

MODELAGEM DA RECARGA HÍDRICA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA BACIA DO RIO UBERABINHA – UBERLÂNDIA – MG

Eleonora Henriques Amorim de Jesus
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Instituto de Geografia
eleonoraamorim@globocom

Michele Paula Da Silva
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
michelly.paula.silva@gmail.com

Karina do Valle Marques
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Faculdade de Medicina
karina@ufu.br

RESUMO

Nos últimos anos, principalmente no Brasil, os recursos hídricos passaram a ter uma maior visibilidade e utilização devido ao período de desenvolvimento econômico acelerado no país. Para minimizar os impactos sofridos por essas extrações dos recursos hídricos aceleradas, vários instrumentos de gestão vêm sendo desenvolvidos com o intuito de apoiar o planejamento em nível de bacias hidrográficas. O presente trabalho teve como objetivo realizar um estudo de gestão de águas através da plataforma AQUATOOL com base no modelo EVALHID para modelar a recarga hídrica de água subterrânea na Bacia do Rio Uberabinha durante um período de avaliação de 10 anos (janeiro 2005 a dezembro de 2014). Em relação aos resultados obtidos foi possível perceber que a infiltração e/ou recarga hídrica é influenciada diretamente pelos valores de precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial, os meses em que a chuva é intensa a taxa de infiltração também é maior, e o mesmo acontece ao contrário, ou seja, é necessário garantir a preservação/ conservação de todo sistema hidrológico para garantir o abastecimento do subsolo na bacia em questão. Enfim, a aplicação do modelo juntamente com a calibração apresentou resultados satisfatórios nos estudos realizados na Bacia do Rio Uberabinha, podendo vir auxiliar os órgãos gestores desta área na tomada de decisões e planejamentos para manutenção e preservação dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Águas subterrâneas. Ferramenta AQUATOOL. Modelo EVALHID. Rio Uberabinha.

MODELING OF THE UNDERGROUND WATER RECHARGE OF THE UBERABINHA RIVER BASIN - UBERLÂNDIA - MG

ABSTRACT

In the last years, mainly in Brazil, the hydric resources got more visibility and use due to the accelerated economic development in the country. To decrease the suffered impacts by accelerated water resources exploitation, many management devices has been developed aiming to support the management and planning of the water resources in level of watersheds. Thus, the present paper had as objective to realize a study of water management. With the use of the platform AQUATOOL based in the model EVALHID to model the hydric recharge of groundwater in the Uberabinha River watershed during the time of assessment of 10 years (January of 2005 to December of 2014). The hydric recharge results found with the use of the model it were possible to identify that the percolation or the water recharge were influenced directly by the values of precipitation, evapotranspiration and superficial water flow, the months that the rain were intense the percolation rate were also bigger, and the same happens in the opposite way. Thus, it is necessary to guarantee the preservation and the conservation of the completely hydrologic system to maintain the water supply for the watershed groundwater. Therefore, the application of this model alongside the calibration process presented satisfactory results in the studies realized in the Uberabinha River watershed, may come support the management public bodies of this area for the hydric resources maintenance.

Keywords: Modelagem hidrológica. Águas subterrâneas. Ferramenta AQUATOOL. Modelo EVALHID. Rio Uberabinha.

INTRODUÇÃO

O subsolo estoca cerca de 10,5 milhões de km³ de água subterrânea doce. Isto representa 97% dos volumes de água doce líquida existente nos continentes, passíveis de acesso por meios tecnológicos e econômicos. Estas águas podem ser utilizadas para abastecimento das populações, indústrias e atividades agropecuárias devendo-se, para isto, empregar a forma correta de captação (REBOUÇAS et al., 1999). Por isso, a água subterrânea consiste em um recurso natural em destaque não só no Brasil, mas no mundo todo, em virtude do seu grau elevado de importância no requisito social, econômico e ambiental.

Segundo o Censo de 2000 (IBGE, 2003), aproximadamente 60% da população brasileira é abastecida, para fins domésticos, com água subterrânea, sendo que 6% se auto abastece das águas de poços rasos, 12% de nascentes ou fontes e 43% de poços profundos. Por isso, o número de poços tubulares de água subterrânea em operação do Brasil está estimado em cerca de 300.000, com um número anual de perfurações de aproximadamente 10.000.

