

MÉTODO PARA ESTIMATIVA DO BALANÇO HIDROLÓGICO E RECARGA AQUÍFERA DISTRIBUÍDA EM ÁREAS DE MINERAÇÃO

AZEVEDO, J.M.¹, ALMEIDA, D.C.², PINTO, M.S³, CALDAS, F.V⁴

¹Water Services and Technologies (WST): juan.azevedo@wateservicestech.com

¹Water Services and Technologies (WST): danilo.almeida@wateservicestech.com

¹Water Services and Technologies (WST): margarida.sousa@wateservicestech.com

⁴VALE S.A: Fabiana.caldas@vale.com

RESUMO

Entre os diversos fatores que controlam a dinâmica subterrânea, a parcela relativa à infiltração que atinge os aquíferos, também conhecida como recarga aquífera, se destaca. Em modelos hidrogeológicos, é comum estimar a recarga aquífera como um percentual da precipitação a depender da unidade de solo/rocha em que ocorre. Este é um conceito muito simples e, por vezes, arriscado de assumir, uma vez que outras variáveis controlam a recarga. Muitos são os métodos para sua estimativa, embora a maioria destes necessitem de parâmetros complexos. Visando sanar isto, é proposto: 1-Estimar um excedente hídrico através de um método consagrado; 2–Através de uma álgebra de mapas, elaborar um modelo de recarga distribuída; 3-Estimar a recarga aquífera por um método alternativo e realizar uma validação cruzada (também conhecido como *cross check*). Os resultados obtidos após as duas primeiras etapas apresentaram uma distribuição de recarga especializada em área, com coerência conceitual, por exemplo, indicando valores nulos ou muito baixos, nos taludes de cava em uma lavra à céu aberto. Comparando os valores obtidos pelo método alternativo, observou-se a mesma ordem de grandeza. Assim, a aplicação de um modelo de recarga distribuída, utilizando uma álgebra de mapas acoplada à um modelo analítico, se mostrou uma alternativa pouco complexa e replicável.

PALAVRAS-CHAVE: Recarga; Balanço-Hídrico; Hidrogeologia; Modelagem.

ABSTRACT

Among the several factors that control groundwater dynamics, the infiltration that reaches the aquifer, also known as parameter “aquifer recharge”. In hydrogeological models, it is common to estimate groundwater recharge as a percentage of precipitation depending on the soil/rock unit in which it occurs. This is a very simple and sometimes incorrect, since other variables control the recharge. There are many methods for its estimation, although most of them require complex parameters. To fix this, it is proposed: 1-Estimate a water surplus through a consecrated method; 2–Using an algebra map, develop a distributed recharge model; 3-Estimate the aquifer recharge by an alternative method and carry out a cross-check. The results obtained after the first two stages showed a specialized recharge distribution in area, with conceptual

analysis, for example, indicating null or very low values, in the pit slopes in an open pit mine. Compared to the values obtained by the alternative method, the same order of magnitude is observed. Thus, the application of a distributed recharge model, using a map algebra coupled to an analytical model, proved to be a less complex and replicable alternative.

KEYWORDS: Recharge; Water balance; Hydrogeology; Modeling

1 INTRODUÇÃO

Em linhas gerais, a precipitação atmosférica pode ser assumida como principal responsável pela recarga de uma bacia hidráulica. No balanço hídrico da área, o volume precipitado pode tomar diversos rumos: empoçar, evaporar, infiltrar, “evapotranspirar” e escoar.

Segundo Custódio e Llamas (1976), o balanço hídrico é caracterizado pela aplicação do princípio de conservação de massa a uma região definida por determinadas condições de contorno. Este princípio estabelece que a diferença entre a entrada e saída de massa em um sistema é igual ao armazenamento dentro dele.

Em termos de carga hidráulica, as áreas de maior cota são conhecidas como áreas de recarga, já áreas de menor cota, são conhecidas como áreas de descarga, obedecendo os princípios de fluxo subterrâneo de cada meio (Freeze and Cherry, 1979).

