta	0,29	0,0025 - 0,07
5	Máfica decomposta	0,74	0,0025 - 0,04
6	Hematita compacta	0,43	0,86 - 2,00
7	Hematita friável	1,6	2,00 - 2,15
8	Hematita manganésifera	2,07	-
9	Formação manganésifera	2,07	-
10	Canga química	0,14	0,008 - 0,5
11	Canga estrutural	0,15	0,008 - 0,5
12	Aterro	0,35	-

## CALIBRAÇÃO

A metodologia adotada durante a calibração incluiu a utilização do modelo PEST (Parameter Estimator; Doherty e Hunt, 2010), o qual permite calibrar, simultaneamente, cargas e vazões, alterando-se valores de condutividade hidráulica, coeficientes da zona não saturada e parâmetros de evapotranspiração. As calibrações foram realizadas em regime semipermanente, ou seja, o modelo foi corrido em regime transiente até a estabilização dos níveis, considerando-se dois cenários simultaneamente: Pré-mina (antes do início do rebaixamento do nível d'água) e Situação em maio de 2016 (após o início do rebaixamento do nível d'água). Durante a calibração da Situação em maio de 2016 foram discretizados drenos na região das minas, com profundidades variáveis, de acordo com a elevação de cada cava.

O modelo apresentou boas calibrações das vazões dos cursos d'água nos dois cenários considerados, sendo utilizadas as mesmas vazões de referência em ambos os cenários, visto que não foram observadas variações significativas de vazão dos cursos d'água ao longo do período monitorado. Também foram obtidas boas calibrações das vazões retiradas pelos drenos utilizados para simular o rebaixamento na região das cavas na Situação em maio de 2016.

O modelo apresentou comportamento recomendado para os níveis d'água calibrados nos dois cenários, com valores de resíduo (calculado menos observado) distribuídos entre positivo e negativo, sem tendência. A calibração do cenário Pré-mina apresentou erro RMS normalizado aceitável de 8,9%, enquanto que para a Situação em maio 2016 este erro foi de 14,5%, considerado aceitável devido a grande variação dos dados e a forma de representação do rebaixamento por meio de drenos. A Figura 1 apresenta uma avaliação quantitativa das calibrações dos níveis d'água, onde quanto mais próximo da reta central estiver o conjunto de dados, melhor é a calibração.

A Tabela 1 apresentou os valores de condutividade hidráulica calibrados, juntamente com aqueles valores obtidos em estudos anteriores. No geral, não há uma discrepância significativa entre estes valores,

com exceção para a litologia máfica decomposta, a qual se mostrou mais condutiva, o que pode ser associado ao fato desta unidade estar representada majoritariamente na primeira camada do modelo, a qual ~~também incorporatambém incorpora~~ uma camada de solo saturado, com maior condutividade hidráulica, resultando em uma condutividade hidráulica equivalente mais alta. Ademais, o MIKE SHE realiza a distribuição da recarga em função da permeabilidade da primeira camada do modelo, e uma condutividade muito baixa resulta em um grande escoamento superficial, em detrimento a infiltração.

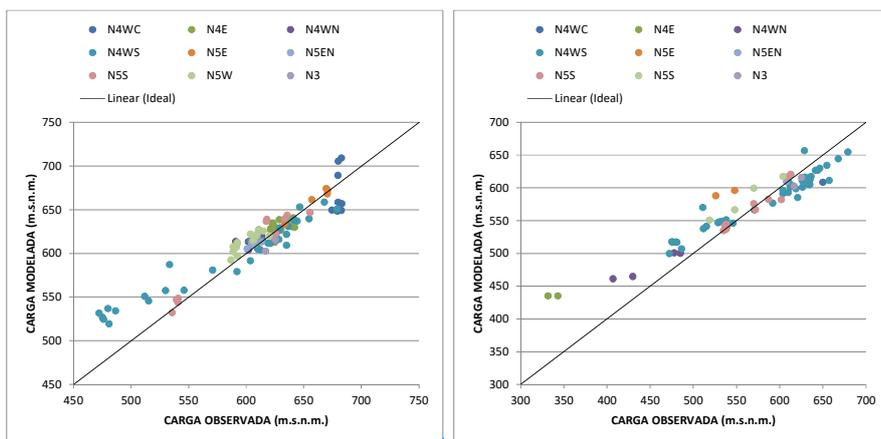


Figura 1. Comparação entre os níveis d'água monitorados e calculadas para os cenários Pré-mina (esquerda) e Situação em maio de 2016 (direita).

