

Avaliação da Recarga de Águas Subterrâneas em Ambiente de Cerrado com Base em Modelagem Numérica do Fluxo em Meio Poroso Saturado

Groundwater Recharge Evaluation in Brazilian Cerrado Biome Site by Saturated Zone Flow Numerical Modeling

Ronaldo Medeiros dos Santos¹ e Sergio Koide²

¹Universidade de Brasília e Instituto Federal Norte de Minas Gerais, Salinas – MG, Brasil

ronaldo.medeiros@ifnmg.edu.br

²Universidade de Brasília, Brasília, DF – Brasil.

skoide@unb.br

Recebido: 03/11/2015 - Revisado: 26/12/2015 - Aceito: 04/02/2016

RESUMO

A recarga natural de águas subterrâneas é uma informação chave à gestão integrada dos recursos hídricos, mas ainda pouco estudada no cerrado - importante zona continental de recarga, responsável pela vazão de base de trechos de alguns dos principais rios brasileiros. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivos estudar e compreender aspectos chave do referido processo nesse importante bioma: (i) taxas; (i) distribuição espacial; e (iii) fatores determinantes. A área de estudos compreendeu uma bacia experimental localizada na porção oeste do Distrito Federal e a metodologia consistiu na aplicação de modelagem numérica do fluxo em meio saturado. No método proposto, a distribuição espacial da recarga foi mapeada previamente e as taxas das zonas foram estimadas via calibração do modelo numérico. Apesar das limitações do modelo, as taxas simuladas situaram-se próximas à prevista na literatura. As propriedades hidráulicas do meio poroso foram determinantes no estudo do processo, mas o uso/cobertura da terra foi considerado um importante fator regulador da recarga na região. Os resultados obtidos foram considerados válidos, como ponto de partida para a execução de novos estudos em áreas de cerrado, com melhor caracterização do meio aquífero e uma melhor alternativa metodológica para a caracterização da variabilidade espacial das zonas de recarga.

Palavras Chave: Recarga de aquíferos freáticos. Simulação numérica.

ABSTRACT

Natural groundwater recharge is a key information to the integrated water resources management (IWRM), but still not well researched in Cerrado Biome – being as an important continental recharge zone, responsible for the base flow in some stretches in major Brazilian rivers. In this context, the purpose of this study was to research and understand key aspects of this process in this important biome: (i) rates; (i) spatial distribution; and (iii) determining factors. The studied area encompasses an experimental basin located in the western portion of the Federal District and the methodology consisted in the application of Numerical Modeling Flow of Saturated Zone. In the method proposed, the spatial distribution of groundwater recharge was previously mapped, and the rates of the recharge zones were estimated by numerical model calibration. In spite of model limitations, simulated rates were close to that provided by literature. The hydraulic properties of the porous media were overriding in the study process, however, land cover/use was considered as an important regulatory factor in the groundwater recharge process in the area. The results obtained were considered valid as a starting point for further implementations studies in Cerrado biome, showing a better porous medium characterization and a better methodology alternative to characterize the spatial variability of recharge zones.

Keywords: Groundwater recharge. Numerical simulation.

INTRODUÇÃO

A recarga natural de águas subterrâneas é o processo por meio do qual ocorre a entrada de água nos sistemas aquíferos (FIORILLO; PAGNOZZI; VENTAFRIDDA, 2015). Tem como fonte principal a precipitação pluviométrica e é regulada por um conjunto de fatores físicos e climáticos, como arcabouço geológico, tipo de solo, relevo, cobertura vegetal e evapotranspiração, dentre outros (CARRERA-HERNÁNDEZ; SMERDONB; MENDOZA, 2012). Conhecer a taxa de recarga e compreender o encadeamento dos seus mecanismos reguladores são aspectos fundamentais à gestão integrada dos recursos hídricos (TAN, *et al.*, 2014; SZILAGYI; JOZSA, 2013), principalmente quando se enfrenta o desafio de estudar, compreender e manejar regiões de grande envergadura espacial e particular importância hidrológica, como o cerrado – importante zona continental de recarga, responsável pela vazão de base de trechos de alguns dos principais rios brasileiros (SANTOS, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Segundo Scanlon, Healy e Cook (2002), não existe uma abordagem universal para o estudo da recarga de águas subterrâneas. Consequentemente, o número de métodos reportados na literatura é grande, dentre os quais se destacam (i) os que se baseiam em medições do nível freático, (ii) os métodos químicos, baseados na utilização de traçadores, (iii) os métodos baseados em medições diretas ou indiretas de fluxos hidrológicos, como os de escoamento de base e de balanço hídrico, e (iv) os métodos baseados em modelagem/simulação; hidrológica ou numérica. Aplicações dessas técnicas podem ser vistas em detalhes nos trabalhos de Carvalho *et al.* (2014), He *et al.* (2012), Neukum e Azzam (2012) e Tillman, Pool e Leake (2015), respectivamente.

Scanlon, Healy e Cook (2002), destacam que a seleção da abordagem a ser utilizada tem como base o objetivo do estudo, que frequentemente se situa entre a busca de estimativas para a gestão de águas subterrâneas e a compreensão hidrológica do processo. Para Santos (2012), métodos empíricos de formulação simples para obtenção de estimativas pontuais têm utilidade no primeiro caso, mas oferecem pouco em termos de conhecimento quanto à variabilidade espacial e ao encadeamento físico dos processos que levam ao aporte de água à zona saturada.

Nesse sentido, modelagem numérica e simulação hidrológica distribuída são abordagens promissoras, e têm sido propostas, sob um variado número de formas, como meios através dos quais o processo em questão pode ser estudado. Aplicações dessas abordagens a estudos de recarga são relatadas em Turkeltaub *et al.* (2015) e Pontes *et al.* (2015). De acordo com Ayvaz e Elçi (2014) e Singh (2014), modelagem numérica de zona saturada tem como vantagens o fato de estimar recarga efetiva e pelo modelo final poder ser utilizado em simulações úteis à gestão de águas subterrâneas, como, por exemplo, previsão de impactos da outorga de poços de bombeamento, previsão de fluxos de base e movimentação de contaminantes em aquíferos.

Embora a associação entre cerrado e produção de água já seja amplamente difundida (LIMA, 2011), o histórico de degradação ambiental a que essa região foi submetida ainda não foi interrompido. A expansão da agropecuária, da indústria

e das áreas urbanas tem ocasionado o desmatamento da cobertura vegetal natural e o aumento dos processos erosivos do solo (SANTOS, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2015); ambos diretamente associados à redução da oferta de água, sobretudo subterrânea, a médio/longo prazo. No entanto, mesmo diante do referido cenário, a compreensão atual acerca do mecanismo de recarga se apresenta deficiente.

Campos (2004) caracterizou o processo de recarga associado a formações aquíferas do Distrito Federal. Nesse estudo, verificou-se a forte influência da precipitação na reposição das reservas subterrâneas da região, resultado confirmado por Lousada e Campos (2006), Lousada e Campos (2011) e Pacheco (2012). A ocupação irracional de zonas de recarga foi identificada como sendo a causa principal da depleção do nível freático em algumas áreas. A recarga não foi mapeada ou quantificada, embora, com base em estudos anteriores, relatou-se taxas superiores a 20% da precipitação. A mesma ordem de grandeza de taxas de recarga (24%) foi obtida por Gaspar (2006), para áreas de cerrado no sistema aquífero Urucuia. Neste estudo, ressaltou-se a importância da cobertura do solo e do tipo de solo no processo, mas a distribuição espacial, tanto da recarga, quanto dos fatores associados, não foi considerada. A estimativa foi obtida via balanço hídrico, a partir de dados médios das bacias hidrográficas do referido sistema.

A pouca atenção dos estudos desenvolvidos para a região quanto à quantificação precisa das taxas de recarga e à caracterização espacial do processo é lembrada em Souza (2013) e Oliveira *et al.* (2015). Oliveira *et al.* (2015) ainda afirmam que as taxas de recarga para a região podem, em alguns casos, ultrapassar 50% da precipitação total, mas destacam que o processo ainda é pouco compreendido em áreas de cerrado.

A agência reguladora de águas do Distrito Federal – ADASA dispõe de um mapa de recarga potencial para o DF, utilizado como informação para a gestão das águas subterrâneas na região. No entanto, de acordo com Mello e Castro (2011), os valores de taxa do referido mapa são apenas uma primeira aproximação, uma vez que o nível de conhecimento acerca dos fatores que regem o processo ainda é insuficiente.

Assim, pela quantidade de estudos desenvolvidos especificamente para áreas de cerrado e pelos métodos utilizados, considera-se válido o cenário descrito em Santos (2012), segundo o qual ainda não existem valores precisos de taxas de recarga associadas aos diferentes tipos de solo e cobertura vegetais, não se têm um conhecimento adequado acerca de sua variabilidade espacial e as variáveis ou parâmetros determinantes ao estudo e conhecimento do referido processo ainda não estão plenamente identificados.

Diante do contexto ora apresentado, o presente trabalho teve por objetivos: construir e testar o desempenho de um modelo numérico de zona saturada para o estudo da recarga de águas subterrâneas, ao nível de bacia experimental, para o cerrado da região do Distrito Federal; estimar as taxas e mapear a distribuição espacial da recarga para a referida região e; identificar as variáveis e parâmetros determinantes ao estudo do processo de recarga de águas subterrâneas em ambiente de cerrado.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudos compreendeu a bacia experimental do córrego Capão Comprido, localizada na porção oeste do Distrito Federal, entre os meridianos 48°10'07" e 48°06'13" de longitude oeste e os paralelos 15°43'42" e 15°45'41" de latitude sul, abrangendo uma área de aproximadamente 16 km² (Figura 1).

O clima na região apresenta-se de úmido a sub-úmido, com estações chuvosas e secas bem distintas. A precipitação se concentra nos meses entre setembro e abril e as temperaturas médias do mês mais quente e do mês mais frio são de 24°C e de 10°C, respectivamente. A umidade relativa do ar alcança níveis críticos da ordem de 13%. A precipitação pluviométrica média anual entre os anos de 1972 e 1992 foi da ordem de 1.405 mm (BRASIL, 2003; CAMPOS, 2004). Segundo Reatto *et al.* (2003), o tipo de solo predominante é o latossolo vermelho, ocorrendo, porém em menor escala, a presença de latossolo amarelo e cambissolos. Com relação à cobertura vegetal natural, são encontradas matas ciliares e remanescentes típicos do cerrado, como campo limpo, campo cerrado e cerrado. Trata-se de uma bacia predominantemente rural, ocupada por propriedades de pequenas dimensões, nas quais são praticadas a olericultura e a fruticultura.