O município de Uberlândia possui uma demanda relativamente grande por água para o abastecimento público e para o desenvolvimento de suas atividades econômicas. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE (2014), o município possui uma população de 654.681 habitantes, que consome, em média, 13.093.620 m³ de água/mês (DMAE, 2015), de acordo com esses dados o consumo médio de água por pessoa em Uberlândia é quase o dobro que o recomendado pela Organização das Nações Unidas (ONU). Um uberlandense gasta 200 litros por dia de água, enquanto o valor recomendado pela ONU é de 110 litros/ dia. Além da utilização eventualmente de parte da água subterrânea da Bacia do Rio Uberabinha para o abastecimento dos distritos de Uberlândia, indústrias e atividades agropecuárias da região.

A modelagem matemática consiste na representação do que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base no levantamento e interpretação de dados e observações do sistema real, tendo como objetivo uma melhor compreensão do sistema atual, possibilitando prever situações futuras, algumas vezes passadas, porém sempre buscando direcionar ações de decisão (IRITANI, 1998). Com isso, a aplicação da modelagem com resultados qualitativos e quantitativos em estudos de água subterrânea e em possíveis impactos ambientais vem ganhando destaque na literatura, por demonstrarem resultados atuais e perspectivas futuras em relação ao tema estudado.

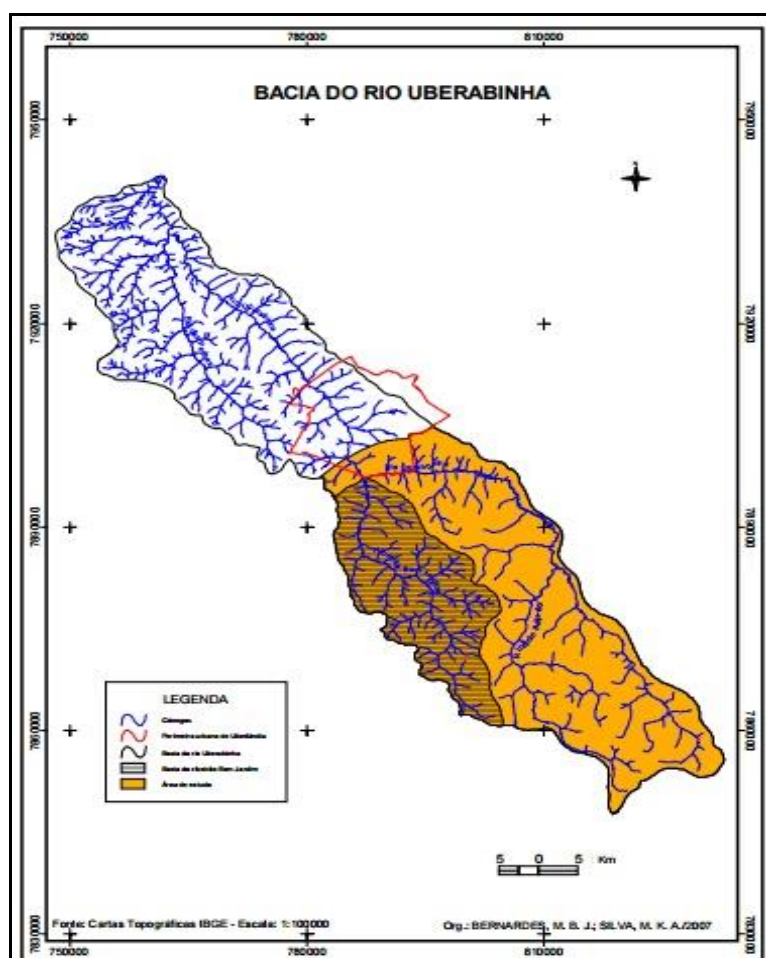
Sendo assim, este trabalho teve como objetivo realizar a modelagem da recarga hídrica das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do rio Uberabinha com base em aspectos do meio físico natural utilizando os dados climatológicos disponibilizados pela estação da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), a fim de promover medidas corretivas e/ou mitigadoras para as áreas avaliadas com um baixo índice de disponibilidade de água.