O escoamento superficial, junto à evapotranspiração, representa os componentes de saída d'água no balanço hidrológico. Em um segundo momento, a saída em nascentes e rios também pode se somar a estes. Para o cálculo da recarga, é possível interpretar que, após o computo do excedente hídrico o valor disponível de água pode tomar dois caminhos: infiltrar ou escoar. Neste último caso, fatores como o tipo de solo e a declividade, possuem alta relevância para que ocorram maiores ou menores vazões de escoamento. Para a área de estudo, a estimativa de recarga representa uma informação essencial, uma vez que o computo de valores maiores ou menores representará, diretamente, superestimativas ou (subestimativas) nas taxas/vazões de água disponíveis para o aquífero. Esse cálculo equivocado, fatalmente impactaria os planos de desague assim como as avaliações de disponibilidade hídrica.

Considerando a importância do parâmetro recarga para os estudos em tela, foram consideradas duas técnicas para sua estimativa e respectivo *cross check*. A primeira consiste em um balanço hídrico físico através da metodologia de Thornthwaite e Mather, usada para estimar a parcela disponível de água (excedente hídrico). Desta forma, o balanço físico trata-se de um cálculo analítico que não considera o escoamento superficial, que será incorporado posteriormente para a estimativa e distribuição da recarga na área. Já a segunda técnica estima a variação de água dentro do aquífero e é popularmente conhecida como *Water Table Flutuation* (WTF). Para esta última, contudo se propõe o nome de “Variação do NA observado” uma vez que podem ser utilizadas além do WTF, suas variações (com e sem projeção) e a Diferença de Nível Potenciométrico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CONCEITOS GERAIS

2.1.1 Balanço Hídrico: Thornthwaite e Mather

Castany (1975), partindo do balanço hídrico global para um ano hidrológico, propõe uma expressão para o balanço hídrico de aquíferos livres a partir de simples discriminação das parcelas em que se divide a água proveniente da precipitação. Sabe-se que a lâmina precipitada sobre o solo, PPT, pode ser dividida em três parcelas: o escoamento superficial ES, a infiltração total IT e a evapotranspiração real ETR. Portanto, a expressão geral do balanço hídrico médio é:

$$PPT = ES + ETR + IT \quad (1)$$

A evapotranspiração real ETR é obtida a partir da comparação da evapotranspiração potencial com a precipitação, estabelecendo-se um valor para a quantidade máxima de água que o solo pode armazenar (CAD). Este valor é arbitrado de acordo com a natureza do terreno. Castany (1975) atribui valores de 50 mm em solos arenosos e 200 mm em solos argilosos, e corresponde à quantidade de água retida no solo C que é denominada de capacidade de retenção do sol, correlacionável à capacidade de campo utilizada em agronomia.

Considerando a necessidade de uma simplificação dos parâmetros, este trabalho adotou um valor de CAD médio de 100 mm.

Quanto à infiltração efetiva, por entender que este parâmetro também é dependente do relevo, é proposto que o termo seja substituído por excedente hídrico. Desta forma, o valor resultante da proposição de Thornthwaite e Maher (1965), ainda será subtraído do run off, como será abordado adiante.

2.1.2 Variação do NA observado

Para as estimativas de recarga das unidades hidrogeológicas no caso em tela, aquífero Cauê e Aquitarde Batatal, foram utilizados os dados de flutuações do nível estático dos instrumentos de monitoramento da mina da área.

Os métodos aplicados para essa estimativa foram o: *Water Table Fluctuation* (WTF) apresentado por Healy e Cook (2002) o Método de Diferença de Nível Potenciométrico (DNP) como proposto por Vasconcelos *et al*(2013).

Tendo em vista que essas estimativas são (embora conceitualmente reconhecidas) pouco usuais em estudos no Quadrilátero Ferrífero e, prezando o bom uso do dado, os valores finais devem ser comparados à aqueles disponíveis na literatura de trabalhos anteriores ou correlatos.

2.1.2.1.1 Water Table Flutuation

Neste método, a recarga é estimada utilizando produto do rendimento específico (S_y), que em meios porosos pode ser considerado igual à porosidade efetiva, por um quociente da variação dos rebaixamentos pelo tempo. Transcrevendo isso, temos:

$$R = S_y \cdot (dh/dt) = S_y \cdot (\Delta h/\Delta t) \quad (2)$$

Onde Δh é igual a diferença entre o pico de subida e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada até o instante do pico. A curva de recessão antecedente extrapolada é a linha que a curva do poço teria na ausência de elevação de nível d'água (recarga). O método WTF assume que todos os outros componentes do balanço hídrico (fluxo de base, entrada e saída subsuperficial e evapotranspiração) são nulos durante a recarga.