Os materiais utilizados consistiram em dados de campo e planos temáticos de informações cartográfico-espaciais. Os dados de campo, levantados a partir do monitoramento contínuo da referida área de estudos, compreenderam séries históricas de pluviometria, fluviometria, meteorologia, piezo-

metria e informações hidrogeológicas, enquanto que os dados geográficos abrangeram mapas de altimetria do SICAD-Sistema Cartográfico do Distrito Federal, geologia (BRASIL 2003), solos (REATTO *et al.*, 2003), hidrogeologia (BRASIL, 2003) e imagens de satélite do sensor *HRV/SPOT5*. A construção do modelo e as simulações foram efetuadas no software *Visual MODFLOW v.4.2*, enquanto que o preparo e confecção de mapas se deu por meio do software *ArcView GIS 3.2*.

A aplicação da modelagem numérica do fluxo subterrâneo de água à simulação do processo de recarga na área de

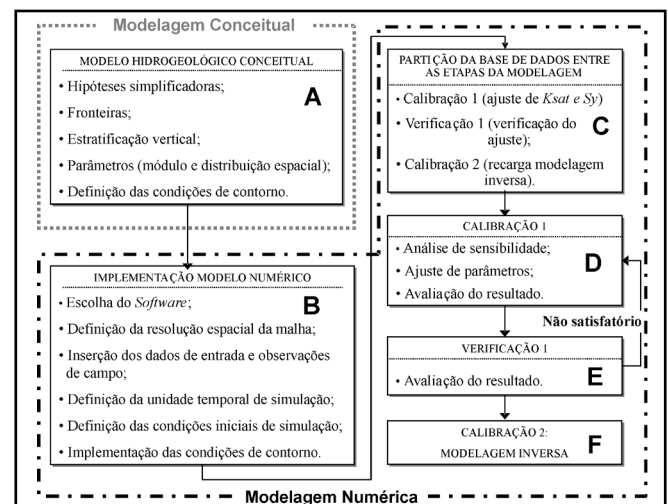


Figura 2 – Etapas modelagem numérica

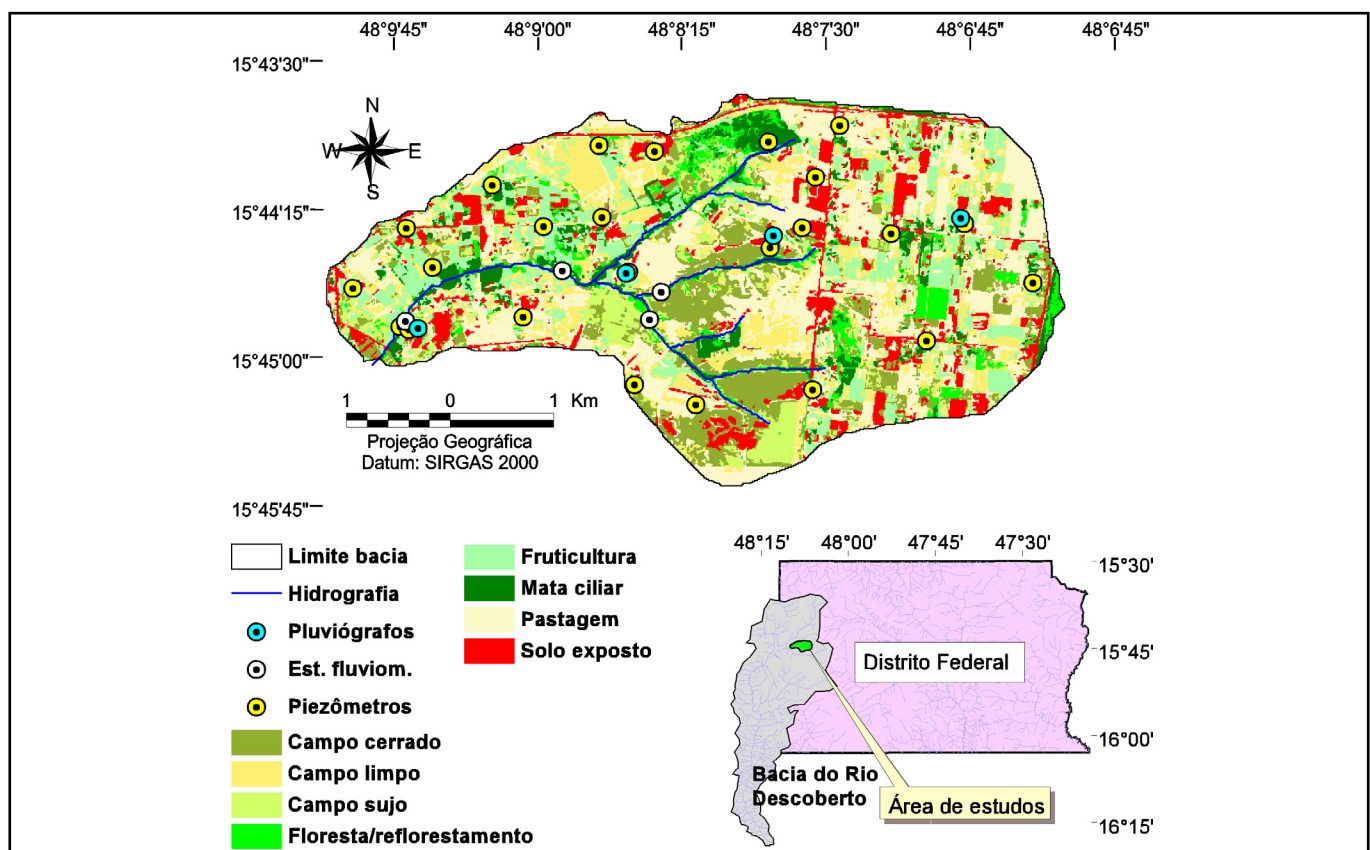


Figura 1 – Localização da área de estudo

estudos se procedeu de acordo com o seguinte raciocínio: (a) a recarga é um dos processos responsáveis pela alteração de estado do sistema aquífero ao longo do tempo. Não se têm disponíveis valores medidos do referido processo para a área de estudo; (b) no entanto, as características “fixas” do sistema (configuração estrutural e propriedades do material aquífero) e as variações temporais do seu comportamento (armazenamento e nível freático) são conhecidas, assim como outros fatores co-responsáveis são mensuráveis (evapotranspiração e descarga para a drenagem superficial); (c) logo, a recarga é a incógnita a ser encontrada. Como se trata de uma informação tipicamente de entrada, o problema pode ser resolvido a partir de modelagem inversa. A metodologia desenvolvida encontra-se apresentada nas próximas seções, seguindo-se a ordem das etapas dispostas na Figura 2.

Modelo hidrogeológico conceitual

O modelo conceitual proposto baseou-se na seguinte lógica: a água da precipitação que percola o solo e atinge a zona saturada (recarga) escoar pelo meio poroso subterrâneo, até atingir a calha da drenagem superficial. Além disso, a evapotranspiração ocorrerá à taxa potencial, sempre que o sistema radicular da cobertura vegetal interceptar o nível freático. A Figura 3 ilustra essa conceitualização.

Por se tratar de um sistema complexo de interações entre águas superficiais e subterrâneas, o levantamento de dados e parâmetros pode exigir um alto nível de detalhamento, o que nem sempre é possível (ENGELHARDT *et al.*, 2014). Desse modo, indo ao encontro do princípio básico da parcimônia, buscou-se um equilíbrio entre complexidade e praticidade, adotando-se as seguintes simplificações:

- O divisor de águas subterrâneas é coincidente ao divisor de águas superficiais;
- O aquífero é horizontalmente isotrópico;
- As descargas do aquífero têm como destino principal a rede hidrográfica local;

- As retiradas de água do aquífero e dos rios perenes são irrelevantes em relação aos volumes totais;
- As perdas do aquífero freático via percolação profunda para o aquífero confinado são irrelevantes em relação aos volumes totais.

O procedimento adotado na definição dos componentes do modelo conceitual encontra-se apresentado nos itens a seguir:

- Fronteira horizontal: área compreendida pela bacia hidrográfica superficial;
- Fronteira vertical superior: nível freático;
- Fronteira vertical inferior: profundidade de ocorrência da rocha impermeável, mapeada com base em informações pontuais fornecidas por empresas perfuradoras de poços tubulares;
- Estratificação vertical: primeira camada: solo residual; segunda camada: substrato geológico;
- Módulo dos parâmetros do aquífero - primeira camada: valores estimados a partir de *slug test* e testes de bombeamento, executados nos poços de monitoramento de até sete metros de profundidade; segunda camada: valores estimados a partir de *slug test* e testes de bombeamento, executados em poços com profundidade superior a sete metros;
- Distribuição espacial dos parâmetros do aquífero - primeira camada: baseada nas classes de solo de Reatto *et al.* (2003); segunda camada: baseada no mapa de substratos de Reatto *et al.* (2003) e no mapa geológico de Brasil (2003);
- Condições de contorno: (i) evapotranspiração - variável no tempo e no espaço, com base em séries obtidas pela aplicação do método Penman-Monteith e na distribuição espacial da profundidade do sistema radicular, estimada por meio do mapa de cobertura vegetal e da profundidade média do sistema radicular, segundo Eiten (1972); (ii) cursos d'água superficiais: rios e córregos; (iii) recarga: variável no tempo e no espaço (apesar de