METODOLOGIA

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O rio Uberabinha é afluente do rio Araguari pela margem esquerda, em Minas Gerais. A sua bacia engloba os municípios de Uberaba, Uberlândia e Tupaciguara, na região do Triângulo Mineiro, drenando uma área de aproximadamente 2.195,08 km². Possui uma extensão de 142,7 km e situa-se entre as coordenadas geográficas de 18° 36' e 19° 21' de latitude sul e entre as coordenadas geográficas de 47° 51' a 48° 33' Oeste (DUARTE e BRITO, 2005; SALLA et al., 2014). (Figura 1).

FIGURA 1 – Local de estudo- Bacia do Rio Uberabinha.



Fonte – Carta Topográfica IBGE- Escala 1: 100 000(2013).

O rio Uberabinha percorre áreas de lavouras, pastagens e reflorestamento, extensas áreas de brejo constituídas de solos úmidos com espessos horizontes de argila branca recoberta de turfa, e longos trechos de matas ciliares que, com sua vegetação rica e variada, oferecem alimento para a fauna, ajudam a preservar a qualidade da água e protegem as margens dos processos erosivos evitando o assoreamento da calha do rio (SANTOS et al. 2017).

PROCEDIMENTOS DO ESTUDO

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica para o levantamento de dados e informações sobre a bacia do Rio Uberabinha. Com os dados coletados verificou-se como ocorre a distribuição da água na região e a quantidade disponibilizada de água subterrânea semestralmente para toda a população, considerando os meses chuvosos e os de estiagem na cidade.

Outra pesquisa foi realizada posteriormente, os dados climatológicos foram coletados de acordo com a disponibilidade de informações e os dados fluviométricos, mais precisamente vazão também foram coletados para atender as exigências do modelo. Esses dados foram obtidos na estação meteorológica da Universidade Federal de Uberlândia.

Os dados de precipitação, evapotranspiração, temperatura e vazão, foram utilizados para a calibração dos parâmetros e somente após todo este processo foi possível realizar a validação do modelo em relação à recarga hídrica na bacia do Rio Uberabinha.

MODELO CONCEITUAL AQUATOOL

O AQUATOOL é uma plataforma e/ou ambiente de desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão (SSD) para o planejamento e gestão de bacias hidrográficas e sistemas de água. Essa

ferramenta já foi utilizada por diversos autores (FERREIRA, 2014; SALLA et al. 2014a, NASCIMENTO, 2016)

Para ajudar a análise de vários problemas relacionados com a gestão da água, ele fornece vários recursos de qualidade e quantidade de águas subterrâneas e superficiais, tornando-se assim um ambiente de uma linha de pesquisa em desenvolvimento contínuo, auxiliando de diversas formas a gestão de águas.

A plataforma AQUATOOL conta com vários softwares para o desenvolvimento e aplicação prática do progresso e do novo conhecimento gerado pela gestão dos Recursos Hídricos, os principais modelos disponibilizados gratuitamente são SIMGES, CAUDECO, GESCAL, EVALHID e OPITGES. Detalhes dos modelos descritos em Paredes-Arquila et al. (2011).

Os modelos são softwares livres, ou seja, podem ser livremente baixados e instalados sem uma licença e sem custo de obtenção. A instalação sem licença permite edição e visualização de resultados para os regimes de qualquer tamanho, a plataforma permite ainda o uso de módulos de cálculo para os regimes de dimensões limitadas.

Modelo EvalHid

O programa de avaliação dos recursos hídricos (EvalHid) é um módulo de software do AQUATOOL disponibilizado para o desenvolvimento de modelos de precipitação-escoamento ou chuva-vazão em bacias e complexos que permite a avaliação dos recursos hídricos (qualidade ou quantidade) em uma ou várias bacias hidrográficas simultaneamente. O módulo consiste de vários tipos de modelos que podem ser escolhidos de acordo com os dados disponíveis para a calibração.