Salienta-se que o comportamento da curva de recessão é dependente de diversos fatores como relevo e topografia, sazonalidade do clima, propriedades hidráulicas dos poros e profundidade dos níveis estáticos (HANTUSH, 1967).

2.1.2.2 Variação de Nível Potenciométrico (VNP)

Para este método são utilizados o valor mínimo médio mensal, correspondente a pré-estação climatológica e, o valor máximo médio mensal, identificado na estação chuvosa (ou posteriormente), isto é, representa uma parte da recarga subterrânea total que esteve disponível na época de armazenamento máximo do respectivo ano, fornecendo boas estimativas para entender a dinâmica do aquífero (VASCONCELOS, 2013).

2.1.3 Cálculo do escoamento superficial

Pode-se concluir então, que o excedente hídrico (advindo de Thornthwaite e Mether) é igual ao somatório da Infiltração e *Run Off* (Q_{off}) na bacia. Assim sendo, para a determinação da infiltração efetiva, toma-se a fórmula:

$$I_e = EXC - Q_{off} \quad (3)$$

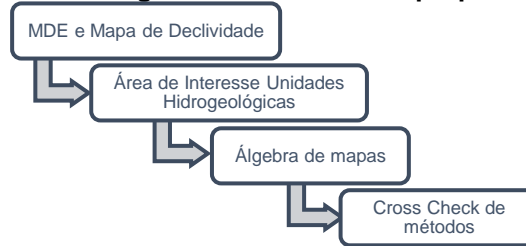
No qual a vazão de escoamento superficial é igual ao produto da precipitação por um coeficiente de escoamento C' ($Q_{off} = C' \times P$). Onde: C' é o coeficiente que determina o quanto de água precipitada escorrerá em superfície, em função do litótipo, e da declividade.

Este trabalho usou os valores C' advindos de Carvalho & Silva (2006) e Wahnfried e Hirata (2005) para obter os valores de C , considerando uma correlação dos litótipos arenosos e argilosos com as unidades aquíferas e não aquíferas (ou seja de baixíssima permeabilidade), respectivamente.

2.2 FLUXO DE TRABALHO E MÉTODO PROPOSTO

O método proposto consiste basicamente em elaborar um balanço hídrico climatológico, aplicar o valor deste no que compete ao excedente hídrico em uma álgebra de mapas, que deve considerar um coeficiente de escoamento superficial. O valor do coeficiente de escoamento considera a unidade aquífera e a declividade. Assim 2 (dois) mapas são utilizados: Declividade e Unidades Hidrogeológicas. Um resumo desta proposta metodológica encontra-se abaixo na Figura 1.

Figura 1- Fluxograma das atividades propostas na metodologia.



Fonte 1: Autores.

3 RESULTADOS

3.1 BALANÇO CLIMATOLÓGICO

Com os valores de precipitação da série histórica já discutidos, foram utilizados os valores de temperatura do INMET para cálculo dos coeficientes térmicos. Como já mencionado, o valor da subtração entre Evapotranspiração Real (adquirido por meio da formulação de Thorntwaite e Mether) e Precipitação Total, pode ser considerado igual ao excedente hídrico (Tabela 1).

Tabela 1: Balanço hídrico para área de estudo

MÊS	T(média) (°C)	Im (mm)	ETP (mm)	PPT (mm)	PPT-ETP (mm)	C (mm)	ETR (mm)	EXC (mm)
out	23.00	9.87	96.62	133.12	36.50	36.50	96.62	0.00
nov	23.00	9.87	96.62	266.41	169.79	100.00	96.62	106.29
dez	23.00	9.87	96.62	364.18	267.56	100.00	96.62	267.56
jan	24.00	10.52	106.92	335.32	228.40	100.00	106.92	228.40
fev	24.00	10.52	106.92	215.82	108.90	100.00	106.92	108.90
mar	23.00	9.87	96.62	194.88	98.26	100.00	96.62	98.26
abr	22.00	9.23	86.93	55.20	-31.73	68.27	55.20	0.00
mai	20.00	8.00	69.30	43.28	-26.01	42.26	43.28	0.00
jun	18.00	6.83	53.93	14.58	-39.35	2.90	14.58	0.00
jul	18.00	6.83	53.93	4.32	-49.61	0.00	4.32	0.00
ago	20.00	8.00	69.30	13.31	-55.99	0.00	13.31	0.00
set	21.00	8.61	77.82	42.23	-35.60	0.00	42.23	0.00
	Im total=	107.99		1682.65			773.25	809.40

Fonte: Autores.