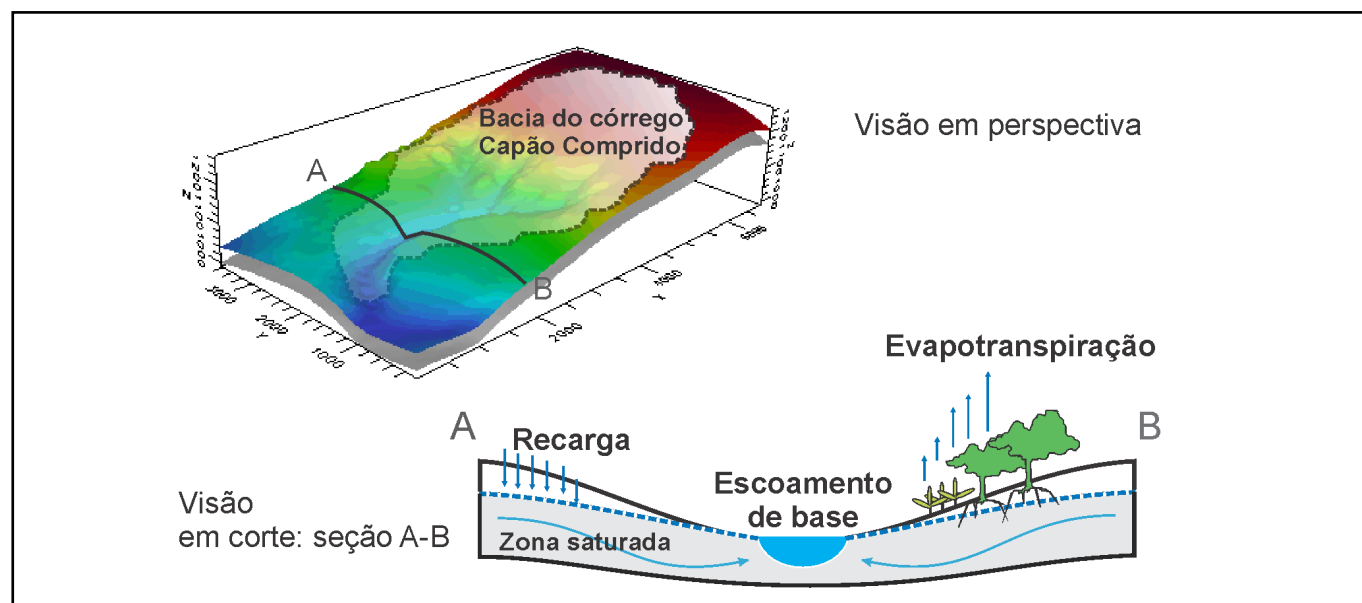


Figura 3 – Modelo hidrogeológico conceitual

ser uma condição de contorno obrigatória, é a incógnita a ser solucionada via modelagem inversa).

A distribuição espacial da recarga foi o elemento chave da metodologia do presente trabalho. Foi obtida a partir da aplicação de lógica *Fuzzy* e de um método multicritério - método AHP (GHOBADI; BABAZADEH; BAGHERI, 2013) à distribuição espacial dos fatores potencialmente determinantes ao processo, conforme sintetiza o fluxograma da Figura 4 (o método adotado para o mapeamento das zonas de recarga é descrito com detalhes em SANTOS, 2012).

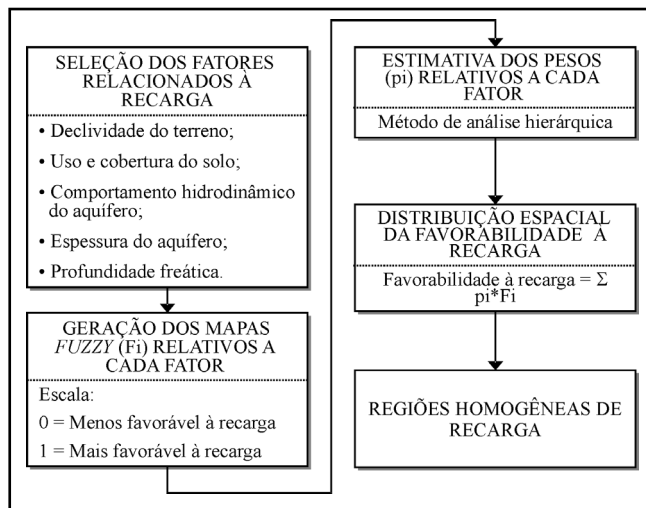


Figura 4 – Procedimento para mapeamento da distribuição espacial da recarga.

Implementação do modelo numérico

Nessa etapa, as fronteiras, a estratificação vertical, os parâmetros do aquífero e as condições de contorno conceituais, foram implementadas computacionalmente utilizando-se o software *Visual MODFLOW v.4.2*, que simula numericamente a movimentação da água no meio poroso por meio de diferenças finitas.

A resolução espacial da malha, fixada em 20 metros, foi definida por tentativas, efetuando-se simulações teste, variando-se o tamanho da célula e verificando-se o nível de alterações na resposta fornecida pelo modelo. As observações compreenderam séries históricas de dados piezométricos, compostas por observações coletadas entre novembro de 2007 e setembro de 2009, e séries de vazões médias diárias. Para a simulação, adotou-se o dia, como passo temporal.

As condições iniciais da modelagem foram expressas pela superfície de carga piezométrica inicial, a partir da qual foram efetuados os cálculos do fluxo. A carga inicial foi estimada a partir da interpolação, por krigagem, dos valores de carga piezométrica medida nos poços de monitoramento.

Em seguida, foram implementadas as condições de contorno referentes à evapotranspiração, à recarga e à drenagem superficial. Para a evapotranspiração, o procedimento consistiu em se importar, da base de dados geográfico-espacial, o arquivo contendo os polígonos de zonas. As taxas diárias para cada zona

foram importadas de planilhas eletrônicas. No caso da recarga, inseriu-se apenas as regiões homogêneas mapeadas segundo o método descrito na Figura 4, uma vez que as taxas, até aqui desconhecidas, foram estimadas por calibração.

Por último, a identificação dos cursos d'água no modelo numérico foi efetuada selecionando-se as células localizadas sobre as linhas da rede hidrográfica perene. Ao se indicar as células sob a referida condição de contorno, foram atribuídos os valores dos parâmetros físicos, associados à calha da drenagem, que definem a interação entre o aquífero e os rios ou córregos, conforme descrito em Han e Endreny (2014). A carga hidráulica foi atribuída tendo-se por base as leituras de régua e de linígrafo nas estações fluviométricas, enquanto que para a elevação do fundo do leito, utilizou-se o modelo digital de elevação.

Partição da base de dados entre as etapas da simulação

A extensão da base de dados foi limitada pela disponibilidade de observações de campo para o nível freático. Dessa forma, o período de simulação compreendeu os meses entre julho de 2008 e setembro de 2009. Como a abordagem adotada compreendeu três etapas, a base de dados ficou assim dividida: Parte I – julho, agosto, setembro e outubro de 2008, para a calibração do modelo ajustando-se as propriedades do aquífero; Parte II – junho, julho, agosto e setembro de 2009, para a verificação da calibração efetuada na parte I; Parte III – Outubro de 2008 a maio de 2009, para a simulação da recarga ocorrida na estação chuvosa de 2008/2009, a partir de modelagem inversa via calibração automática.

Com o intuito de se eliminar/atenuar os efeitos das condições iniciais na resposta do modelo, foram implementados “períodos de aquecimento” em cada uma das etapas da modelagem numérica (“Calibração I”, “Verificação” e “Calibração II”, na Figura 2), replicando-se sucessivamente os dados. Para a análise dos resultados considerou-se apenas o último ciclo.

Calibração I

Essa etapa teve por objetivo o ajuste dos parâmetros/propriedades do aquífero: condutividade hidráulica saturada - K_{sat} , e coeficiente de produtividade específica - S_y .

Conforme pode ser observado na seção anterior, os dados destinados à calibração se referem a um período de seca. O motivo para tal escolha foi eliminar a recarga como incógnita, uma vez que a mesma foi considerada nula durante o referido espaço de tempo. Assim, restaram como parâmetros ajustáveis apenas K_{sat} e S_y . A principal consequência dessa solução é a redução da incerteza individual dos parâmetros calibrados, gerada quando se calibra conjuntamente mais de um parâmetro (YANG *et al.*, 2013).

A calibração foi efetuada manualmente, por meio da qual foi buscado o conjunto de valores dos parâmetros que melhor representasse as propriedades do aquífero. Os valores de K_{sat} e S_y estimados em campo via *slug tests* e testes de bombeamento serviram como escala de referência de grandeza e como estimativas iniciais para o processo de calibração.

As observações temporais do nível freático na rede de piezômetros e estimativas de escoamento de base obtidas via separação de hidrógrafa pelo método da análise de sinais, proposto por Lyne e Hollick (1979) e descrito em detalhes por Santos (2012), foram adotadas como referência na avaliação da qualidade do ajuste do modelo. Os valores simulados foram confrontados com valores observados.

Verificação I

Após a calibração do modelo, procedeu-se à sua verificação, que consistiu na aplicação do mesmo modelo, com os parâmetros calibrados, a outro período temporal de observações de campo. Semelhantemente à etapa de calibração, o resultado foi avaliado a partir da confrontação entre os valores simulados e observados de nível freático e de escoamento de base. Índices estatísticos como o de Nash-Sutcliffe e o Erro Médio Absoluto foram utilizados na avaliação.

Calibração II: Modelagem Inversa

O modelo calibrado e verificado foi aplicado à simulação das taxas *transientes* de recarga, utilizando-se agora, dados referentes a um período chuvoso, no qual ocorreu o aporte de água ao aquífero a partir da infiltração e percolação da precipitação pluvial. A abordagem adotada para a estimação das taxas compreendeu a busca, por calibração automática, dos valores para cada região homogênea de recarga mapeada. Foi utilizado o estimador de parâmetros do *Visual Modflow*, o *WinPEST – Parameter estimator*, descrito em detalhes por Engelhardt *et al.* (2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Módulo e distribuição espacial das propriedades do aquífero

A partir das estimativas pontuais de K_{sat} e S_y , percebeu-se na bacia a existência de regiões hidrogeológicas distintas, uma vez que valores de mesma grandeza se localizaram, de um modo geral, em áreas de mesmo tipo de solo e/ou substrato geológico. Esta constatação serviu de base à espacialização dos valores pontuais em regiões, compreendendo, verticalmente, o solo e o substrato geológico e, horizontalmente, as classes de solo e tipos de formações/substrato. Foram adotados valores médios para cada região.