A ferramenta foi desenvolvida por Paredes-Arquiola et al. (2011) e integra seis modelos chuva-vazão (HBV, Témez, Sacramento, GR2M, GR4J e AWBM), todos do tipo agregado com aplicação semidistribuída, ou seja, a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias para o procedimento. Nesta nota técnica, em função dos dados hidrológicos disponíveis na região de estudo e do reduzido número de parâmetros a calibrar foi utilizado o modelo HBV para se avaliar a quantidade de água subterrânea disponível no Rio Uberabinha de acordo com a recarga de chuva-vazão.

Modelo HBV

O modelo HBV está integrado ao EVALHID, trata-se de um modelo computadorizado de captação que converte precipitação e evapotranspiração potencial em vazão num canal ou reservatório, por meio da simulação de processos hidrológicos naturais. Para realizar a calibração os parâmetros devem possuir registros meteorológicos e de vazão em um período de avaliação de três a cinco anos simultâneos.

Este modelo tem sido usado desde 1977 na previsão de vazões em tempo real, na Suécia é considerada a ferramenta de previsão padrão, onde cerca de 50 áreas de captação são monitoradas pelo Serviço nacional de Alarme de Cheias com base no modelo HBV.

O modelo trabalha com escala temporal diária ou mensal e utiliza como dados de entrada, as séries de precipitação, temperatura do ar e evapotranspiração média mensal.

Calibração com os Algoritmos Genéticos (SCE-UA)

A calibração é o processo em que os parâmetros de modelo são ajustados, de forma que o modelo reproduza o comportamento das variáveis observadas na bacia hidrográfica da forma mais real possível, para isso são necessários dados observados para a calibração, sendo estes dados normalmente as series de vazões observadas em um ou mais locais na bacia em um período estipulado.

O algoritmo foi no início descrito por Duan et al., (1994), com o intuito de analisar a superfície de resposta de funções objetivo aplicadas a problemas de calibração de modelos hidrológicos chuva-vazão devido a calibração automática na maioria das vezes encontrar apenas pontos ótimos locais. Por isso, o SCE-UA é considerado um método baseado na combinação de técnicas de busca aleatória, algoritmos genéticos e otimização local, com êxito na resolução na resolução de problemas não lineares em diversas aplicações de modelos hidrológicos em escala de bacia hidrográfica. O nome SCE é derivado das iniciais de Shuffled Complex Evolution, o que pode ser traduzido por “Evolução de Complexos Misturados” (Diniz, 1999). As letras UA provém de Univesity of Arizona, instituição de origem dos autores do algoritmo.

Basicamente, o algoritmo é responsável por avaliar a quantidade de combinações de valores de parâmetros para encontrar o melhor ajuste entre os dados observados e simulados.

Este ajuste se avalia maximizando o valor médio, ou seja, selecionando os melhores valores encontrados nas funções objetivo descritas nas Equações (1), (2), (3) e (4) (NASH e SUTCLIFF, 1970).

$$F_1 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}}]^2} \quad (1)$$

$$F_2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [\ln(Q_{sim}(t)) - \ln(Q_{obs}(t))]^2}{\sum_{t=1}^n [\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(\overline{Q_{obs}})]^2} \quad (2)$$

$$F_3 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \overline{Q_{sim}}) \cdot (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \overline{Q_{sim}})^2 \cdot \sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2}} \quad (3)$$