3.2 CÁLCULO DO ESCOAMENTO E INFILTRAÇÃO

Considerando que apenas uma parte da água infiltra, é necessário descontar o deflúvio do valor do excedente hídrico (EXC). Foram usados valores tabelados de coeficientes de escoamento para solos similares, considerando a diferenciação entre

os aquíferos Cauê (Formação Ferrífera), Moeda (Quartzito) e, também, as unidades não aquíferas. O resultado, em termos de classes de recarga é visto na Tabela 2.

Tabela 2: Valores calculados para o escoamento e infiltração na área

Declividade (°)	Coeficiente de escoamento (%)			Deflúvio (mm/ano)			Infiltração (mm/ano)		
	Aquífero Cauê (%)	Aquífero Moeda (%)	Aquitarde/Aquiclude (%)	Aquífero Cauê	Aquífero Moeda	Aquitarde/Aquiclude	Aquífero Cauê	Aquífero Moeda	Aquitarde/Aquiclude
0 a 5	10	15	30	168,27	252,40	504,80	641,14	557,01	304,61
5 a 10	15	20	35	252,40	336,53	588,93	557,01	472,87	220,48
10 a 30	20	30	40	336,53	504,80	673,06	472,87	304,61	136,34
>30	35	40	60	588,93	673,06	1009,59	220,48	136,34	0,00

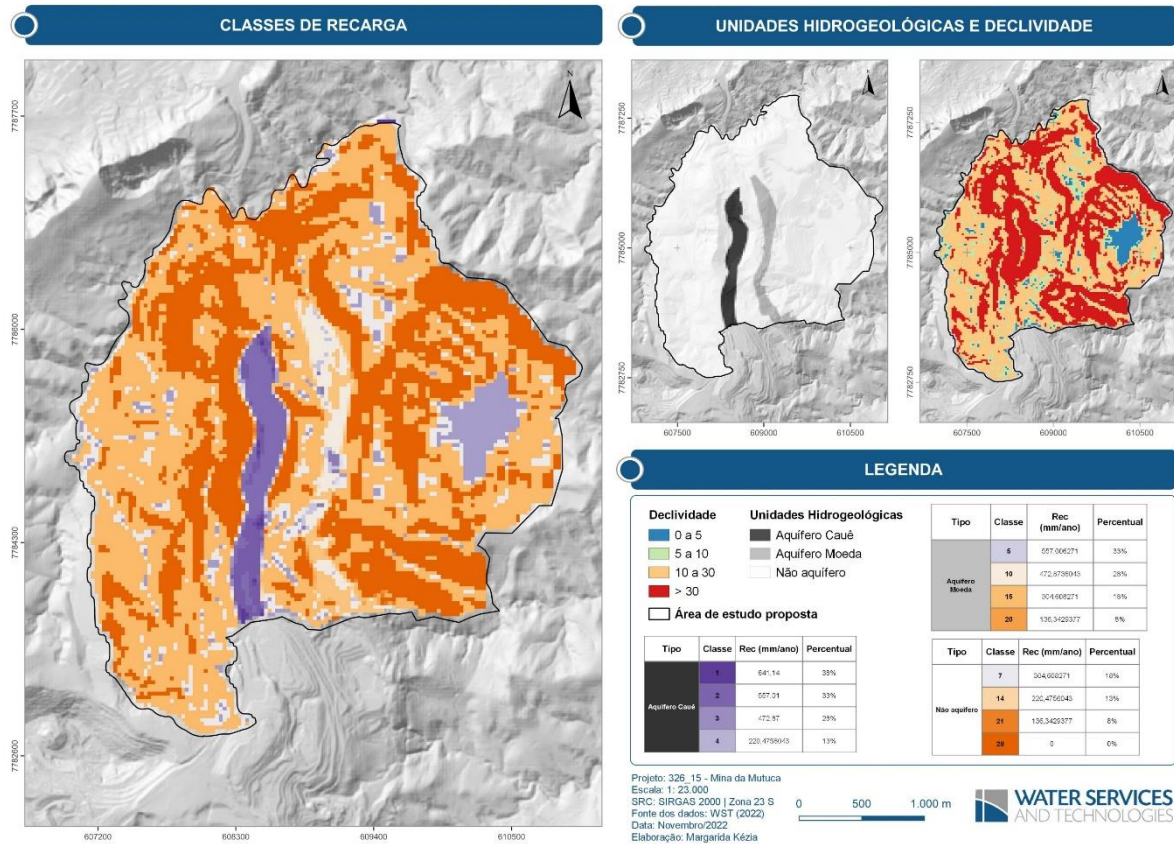
Fonte: Autores.