Nas figuras 5 e 6 são apresentados os mapas de distribuição espacial das propriedades do aquífero para as duas camadas do modelo conceitual e numérico (solo e substrato geológico). A Figura 7, por sua vez, apresenta uma seção transversal do modelo, na qual se observa o limite vertical sugerido para as duas camadas e as diferentes zonas quanto aos valores dos parâmetros K_{sat} e S_y . As classes de solo do tipo *cambissolo* e *gleissolo* não foram contempladas com ensaios para determinação de K_{sat} e S_y . Estimativas dos referidos parâmetros hidrodinâmicos para tais solos foram extraídas de Lousada, (2005).

Na primeira camada, os maiores valores de K_{sat} e S_y

estão associados à ocorrência de latossolos e de plintossolos, enquanto que na segunda camada, os substratos metarritmito arenoso e aluvião holocênico respondem pelos maiores valores.

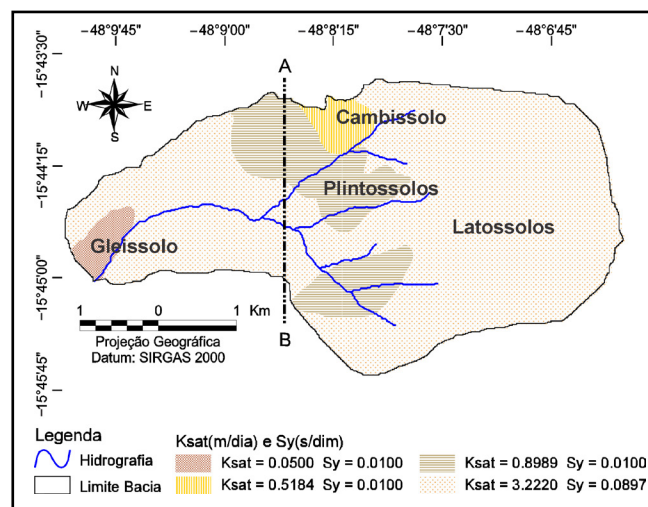


Figura 5 – Distribuição espacial de K_{sat} e S_y , 1ª camada

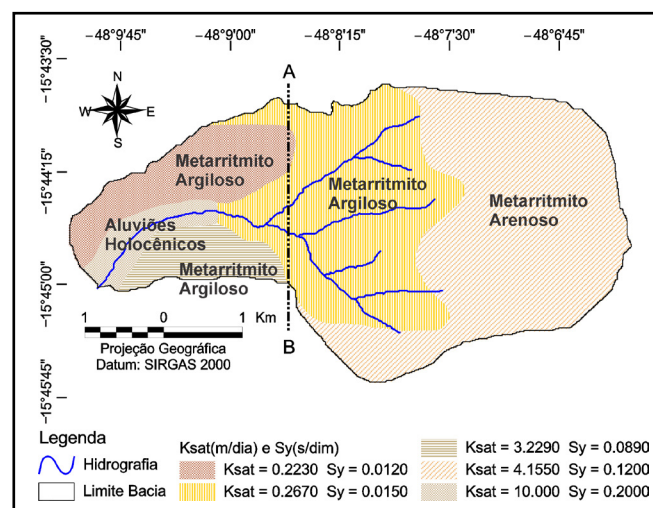


Figura 6 – Distribuição espacial de K_{sat} e S_y , 2ª camada

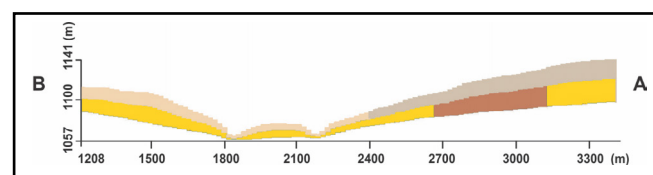


Figura 7 – Distribuição vertical das camadas do modelo

Mapeamento das regiões homogêneas de recarga

Aplicando-se os coeficientes da matriz de comparação ao algoritmo do método AHP, foram obtidas as estimativas dos pesos, referentes à importância relativa de cada fator no processo de recarga (Tabela 1).

Tabela 1 – Importância relativa estimada dos fatores relevantes ao processo de recarga na área de estudo

Fator	Peso estimado
K_{sat} substrato	0,1906
S_y substrato	0,1885
Tipo de solo	0,1885
Declividade do terreno	0,1629
Uso e cobertura do solo	0,1515
Espessura do aquífero	0,0703
Profundidade freática	0,0477

Os valores da matriz de comparação bem como os pesos estimados, compreenderam hipóteses, sobre o processo de recarga na área estudada, detalhadas em Santos (2012). A comprovação de sua validade foi efetuada *a posteriori*, analisando-se a distribuição espacial das taxas simuladas de recarga. A menor importância relativa (peso) estimada para os fatores “*espessura do aquífero*” e “*profundidade freática*” se deveu ao fato de os mesmos apresentaram pouca variabilidade espacial na área de estudo.

Por último, de posse dos mapas *fuzzy* e dos respectivos pesos, efetuou-se o mapeamento da área de estudo quanto à variabilidade espacial do favorecimento à recarga, conforme ilustrado na Figura 8. Como a distribuição espacial gerada apresenta escala contínua, de zero a um (menor e maior favorabilidade à recarga, respectivamente), efetuou-se uma reclassificação do mesmo em nove zonas, dentro das quais a recarga, em hipótese, apresenta valores de mesma amplitude. Como resultado, gerou-se as regiões homogêneas de recarga, apresentadas no mapa da Figura 9.

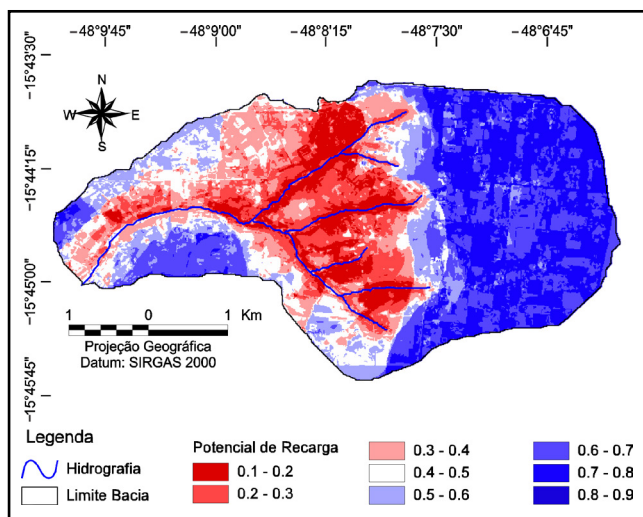


Figura 8 – Distribuição espacial da favorabilidade à recarga de águas subterrâneas.

Preliminarmente, observou-se que as zonas mais favoráveis à recarga estão associadas às áreas cobertas por pastagens e solos expostos, sobre latossolos e metarritmito arenoso.

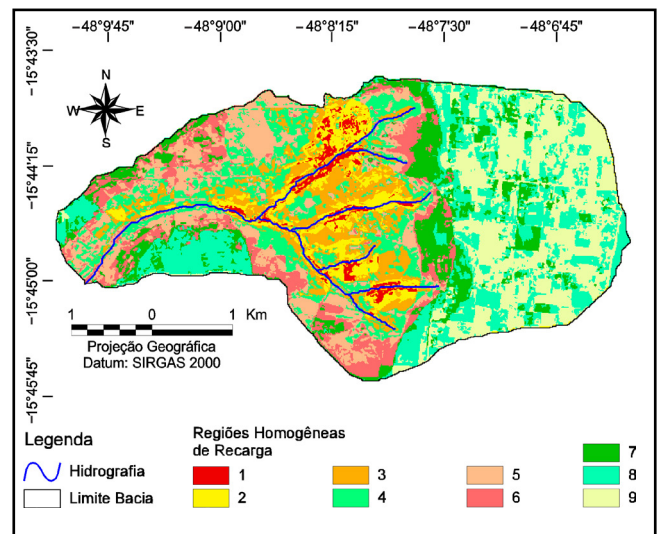


Figura 9 – Regiões homogêneas de recarga

Primeira calibração

Na etapa referente à primeira calibração, foram ajustados manualmente o valor dos parâmetros “ K_{sat} ” e “ S_y ”, referentes às propriedades do aquífero, tendo-se como informações de controle as cargas piezométricas medidas e as vazões de base estimadas via separação de escoamentos.

Em alguns pontos, a diferença percentual entre o valor atribuído e calibrado de K_{sat} apresentou-se alta, superior a 40%. Não se pôde definir precisamente a causa de tal diferença, uma vez que os valores atribuídos às zonas tiveram como base estimativas obtidas pontualmente. Como a condutividade é um parâmetro que pode apresentar alta variabilidade espacial, a possibilidade de que algumas estimativas pontuais não tenham sido representativas para as suas zonas é real. No entanto, como a maioria das diferenças apresentou-se baixa, da ordem de 10 %, pode-se concluir que para a maior parte da área de estudo, os valores calibrados de K_{sat} representam razoavelmente o comportamento do aquífero. No caso do S_y , as diferenças entre os valores atribuídos e calibrados para as zonas apresentaram-se baixas. Consequentemente, os valores calibrados foram aceitos.

Avaliando-se o desempenho do modelo com os valores calibrados de K_{sat} e S_y , observou-se que, de uma maneira geral, o módulo dos resíduos para as cargas piezométricas apresentou-se baixo. Conforme se observa na Tabela 2, a maior frequência (65% do total) foi de resíduos menores que um, enquanto que apenas 10% apresentaram resíduos maiores que dois.

Tabela 2 – Frequência percentual de resíduos (primeira calibração)

Resíduos abs. (m)	Frequência	Frequência (%)
Menor que 1,0	74	65
Entre 1,0 e 1,5	25	22
Entre 1,5 e 2,0	4	4
Maior que 2,0	11	10
Total	114	100
Resíduo médio (m):	0,04	
Resíduo médio absoluto (m):	0,86	
Resíduo mínimo (m):	0,00	
Resíduo máximo (m):	-4,44	

Com relação ao índice de Nash-Sutcliffe, observou-se que somente sete piezômetros apresentaram valores considerados satisfatórios, entre zero e um. Tal avaliação não deve ser levada em consideração isoladamente, uma vez que o índice tende a apresentar melhores valores para séries mais longas e quando há maior semelhança entre a forma das curvas simuladas e observadas, mesmo que em termos volumétricos a diferença seja grande. Em alguns piezômetros, por exemplo, a diferença entre os valores simulados e observados situou-se entre zero e um metro, em termos absolutos, exibindo, no entanto, índices negativos. Sob a ótica do *E.M.A.* o desempenho geral mostrou-se melhor, com 13 piezômetros apresentando valores menores que um metro.