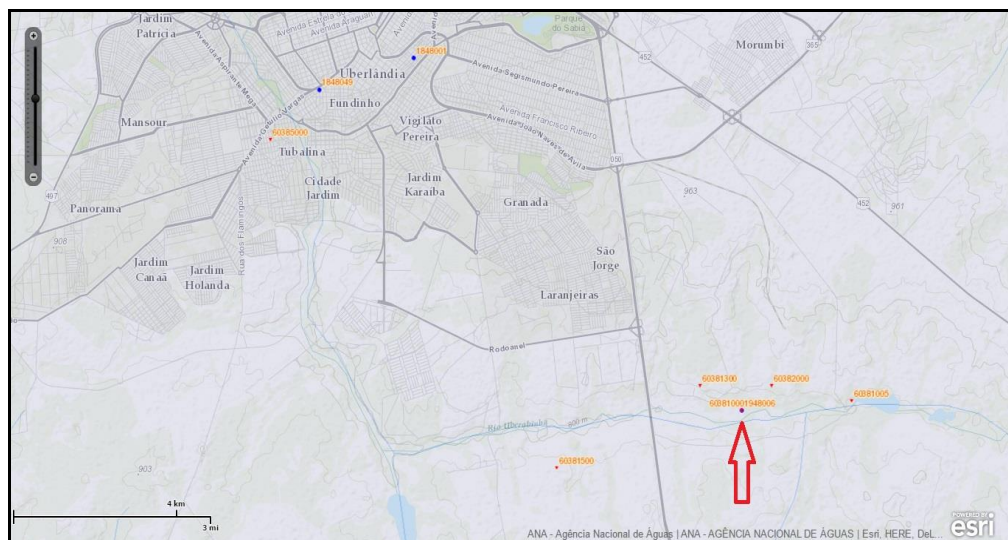
$$F_4 = 1 - \left[\max \left(\frac{\overline{Q_{sim}}}{\overline{Q_{obs}}}, \frac{\overline{Q_{obs}}}{\overline{Q_{sim}}} \right) - 1 \right]^2 \quad (4)$$

Onde: $Q_{sim}(t)$ e $Q_{obs}(t)$ são respectivamente as vazões simuladas e observadas no determinado intervalo de tempo t (neste caso adotado como 1 (um) para se obter uma maior precisão nos resultados); n é o número de meses da calibração e a barra alta nas vazões indica o valor médio. Ainda na equação, o F_1 é o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), onde se tem a relação entre os volumes de vazões calculadas e obtidas; F_2 é o coeficiente de eficiência de Nash- Sutcliffe da transformação logarítmica da vazão (ln NS); F_3 é o coeficiente de correlação de Pearson; F_4 é uma medida da simetria do ajuste entre a simulação média e a observação média, equações estas padronizadas na calibração manual SCE-UA.

PARÂMETROS CLIMATOLÓGICOS E FLUVIOMÉTRICOS

Para a validação do modelo foi necessário obter alguns parâmetros climatológicos da bacia em estudo, esses dados foram disponibilizados pelo Laboratório de Climatologia da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) de acordo com o período estabelecido, além disso foi necessário obter os dados fluviométricos de vazão no local, estes foram disponibilizados pela ANA através do monitoramento do poço na Fazenda Letreiro (Cód. 60381000) localizada na região de Uberlândia conforme Figura 2.

FIGURA 2 – Localização do Poço de Monitoramento Fazenda Letreiro (Cód. 60381000).



Fonte – ANA (2015).

Com base em estudos realizados sobre o modelo EvalHid e para se alcançar resultados mais precisos do modelo, estipulou-se um período de 10 anos para obtenção dos parâmetros, ou seja, foram coletados dados de precipitação, temperatura e vazão de janeiro de 2005 a dezembro de 2014.

Entende-se por precipitação a água proveniente do vapor de água da atmosfera depositada na superfície sob qualquer forma: chuva, granizo, neblina, neve, orvalho ou geada. Sendo assim, as precipitações acontecem no momento em que o vapor de água que se encontra nas nuvens se congela em razão da altitude, a partir dessa condensação desloca-se em direção à superfície terrestre em estado líquido ou sólido.

O conceito de temperatura se refere a uma grandeza física diretamente relacionada ao estado de movimento ou agitação das partículas que compõe a superfície terrestre. Sendo assim, a temperatura está diretamente ligada à umidade do ar, e as duas variam, ou sejam quando o ar está muito seco, a umidade do ar está muito baixa, já quando o ar está mais úmido, a umidade está mais alta. Para medir se devem usar os termômetros, elementos chave para ter uma ideia realista da temperatura dos ambientes.

Basicamente, vazão é o volume de água que passa por uma seção de um rio ou canal durante um determinado tempo, ou seja, é a infiltração de água nas camadas das bacias em virtude da precipitação no local. Este parâmetro é a principal grandeza que caracteriza um escoamento superficial ou subterrâneo nas bacias.