3.3 ÁLGEBRA DE MAPAS E RECARGA DISTRIBUÍDA

A álgebra de mapas, pode ser entendida como uma linguagem que define uma sintaxe para combinar temas de mapa aplicando operações matemáticas e funções analíticas para criar temas de mapa.

Utilizando procedimentos e técnicas em ambiente GIS, através do software livre QGIS (versão 3.22), foi realizado uma álgebra de mapas que permitiu realizar a correlação espacial da ocorrência de cada uma dessas classes de recarga na área (Figura 2).

Figura 2: Recarga distribuída na área de estudo



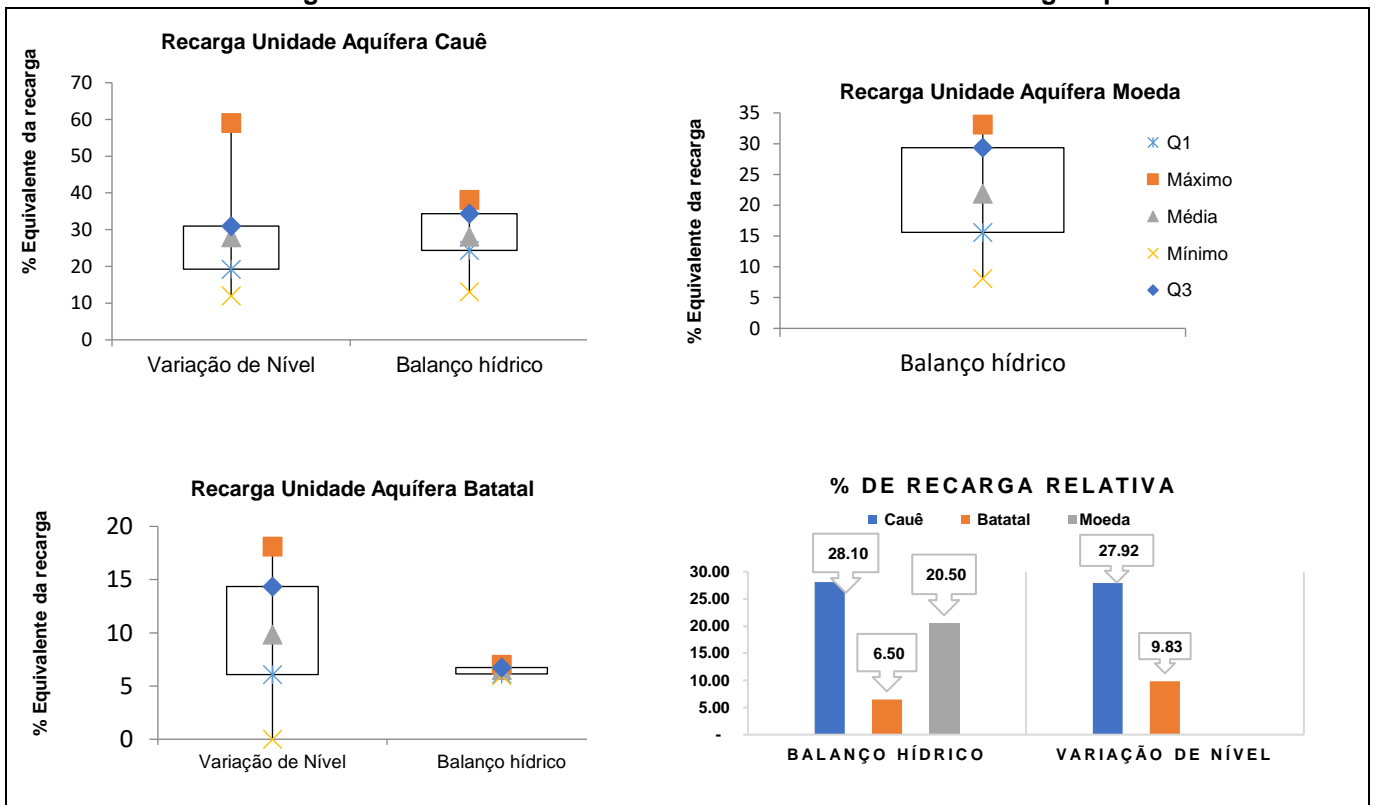
Fonte: Autores.