A validade da calibração também depende da consistência dos fluxos de base simulados pelo modelo. Deste modo, apresenta-se na Figura 10, os valores de escoamento de base simulados e observados, bem como o coeficiente de correlação e o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe.

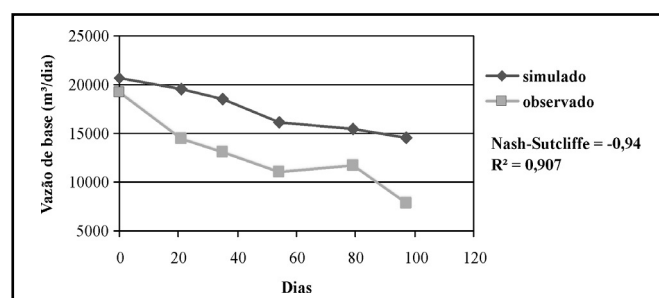


Figura 10 – Descarga de base: observada x simulada (calibração)

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe calculado não foi satisfatório. Com exceção do primeiro ponto das séries, a diferença entre as vazões simuladas e observadas permaneceu aproximadamente constante, da ordem de 5.000 m³/dia. O erro percentual médio foi da ordem de 32%, do simulado em relação ao observado, valor considerado alto, segundo Wu *et al.* (2006), mas próximo da zona considerada razoável, entre 10 e 30%.

Não se conseguiu atingir melhores resultados que os apresentados, motivo pelo qual a calibração foi aceita e passou-se à etapa seguinte (verificação), utilizando-se os parâmetros calibrados (K_{sat} e S_y).

Foi avaliado o grau de importância dos parâmetros K_{sat} e S_y no modelo numérico. Aplicando-se uma variação aos referidos parâmetros, de 10% em relação ao valor original, verificou-se que K_{sat} ocasiona um maior impacto na resposta do modelo, alterando os valores de recarga simulada em 18%. No caso do S_y , os valores de recarga sofreram uma alteração de 12%.

Verificação

O modelo calibrado foi submetido à verificação, utilizando dados referentes a um outro período temporal. Inicialmente, observou-se que o desempenho e os problemas apresentados na etapa anterior se repetiram. Relaxando-se então a hipótese simplificadora inicialmente assumida; da não entrada de água em época de estiagem, os resultados melhoraram significativamente, indicando que: (a) os valores e a distribuição espacial dos parâ-

metros K_{sat} e S_y ainda necessitam de ajustes; (b) o delineamento conceitual necessita de ajustes; ou (c) há realmente entrada de água vinda de outras fontes além da precipitação, consideração razoável, em se tratando de pequenas bacias e regiões localizadas próximas ao divisor de águas.

Como as entradas simuladas de água via recarga em época de estiagem foram pequenas em relação ao volume total, aceitou-se o modelo conceitual testado, bem como os valores calibrados dos parâmetros K_{sat} e S_y . O melhor desempenho do modelo nessa etapa em relação à calibração pode ser verificado por meio da análise global dos resíduos, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Desempenho geral do modelo: verificação

Resíduos abs. (m)	Frequência	Frequência (%)
Menor que 1,0	66	87
Entre 1,0 e 1,5	4	5
Entre 1,5 e 2,0	4	5
Maior que 2,0	2	3
Total	76	100
Resíduo médio (m):		0,10
Resíduo médio absoluto (m):		0,56
Resíduo mínimo (m):		0,00
Resíduo máximo (m):		2,12

Um número maior de resíduos (87%) foi menor que um metro, assim como os valores médios e máximos absolutos situaram-se abaixo dos calculados na etapa anterior. No caso do índice de Nash-Sutcliffe, dos 19 valores expressos pelos piezômetros, 13 se apresentaram na faixa considerada razoável, entre zero e um. Quanto ao *E.M.A.*, apenas dois piezômetros exibiram valor acima de um metro.

No que se refere à vazão de base simulada, observou-se desempenho semelhante em relação ao exibido na etapa de Calibração I: índice de Nash-Sutcliffe e Erro Médio Absoluto fora da região considerada satisfatória, conforme apresentado na Figura 11.

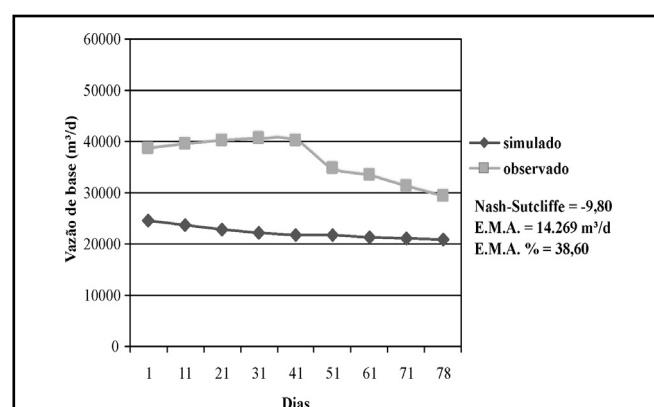


Figura 11 – Descarga de base: observada x simulada (verificação)

Comparando-se os padrões exibidos pelas curvas simuladas e observadas, percebe-se maiores oscilações da segunda em relação à primeira, indicando que o aquífero real responde mais rapidamente que o modelo proposto às “perturbações”

ocasionadas pelo meio externo, como a recarga. Fato semelhante ocorreu na etapa de Calibração I.

Buscando-se uma explicação para o problema anteriormente citado, foram destacados como prováveis causas os valores numéricos assumidos pelos parâmetros “condutância hidráulica dos cursos d’água”, “ K_{sat} ” e “ S_y ”. Ao se alterar os valores de condutância, observou-se que a curva das vazões de base simuladas deslocou-se uniformemente, sem alterações na sua forma. Quanto aos parâmetros K_{sat} e S_y , é necessário lembrar que foram observadas diferenças consideráveis entre algumas estimativas pontuais (obtidas via *slug test* e teste de bombeamento) e o valor final calibrado para a região. Esse fato conduz à suspeita de que há, na área de estudo, uma maior variabilidade espacial de materiais aquíferos em relação ao que foi proposto no modelo.

Maiores valores de K_{sat} e/ou S_y aumentaram a sensibilidade do aquífero às condições de contorno, mas não se conseguiu uma solução que contemplasse adequadamente às duas observações de campo utilizadas como referência (cargas piezométricas e vazões de base). Apesar de ficar evidente a necessidade de melhorias como um todo, o modelo foi aceito para aplicação da etapa seguinte.

Segunda calibração: estimação da recarga via calibração automática

Nesta etapa, o modelo numérico calibrado foi utilizado na simulação das taxas e da distribuição espacial da recarga ocorrida no período chuvoso, entre setembro de 2008 e agosto de 2009. Indiretamente, colocou-se também à prova a validade geral da calibração, uma vez que somente agora o aquífero foi simulado “cheio”.

A maior parte dos resíduos (83%) situou-se entre zero e um metro, com média e média absoluta iguais a 0,25 m e 0,58 m, respectivamente, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Desempenho geral do modelo: calibração II

Resíduos abs, (m)	Frequência	Frequência (%)
Menor que 1,0	157	83
Entre 1,0 e 1,5	13	7
Entre 1,5 e 2,0	12	6
Maior que 2,0	8	4
Total	190	100
Resíduo médio (m):		0,25
Resíduo médio absoluto (m):		0,58
Resíduo mínimo (m):		0,00
Resíduo máximo (m):		3,53

No entanto, é importante destacar que esse melhor desempenho em relação às etapas anteriores se deve ao fato de que, ao se calibrar o modelo por meio das taxas de recarga, mascara-se os erros conceituais e dos parâmetros K_{sat} e S_y , uma vez que agora considera-se a recarga como sendo o único

fator responsável pelas alterações de estado do sistema aquífero. Essa mesma consideração é válida ao se analisar as curvas de cargas piezométricas simuladas “versus” observadas e os valores calculados do Erro Médio Absoluto – E.M.A. e do índice de Nash-Sutcliffe. Nas Figuras 12 e 13 são apresentados dois resultados típicos, representativos dos melhores e dos piores desempenhos alcançados pelo modelo, respectivamente.

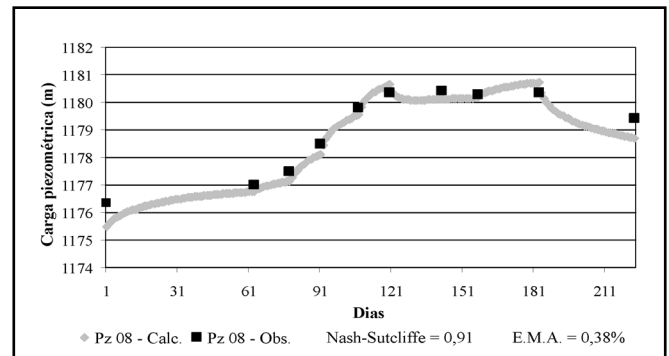


Figura 12 - Séries piezométricas observada e simulada para o piezômetro 08: Calibração II

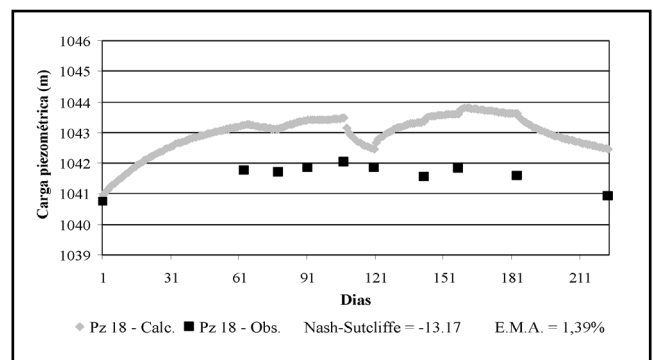


Figura 13 - Séries piezométricas observada e simulada para o piezômetro 18: Calibração II

À exceção do piezômetro 18, dentre os 19 monitorados na área de estudo, todos apresentaram valores de *Nash-Sutcliffe* situados entre “zero” e “um”, sendo que em 14 (~74%), o referido índice alcançou valores maiores que 0,6. No entanto, não se pode afirmar que tal desempenho corresponda a uma estimativa confiável da recarga. Em alguns casos, por exemplo, o valor calculado da recarga compensou os erros advindos da calibração, como no piezômetro 12, local cujo acúmulo de água foi “compensado” a partir de taxas baixas da recarga estimada, não condizentes ao potencial da área, expresso pelo índice de favorabilidade à recarga.