A evapotranspiração é definida como sendo o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo e plantas, ou seja, é qualquer processo pelo qual a água da planta ou do solo passa ao estado de vapor em uma dada condição climática. Para validação do modelo foi necessário utilizar os dados de Evapotranspiração Potencial (ETP) da região de Uberlândia, que nada mais é do que a quantidade de água transferida à atmosfera por transpiração e/ou evaporação, na unidade de tempo de uma superfície extensa completamente coberta por vegetação de porte baixo e bem suprida de água.

Diante da dificuldade de se obter o parâmetro de evapotranspiração em relação à Bacia do Rio Uberabinha, foi necessário utilizar-se de alguns cálculos realizados em outras metodologias, com o auxílio dos dados já coletados no Laboratório de Climatologia a equação utilizada para se obter os dados de evapotranspiração desejado foi a de Jensen e Haise [Tucci et al.,(2004)], um método baseado basicamente na radiação e temperatura, que ultimamente tem fornecido resultados razoáveis em diferentes condições climáticas, sendo assim a Equação 5 que representa o Método de Jensen e Haise para evapotranspiração, é dada por:

$$ETP = (0,025T + 0,08) \times \frac{G}{59} \quad (5)$$

Onde, ETP é a evapotranspiração potencial (mm/dia); T é a temperatura do ar (°C) e G a radiação solar de onda curta (cal/cm²), especificada no Quadro 1.

Quadro 1 – Radiação Solar de onda Curta (cal/cm²) para a latitude 7° Sul.

Meses	G (Radiação)
Janeiro	427,34
Fevereiro	453,14
Março	436,80
Abril	460,88
Mai	475,49
Junho	447,98
Julho	466,04
Agosto	516,77
Setembro	538,26
Outubro	542,56
Novembro	484,95
Dezembro	458,30

Fonte – Jensen & Haise [Tucci et al., (2004)].

Dessa forma, para se obter dados mais próximos a realidade do local, foi calculada a evapotranspiração mensalmente para cada ano, ou seja, de janeiro de 2005 a dezembro de 2014.

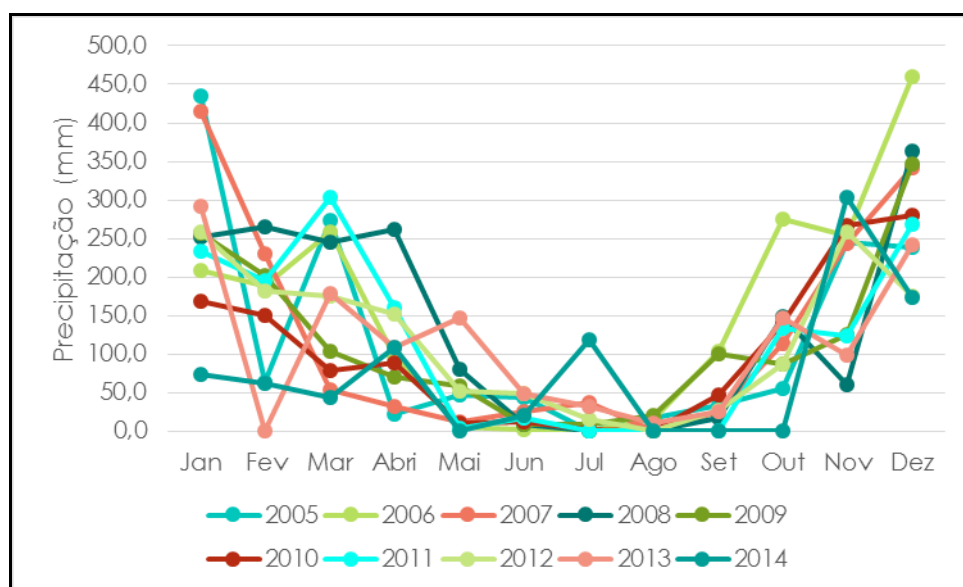
RESULTADOS E DISCUSSÃO

DADOS DE ENTRADA

Os dados temporais de entrada para a Bacia do Rio Uberabinha incluem precipitação, evapotranspiração potencial, precipitação e vazão. No presente trabalho utilizou-se uma escala mensal, com um período único em função da disponibilidade de dados históricos, cujo máximo para o estudo foi estipulado em 10 anos (de janeiro de 2005 a dezembro de 2014).