3.4 ESTIMATIVA DE RECARGA POR VARIAÇÃO DE NÍVEL – CROSS CHECK

A avaliação da recarga por meio da correlação com as variações do nível d'água observado, mostram certa verossimilhança entre os valores. Há anomalias observadas, principalmente no método WTF. É provável que isso tenha ocorrido devido ao uso de intervalos mensais, considerando que essa prática pode computar outros componentes da recarga que não somente a infiltração. Todavia, esses valores foram tratados e removidos (como *outliers*).

Em relação ao *cross check* dos métodos de estimativa (Figura 3), é possível visualizar que, em termos das médias obtidas, ambos os métodos apresentaram a mesma ordem de grandeza. A grande diferença para a metodologia proposta é que, uma vez que sua aplicação se dá distribuída em área, pode-se supor que seu uso é mais adequado que o método de diferença de nível em que se considera um valor pontual e sujeito à influência das áreas de maior ou menor carga hidráulica.

Figura 3: *Cross Check* entre métodos de estimativa de recarga aquífera.



Fonte: Autores.

CONCLUSÕES

Apesar da divergência entre os valores máximos e mínimos das recargas, as médias, nas duas metodologias (*cross check*) apresentam valores próximos. Assim conclui-se que a recarga utilizando uma álgebra de mapas acoplada à um modelo analítico, se mostrou uma alternativa pouco complexa, bastante confiável e facilmente replicável. A grande diferença para a metodologia proposta é sua aplicação se dá

distribuída em área, considerando um coeficiente de declividade nos seus cálculos. Por fim, recomenda-se que o modelo de recarga distribuída proposto seja considerado ainda nas etapas de modelagem numérica, por entender que esta metodologia apresenta um ganho substancial na confiança da recarga inserida.

REFERÊNCIAS

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. Apostila de Hidrologia. Universidade Federal Rural, Rio de Janeiro, 2006. p. 11-115.

CASTANY, G. 1975. Prospecção e Exploração de Águas Subterrâneas. Editora Omega S. A. Barcelona. Espanha. 738pp.

CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. 1976. Hidrologia Subterrânea. Editora Omega S. A. Casanova. Barcelona. Espanha. 220p

FREEZE, R.A., AND CHERRY, J.A., 1979, Groundwater: Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 604 p.

HANTUSH MAHDI S. Flow to wells in aquifers separated by a semipervious layer, Journal of Geophysical Research, 1967.

R. W. HEALY AND P. G. COOK, "Using Groundwater Levels to Estimate Recharge," Hydrogeology Journal, Vol. 10, No. 1, 2002, pp. 91-109.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Publication in Climatology, Laboratory of Climatology, Centerton, v. 8, n.1. 1955.

VASCONCELOS, S. et al. (2013). Estimativa da Reserva Renovável dos Sistemas Aquíferos da Porção Oriental da Bacia Sedimentar do Araripe. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s.l.], v. 18, n. 1, p.99-109, 2013. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH

VASCONCELOS, S. et al. (2013). Estimativa da Reserva Renovável dos Sistemas Aquíferos da Porção Oriental da Bacia Sedimentar do Araripe. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s.l.], v. 18, n. 1, p.99-109, 2013. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH

WAHNFRIED, I; HIRATA, R. (2005). Comparação de métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). Revista Bras.de Recursos Hídricos. V. 10. N. 2, abr/Jun., p 15 - 25.