De um modo geral, os valores dos resíduos médios absolutos diminuíram, devido à compensação, pelo valor estimado da recarga, dos erros da calibração (Figura 14).

No que se refere à descarga de base simulada (Figura 15), ficou evidente a diferença entre o padrão real e o padrão simulado da interação aquífero-rio, semelhantemente ao ocorrido nas etapas anteriores.

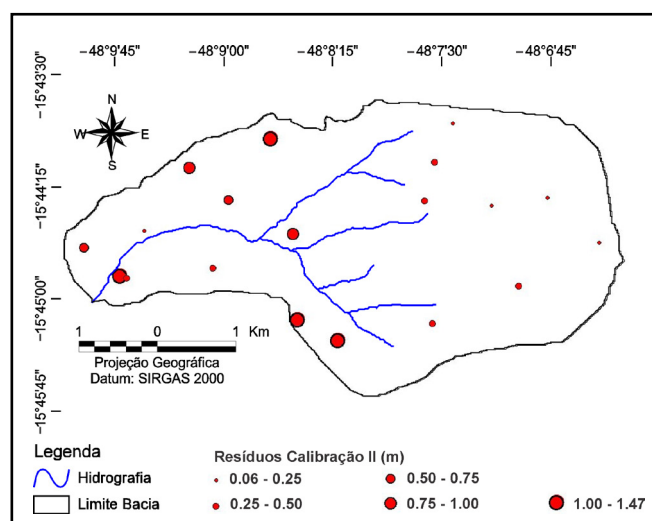


Figura 14 – Distribuição espacial dos resíduos médios absolutos: Calibração II

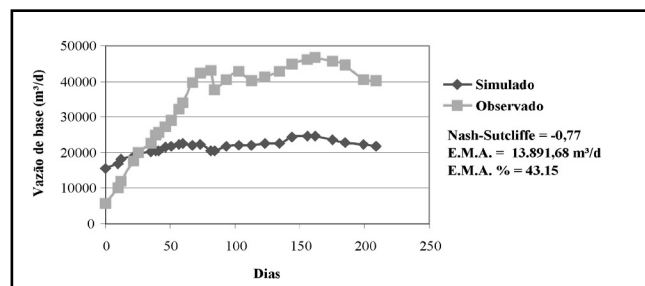


Figura 15 – Descarga de base: observada x simulada (Calibração II)

Até um determinado instante de tempo, os valores simulados superam os valores medidos. Mesmo adotando-se períodos de aquecimento, o problema persistiu, indicando não se tratar de influência das condições iniciais de partida da modelagem. Depois disso, os valores observados superam os simulados, em uma escala média de grandeza de cerca de 40%. Quanto às prováveis causas do baixo desempenho do modelo em simular vazões de base, atribuiu-se anteriormente ao fato de que, provavelmente, os valores e a distribuição espacial, horizontal e vertical, dos parâmetros K_{sat} e S_y ainda necessitam de ajustes.

Há uma dificuldade para se estabelecer a amplitude do ajustamento, bem como indicá-lo seguramente como sendo o único meio para obtenção de melhorias no modelo, uma vez que a própria informação de referência; as estimativas de escoamento de base, também possuem incertezas. Tais incertezas advêm, sobretudo, do empirismo e da arbitrariedade comumente associados aos métodos de separação de escoamentos como um todo (LADSON *et al.*, 2013), não sendo possível mensurar o erro inerente às estimativas. No entanto, a literatura indica que métodos analíticos e matemáticos, como o adotado no presente trabalho, são menos arbitrários e, conseqüentemente, mais confiáveis que os tradicionais métodos gráficos. Arnold *et al.* (1995) e Ladson *et al.* (2013) aplicaram o método em questão, indicando-o como sendo confiável.

Recarga de águas subterrâneas

Na Tabela 5, são apresentadas as taxas estimadas da recarga total anual para cada uma das regiões. As regiões originais “cinco”, “seis”, “sete”, “oito”, “nove” e “dez” foram desmembradas artificialmente, gerando novas regiões de recarga, para proporcionar maior independência no processo de busca iterativa das taxas pelo *WinPEST*.

Tabela 5 – Taxas de recarga estimadas

Região Homogênea	Recarga total anual (mm)	Recarga período chuvoso (mm/ano)	Recarga período seco (mm/ano)
1	33	33	0
2	42	42	0
3	302	212	90
4	46	46	0
5	473	421	52
6	545	497	48
7	1101	1073	28
8	206	166	40
9	377	377	0
10	471	357	113
11	1266	913	352
12	473	473	0
13	279	279	0
14	1257	993	264
15	1555	990	564
16	1168	984	184
17	430	411	20
18	154	154	0
19	1136	1136	0
20	91	91	0
21	194	194	0
22	1549	1368	182
23	613	410	203
24	1182	989	194

Analisando-se os valores totais, observou-se que em alguns locais ocorreram eventos de recarga em períodos secos. Foi o caso das regiões “três”, “cinco”, “seis”, “sete”, “oito” e “17”, cujos valores extemporâneos alcançaram entre 1% e 6% da precipitação total do período, e das regiões “dez”, “11”, “14”, “15”, “16”, “22”, “23” e “24”, onde o aporte de água em ausência de chuvas variou entre 8% e 40% da precipitação.

Os maiores valores de recarga foram observados em áreas próximas ao divisor de águas e às linhas de contato entre formações geológicas de comportamento hidrodinâmico diferentes, como o metarritmito arenoso e o metarritmito argiloso. Em algumas dessas áreas a recarga total superou a precipitação

anual, fato que pode indicar tanto a entrada de água via fluxos laterais, quanto a alguma deficiência local ou regional do modelo, seja em termos de delineamento conceitual, ou de valores assumidos para os parâmetros. Em cerca de 14% da área total da bacia a recarga durante o período seco foi maior que 7% em relação à precipitação total anual.

Considerando-se apenas a recarga ocorrida durante o período efetivo de chuvas, houve uma redução nos valores apresentados pelas áreas citadas, como no caso da região 15, que sofreu redução de cerca de 40% em relação ao valor total.

No entanto, em se tratando de recarga advinda da precipitação, alguns valores ainda foram considerados demasiadamente altos, por alcançarem quase 100% do volume da chuva total anual (~ 1500 mm). Assumindo-se então que a recarga ocorrida no período seco representa aportes laterais ou compensações de deficiências do modelo, e que a mesma se mantém durante o período efetivo de chuvas, os valores mais prováveis da recarga advinda exclusivamente da precipitação pluvial foram estimados (Figura 16) subtraindo-se os mapas referentes aos dois períodos. O mapa dos valores mais prováveis de recarga foi confrontado com o mapa original de regiões homogêneas, com o objetivo de se verificar a consistência desse último (Figura 17).

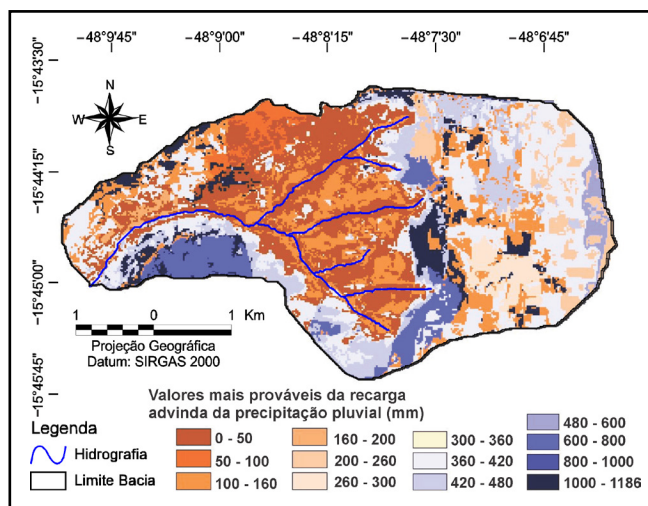


Figura 16 – Distribuição espacial estimada da recarga advinda exclusivamente da precipitação pluvial

As divergências entre o *ranking* preliminarmente estabelecido e os valores simulados ficaram por conta das regiões “três” e “quatro”, e das regiões “sete”, “oito”, “nove”, e “dez”. Entre as duas primeiras, a divergência foi considerada aceitável, uma vez que foi menor que 10% em relação ao valor expresso pela região “três”. O mesmo não aconteceu com a região “sete”, cujo valor médio de recarga superou em cerca de 100% a lâmina estimada para as regiões “oito” e “nove”, e 50 % em relação à região “dez”. A incoerência entre o *ranking* previsto e a recarga média estimada para as regiões “seis”, “oito” e “nove” foi considerada aceitável.

Apesar da maioria dos valores simulados de recarga confirmar a posição prevista das regiões no *ranking*, é importante destacar que o artifício adotado nesse trabalho; de se mapear previamente zonas hipoteticamente homogêneas, foi uma solu-

ção adotada visando a exequibilidade da modelagem numérica. Sem essa simplificação, cada célula do modelo poderia assumir um valor próprio de recarga, resultando em uma quantidade impraticável de parâmetros (taxas de recarga) a serem calibrados.