## SIMULAÇÕES

Para a simulação do máximo rebaixamento foram consideradas todas as minas na sua cota final (ano 2023). Esta situação representa uma condição conservadora, onde se obtêm as máximas interferências na disponibilidade hídrica, uma vez que não leva em consideração tempos de exaustão diferentes para as minas. Para a simulação ~~foram inseridos~~foram inseridos drenos ao longo das cavas futuras, sendo adotada uma elevação 10 metros abaixo das cotas previstas para os pits finais. Para as demais condições de contorno e para os parâmetros hidráulicos foram mantidas as mesmas condições e valores obtidos durante as calibrações.

A simulação da recuperação do nível d'água representa o descomissionamento final das minas, onde o aquífero atinge seu equilíbrio, com a formação de lagos nas cavas. O MIKE SHE corresponde a um modelo integrado (águas subterrâneas e superficiais) e permite que as cavas sejam representadas por vazios e o enchimento dos lagos seja realizado de forma livre, diferente de outros modelos de água subterrânea, onde é necessária a representação das cavas com material de elevada condutividade hidráulica e o nível dos lagos é forçado por uma condição de contorno de carga constante, com elevação previamente definida. A simulação da recuperação do nível d'água foi realizada em regime transiente, para um período de 50 anos, e a evolução dos níveis dos lagos pode ser observada na Figura 2. Alguns lagos apresentaram estabilização de seus níveis em cerca de 10 anos, enquanto que para algumas cavas a estabilização pode demorar mais do que os 50 anos simulados.

A simulação do rebaixamento máximo do nível d'água apresentou uma redução na vazão dos cursos d'água de aproximadamente 25% (4.014 m<sup>3</sup>/h) em relação ao cenário Pré-mina e 20% (3.332 m<sup>3</sup>/h) em relação a Situação em maio de 2016. Em contrapartida, o bombeamento para rebaixamento dos níveis

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

d'água mantém a disponibilidade hídrica praticamente constante, uma vez que será disponibilizada uma vazão de 3.724 m<sup>3</sup>/h.

A simulação da recuperação dos níveis d'água mostra a recuperação efetiva na disponibilidade hídrica relacionada aos cursos d'água, com um aumento de 3% (493 m<sup>3</sup>/h) em relação à condição Pré-mina.

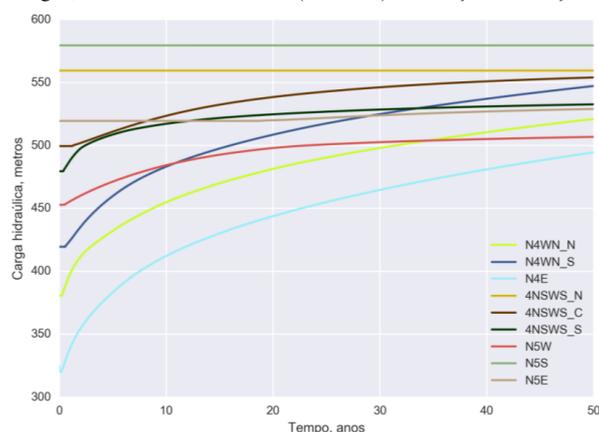


Figura 2. Curva de Enchimento dos lagos.

## CONCLUSÕES

A modelagem numérica pelo software MIKE SHE permitiu uma avaliação integrada dos recursos hídricos, possibilitando traçar um panorama geral da variação da disponibilidade hídrica em função das atividades de rebaixamento e recuperação dos níveis d'água.

Embora o MIKE SHE não possibilite uma discretização detalhada da zona saturada (águas subterrâneas), conforme outros softwares de modelagem comumente utilizados, ele permite uma visão integrada dos recursos hídricos (superficial e subterrâneo), o que é essencial na avaliação das variações na disponibilidade hídrica, principalmente durante a simulação da recuperação dos níveis d'água (descomissionamento da mina), com formação de lagos na região das cavas.

A modelagem realizada para as minas de Serra Norte (N3, N4 e N5) teve caráter regional, de forma que as limitações do MIKE SHE na discretização da zona saturada não resultaram em prejuízos aos resultados obtidos, que se mostraram coerentes com modelagens realizadas anteriormente, em outros softwares.

Para a modelagem de áreas onde se necessita de uma descrição detalhada da zona saturada, o MIKE SHE pode ser utilizado em conjunto com outros softwares de modelagem de águas subterrâneas, de forma que as saídas obtidas pelo MIKE SHE, como a variação espacial da recarga, poderão ser utilizadas como dados de entrada em modelagens realizadas em outros softwares.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

Doherty e Hunt. *Approaches to highly parameterized inversion - A guide to using PEST for groundwater-model calibration*: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5169, 59 p. 2010.

Watergeo Solutions. *Modelamento numérico regional integrado do fluxo de água subterrânea e superficial das minas N3, N4 e N5 – Complexo Ferrífero de Serra Norte – Parauapebas/PA*. WGS-RT-135-04HN-16-R00. 97p. 2017.

Formatado: Inglês (Estados Unidos)