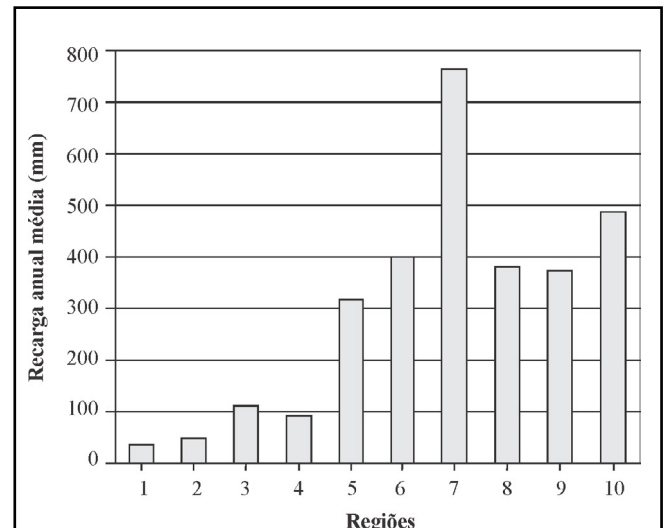


Figura 17 – Regiões homogêneas de recarga, dispostas em ordem crescente quanto ao potencial de recarga previsto, “versus” taxas simuladas de recarga.

O método proposto para o mapeamento prévio das regiões de recarga representa uma melhoria no que diz respeito à construção de modelos numéricos de zona saturada, uma vez que, ainda que o método AHP seja conceitualmente empírico, buscou-se reproduzir, via lógica *fuzzy*, a base física do processo. Tradicionalmente, a definição de tais zonas nos modelos era efetuada de modo arbitrário e manual.

No entanto, como o processo de definição das zonas levou em consideração tanto fatores de superfície quanto fatores subterrâneos, é provável que o efeito individual do uso/cobertura da terra, no processo de recarga, tenha se “diluído” nas regiões homogêneas. Segundo Gaspar (2006) e Oliveira *et al.* (2015), em áreas de cerrado, esse fator é determinante e, consequentemente, áreas individuais altamente favoráveis à recarga podem ter o seu potencial equivocadamente rebaixado, ao se assumir um valor único por região. Esse fato também pode estar associado ao baixo desempenho do modelo na simulação da descarga de base, visto que algumas áreas cobertas por pastagens e campos-limpas, citadas por Oliveira *et al.* (2015) como sendo altamente favoráveis, apresentaram taxa simuladas abaixo do esperado, mesmo que sobre solos e substrato de alta condutividade hidráulica.

Percentualmente, em relação à precipitação total ocorrida no ano hidrológico 2008/2009, a distribuição espacial da recarga total anual, apresentou-se conforme o mapa da Figura 18, considerando-se os valores mais prováveis, advindos exclusivamente das chuvas.

Apesar das limitações do modelo numérico, a ordem de grandeza das taxas simuladas de recarga situou-se próxima à prevista em Oliveira *et al.* (2015); de 50% em relação à precipitação. A ocorrência de taxas simuladas maiores que essa

referência, embora incomuns e extremamente altas, não pode ser considerada improvável, em se tratando de solos do cerrado. Durante os trabalhos de campo, na execução de ensaios de permeabilidade de superfície, observou-se que certos latossolos de textura argilosa apresentaram comportamento hidrológico equivalente ao de areias.

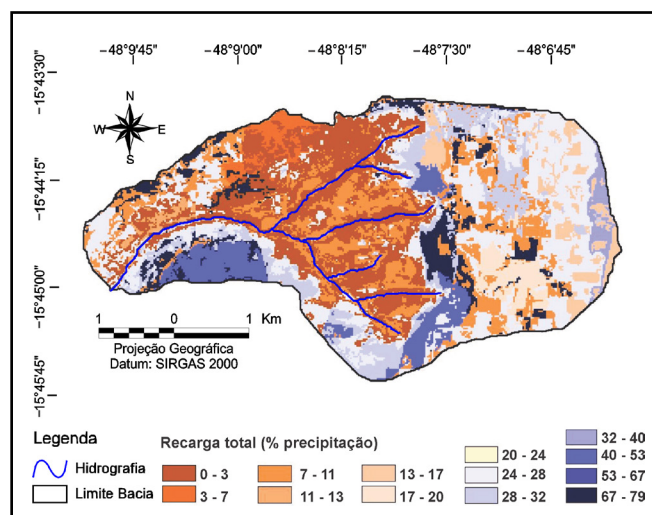


Figura 18 – Distribuição espacial estimada da recarga de águas subterrâneas na área de estudos

De um modo geral, o tipo de solo foi o fator predominante na regulação da recarga, responsável pelos maiores valores médios. Esse resultado é convergente às discussões efetuadas por Gaspar (2006) e Oliveira *et al.* (2015), sobre o papel do referido fator na recarga em áreas de cerrado. Os menores valores foram associados a áreas de maior declividade, sobre metarritmito argiloso e em zonas de menor espessura do aquífero freático, próximas à drenagem superficial (áreas de descarga). Quanto ao papel do uso/cobertura da terra, as áreas de solo exposto, ou cobertas por pastagem ou campo limpo, apresentaram maiores taxas médias simuladas que as demais classes.

CONCLUSÃO

O modelo conceitual e o modelo numérico propostos não puderam ser considerados definitivos, uma vez que o seu desempenho, avaliado por meio da comparação entre cargas piezométricas e vazões de base medidas e simuladas, foi considerado fraco. Dentre as inúmeras causas possivelmente associadas ao baixo desempenho, destaca-se a insuficiência dos dados levantados sobre os valores e distribuição espacial, horizontal e vertical, das propriedades hidráulicas, K_{sat} e S_y , dos solos e dos substratos geológicos. Durante as simulações, observou-se uma forte dependência da resposta do modelo em relação aos referidos fatores.

O mapeamento “pré-simulação” das zonas de recarga também foi considerado um fator limitante do desempenho do modelo, por “diluir” o papel individual, no processo de recarga, de áreas com uso/cobertura da terra sabidamente favoráveis, como pastagens e formações campestres. Por outro lado, acre-

ditase que o artifício em questão representou uma melhoria significativa no tratamento da recarga em modelagem numérica de zona saturada, pois a forma tradicionalmente utilizada para isso é arbitrária e manual.

No que se refere à estimação da recarga, mesmo com as limitações apresentadas pelo modelo, as taxas simuladas foram consideradas uma aproximação aceitável dos valores reais mais prováveis ocorridos no período analisado. Alguns valores simulados notadamente altos, considerados incomuns, também podem ser considerados possíveis, em se tratando de áreas de cerrado. Oliveira *et al.* (2015) corroboram tal afirmação, ao relatarem taxas de recarga da ordem de 50% em relação à precipitação, em áreas não perturbadas de cerrado. Além disso, observou-se em campo que os latossolos da área de estudo têm comportamento hidrológico similar ao de areias e, consequentemente, alto potencial de recarga.

Quanto aos fatores determinantes, observou-se que as maiores taxas de recarga ocorreram em áreas de latossolos vermelhos e vermelhos amarelos, em zonas de baixa declividade (0% – 5%), com solos expostos ou cobertos por campos e pastagens, sobre metarritmito arenoso. O fator “solo” foi decisivo, seguido pela declividade e pelo tipo de substrato geológico. Tal conclusão, embora esperada, pelo modelo proposto simular apenas a zona saturada, atesta o grau de importância dos parâmetros K_{sat} e S_y à viabilidade da metodologia proposta, pois ambos são associados ao solo e ao substrato.

Levando-se em consideração a predominância de solos de alta permeabilidade no cerrado, como observado na área de estudos, pode-se concluir que, por fim, os fatores de superfície, como tipo de uso/cobertura da terra e padrão espacial e temporal das precipitações, tendem a regular o processo de recarga nesse bioma. Neste caso, o modelo proposto também apresenta limitações.

Os resultados, apesar de preliminares, indicam que a adoção de um valor médio regional de recarga, (simplificação frequentemente adotada pelos órgãos gestores) pode não ser a melhor alternativa para a gestão de águas em áreas de cerrado. Ao não se considerar a variabilidade espacial do processo, as taxas utilizadas nos critérios de outorga de uso da água subterrânea ou nas legislações de regulação do uso/cobertura da terra podem ser tanto superestimadas quanto subestimadas, em relação às taxas reais, prejudicando a conservação e uso sustentável dos recursos hídricos ou restringindo o desenvolvimento econômico. Isto pode ser percebido comparando-se o mapa obtido via modelagem numérica com o mapa da recarga potencial no Distrito Federal, da ADASA: devido à escala regional deste, quase toda a área de estudo apresentou valores da ordem de 20% em relação à precipitação.

Neste sentido, em concordância com Oliveira *et al.* (2015), dentre as técnicas disponíveis para o estudo da recarga, modelagem distribuída, como a abordagem proposta no presente trabalho, é o método mais adequado. Campos (2004), Gaspar (2006), Lousada e Campos (2006), Lousada e Campos (2011) e Pacheco (2012) aplicaram método pontuais, baseados em medições do nível freático, utilização de traçadores e balanço hídrico concentrado.

Por se tratar de uma primeira tentativa de simulação,

via modelagem numérica distribuída, do processo hidrológico em questão, para uma área típica de cerrado, considera-se que os resultados obtidos têm validade, no mínimo, como ponto de partida para a execução de estudos mais aprofundados, que após executados, podem ter seus métodos e/ou resultados transpostos para outras áreas com características físicas similares. Sendo assim, como sugestões para trabalhos futuros, sugere-se um maior empreendimento de esforços e recursos na caracterização do meio aquífero e uma melhor alternativa metodológica para a caracterização da variabilidade espacial das zonas de recarga, o que poderia ser feito acoplando-se o modelo numérico a um modelo de zona vadosa, no qual a distribuição espacial da recarga distribuída de saída fosse utilizada como mapa de recargas de entrada no modelo numérico.

AGRADECIMENTOS

Ao servidor Irioman Júnior, pelo apoio nas atividades de campo, à EMBRAPA - Cerrados, pela cessão de dados meteorológicos, ao CNPq, à CAPES e à FAP-DF, pela concessão da bolsa de doutorado e auxílio financeiro à execução do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; MUTTIAH, R.; BERNHARDT, G. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Groundwater*, v. 33, n. 6, p. 1010 – 1018, Nov/Dec. 1995. Disponível em <<http://info.ngwa.org/GWOL/pdf/952964077.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2015.
- AYVAZ, M. T.; ELÇI, A. Groundwater Recharge Rate and Zone Structure Estimation Using PSOLVER Algorithm. *Groundwater*, v. 52, n. 3, p. 434 – 447, May/June 2014. Disponível em <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gwat.12077/epdf>>. Acesso em: 02 jul. 2015.
- BRASIL. Zoneamento Ecológico-Econômico da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno: Fase I. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, EMBRAPA, MI/SCO: Rio de Janeiro, 2003. CD-ROM.
- CAMPOS, J. E. G. Hidrogeologia do distrito federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, n. 1, p. 41 – 48, mar. 2004. Disponível em <<http://rbg.sbgeo.org.br/index.php/rbg/article/viewFile/A-1372/782>>. Acesso em: 22 jun. 2015.
- CARRERA-HERNÁNDEZ, J. J.; SMERDONB, B. D.; MENDOZA, C. A. Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: Sensitivity to boundary conditions and vertical discretization. *Journal of Hydrology*, v. 452 – 453, p. 90 – 101, May 2012. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0022169412004283/1-s2.0-S0022169412004283-main.pdf?_tid=1f7aef58-776a-11e5-8e32-00000aacb360&acdnat=1445373518_7b6898b6f403e74388792ba841f49b1d>. Acesso em: 19 out. 2014.
- CARVALHO, V. E. C.; REZENDE, K. S.; PAES, B. S.; BETIM, L. S.; MARQUES, E. A. G. Estimativa da Recarga em uma Sub-bacia Hidrográfica Rural Através do Método da Variação do Nível Freático. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 271 – 280, jan/mar. 2014. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/cd84bcd4e609b578e0fc640815f28a504e0b29256a67d4eb8680af94d105d60.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2015.
- EITEN, G. The cerrado vegetation of Brazil. *Botanical Review*, v. 38, n. 2, p. 201-341, jun. 1972. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02859158#page-1>>. Acesso em: 02 jun. 2009.
- ENGELHARDT, I.; AGUINAGA, J. G.; MIKAT, H.; SCHUTH, C.; LIEDL, R. Complexity vs. Simplicity: Groundwater Model Ranking Using Information Criteria. *Groundwater*, v. 52, n.4, p. 573–583, July/Aug. 2014. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gwat.12080/epdf>>. Acesso em: 08 set. 2014.
- FIORILLO, F.; PAGNOZZI, M.; VENTAFRIDDA, G. A model to simulate recharge processes of karst massifs. *Hydrological Processes*, v. 29, n. 1, p. 2301 – 2314, Jan. 2015. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.10353/epdf>>. Acesso em: 10 set. 2015.
- GASPAR, M. T. P. Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional e Propostas de Gestão. 2006. 158f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- GHOBADI, M. H.; BABAZADEH R.; BAGHERI V. Siting MSW landfills by combining AHP with GIS in Hamedan province, western Iran. *Environmental Earth Sciences*, v. 70, n. 4, p. 1823-1840, Feb. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-013-2271-9#page-1>>. Acesso em: 09 set. 2014.
- HAN, B.; ENDRENY, T. A. Comparing MODFLOW simulation options for predicting intra-mender flux. *Hydrological Processes*, v. 28, n. 11, p. 3824–3832, May 2014. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.10186/epdf>>. Acesso em: 02 set. 2014.
- HE, J.; MA, J.; ZHANG, P.; TIAN, L.; ZHU, G.; EDMUNDS, W. M.; ZHANG, Q. Groundwater recharge environments and hydrogeochemical evolution in the Jiuquan Basin, Northwest China. *Applied Geochemistry*, v. 27, n. 4, p. 866 – 878, Apr. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292712000182>>. Acesso em: 9 abr. 2014.
- LADSON, A. R.; BROWN, R.; NEAL, B.; NATHAN, R. A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter. *Australian Journal of Water Resources*, v. 17, n. 1,

p. 25 – 34, Sept. 2013. Disponível em <http://www.researchgate.net/publication/259150529_A_standardapproach_to_base-flow_separation_using_the_Lyne_and_Hollick_filter>. Acesso em: mar. 2015.

LIMA, J. E. F. W. Situação e Perspectivas Sobre as Águas do Cerrado. *Ciência e Cultura*, v. 63, n. 3, p. 27-29, jul. 2011. Disponível em: <<http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v63n3/a11v63n3.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2015.

LYNE, V.; HOLLICK, M. Stochastic timevariable rainfall-runoff modeling. In: *Hydrology and Water Resources Symposium*, 1979, Perth. *Proceedings...* Perth, 1979. p. 89 -92.

LOUSADA, E. O. Estudos Hidrogeológicos e Isotópicos no Distrito Federal: Modelos Conceituais de Fluxo. 2005. 127f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2005.

LOUSADA, E. O.; CAMPOS, J. E. G. Correlação entre Precipitação e Piezometria em Aquíferos Freáticos: Implicações para o Planejamento dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Jardim – DF. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n. 4, p. 37 – 46, out/dez. 2006. Disponível em <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/5c9faa6239e7a97065a7ba-2de8e314aa_be86c5c15dc3c491a2dcb512ffb3a3c2.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2012.

LOUSADA, E. O.; CAMPOS, J. E. G. Estudos isotópicos em águas subterrâneas do Distrito Federal: subsídios ao modelo conceitual de fluxo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, n. 2, p. 355 – 365, jun. 2011. Disponível em <<http://rbg.sbgeo.org.br/index.php/rbg/article/view/10841>>. Acesso em: 18 maio 2012.

MELLO, R. M.; CASTRO, C. M. Exploração de água subterrânea no Distrito Federal. Gestão por sistema hidrogeológico. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, XIX., 2011, Maceió. *Anais...* Maceió – AL, 2011. p. 1 – 18. Disponível em <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/15103eda498dcedb308941ce2f3bed29_0f4464b80794a-036ed808c6a81fd335d.pdf>. Acesso em: 10 maio 2012.

NEUKUM, C.; AZZAM, R. Impact of climate change on groundwater recharge in a small catchment in the Black Forest, Germany. *Hydrogeology Journal*, v. 20, n. p. 547-560, 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10040-011-0827-x>>. Acesso em: 6 jul. 2015.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A.; SCOTT, R. L.; ROSOLEM, R.; ROCHA, H. R. The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 19, n. 1, p. 2899 – 2910, jun. 2015. Disponível em <<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/2899/2015/hess-19-2899-2015.pdf>>. Acesso em: 5 set. 2015.

PACHECO, W. L. Águas Subterrâneas do Distrito Federal –

Efeito de Sazonalidade e Características Associadas aos Isótopos de Deutério, Oxigênio e Carbono. 2012. 129f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

PONTES, L. M.; COELHO, G.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; OLIVEIRA, G. C. Análise de sensibilidade e avaliação da estrutura do modelo BALSEQ em condições distintas de clima, solo e vegetação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 1, p. 46 – 54, jan/mar 2015. Disponível em <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/3572f181b8b058685163c0025b9e-d9b6_473b1838133e679cb37b43e0b3e7b26d.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2015.

REATTO, A.; MARTINS, E.S.; CARDOSO, E.A.; SPERA, S.T.; CARVALHO JR.; O.A.C.; SILVA, A.V.; FARIAS, M.F.R. Levantamento de Reconhecimento de Solos de Alta Intensidade do Alto Curso do Rio Descoberto, DF/GO, escala 1:100.000. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 2003. 55p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 92).

SANTOS, R. M. Recarga de Águas Subterrâneas em Ambiente de Cerrado: Estudo com base em modelagem numérica e simulação hidrológica em uma bacia experimental. 2012. 195f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 2012.

SCANLON, B.R.; HEALY, R.W.; COOK, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 18 – 39, Jan. 2002. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10040-001-0176-2>>. Acesso em: 09 set. 2011.

SINGH, A. Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: A review. *Science of the Total Environment*, v. 499, n. 1, p. 414 – 423, May 2014. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969714007256>>. Acesso em 02 jul. 2015.

SOUZA, M. M. Determinação das Áreas de Recarga Para a Gestão do Sistema Aquífero Fissuro-Cárstico da Região de São Sebastião/DF. 2013. 73f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SZILAGYI, J.; JOZSA, J. MODIS-Aided Statewide Net Groundwater-Recharge Estimation in Nebraska. *Groundwater*, v. 51, n.5, p. 735–744, Sep./Oct. 2013. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-6584.2012.01019.x/epdf>>. Acesso em: 04 set. 2014.

TAN, X. C.; WU, J. W.; CAI, S.-Y.; YANG, J. Z. Characteristics of Groundwater Recharge on the North China Plain. *Groundwater*, v. 52, n. 5, p. 798-807, sep./oct. 2014. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gwat.12114/pdf>>. Acesso em: 22 set. 2014.

TILLMAN, F. D.; POOL, D. R.; LEAKE, S. A. The Effect of

Modeled Recharge Distribution on Simulated Groundwater Availability and Capture. *Groundwater*, v. 53, n. 3, p. 378 – 388, May/June 2015. Disponível em <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gwat.12210/epdf>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

TURKELTAUB, T.; KURTZMAN, D.; BEL, G.; DAHAN, O. Examination of Groundwater Recharge with a Calibrated/validated Flow Model of The Deep Vadose Zone. *Journal of Hydrology*, v. 522, n. 1, p. 618 – 627, Mar. 2015. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415000438>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

YANG, Y.; WU, J.; SUN, X.; WU, J.; ZHENG, C. A niched Pareto tabu search for multi-objective optimal design of groundwater remediation systems. *Journal of Hydrology*, v. 490, p. 56-73, May 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413002229>>. Acesso em: 23 set. 2014.

WU, K.; JOHNSTON, C. A.; CHERRIER, C.; BRIDGHAM, S.; SHMAGIN, B. Hydrologic calibration of the SWAT model in a Great Lakes coastal watershed. In: SINGH, V.P. E XU, Y.J (eds.). *Coastal Hydrology and Processes*. Highlands Ranch - USA: Water Resources Publications, 2006. p. 15-28.

Contribuição dos Autores

Ronaldo Medeiros dos Santos: concepção e execução da pesquisa, abrangendo todas as etapas de delineamento metodológico e experimental, coleta de dados, trabalhos de campo, modelagem numérica, análise de resultados e redação do artigo.

Sergio Koide: concepção, orientação e execução da pesquisa, abrangendo as etapas de delineamento metodológico e experimental, modelagem numérica, análise de resultados e revisão do artigo.