A Figura 3 indica os resultados obtidos através das médias registradas por meses sobre o parâmetro de precipitação no local de estudo durante 10 anos.

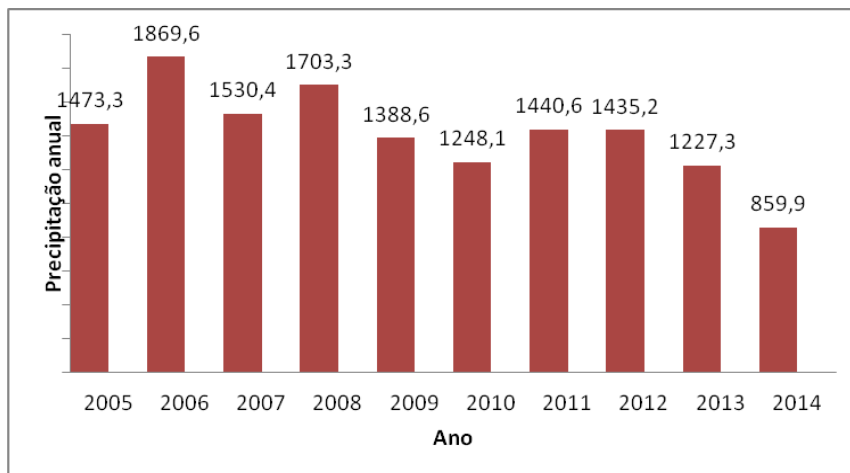
FIGURA 3 – Média Mensal de Precipitação em mm.



Fonte – Laboratório de Climatologia da UFU (2015).

De acordo com as médias encontradas é possível perceber que nos últimos três anos a precipitação na região diminuiu significativamente em relação aos anos anteriores, destaca-se o ano de 2014 (Figura 4) onde o índice foi inferior a 1000 mm no ano, foi a primeira vez em 10 anos em que essa situação ocorreu.

FIGURA 4 – Média anual em Precipitação (mm).

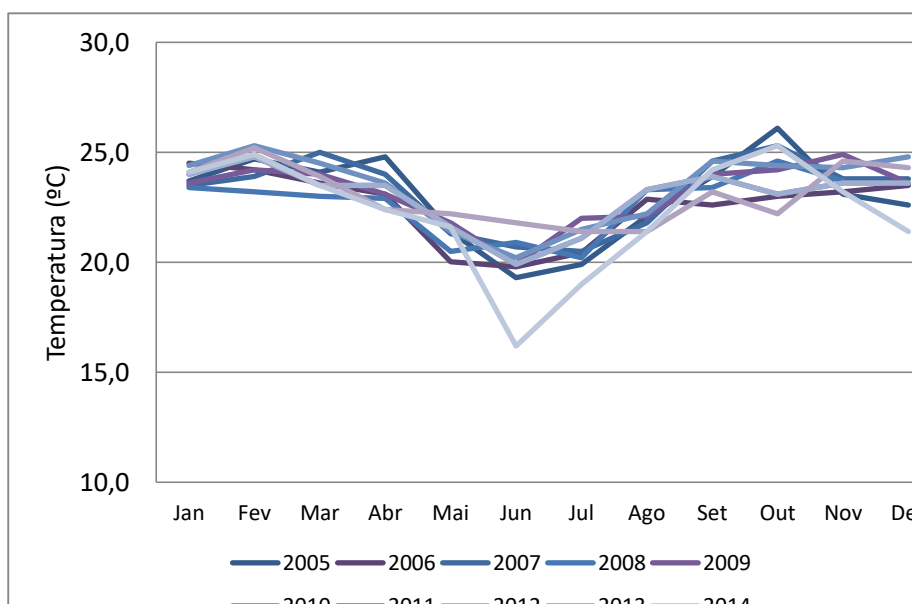


Fonte – Laboratório de Climatologia da UFU (2015).

Diversos são os fatores que impactam os resultados, o aumento da região industrial, a falta de uma conservação das áreas de preservação principalmente na região mais próxima ao Rio Uberabinha, além dos efeitos causados na região Sudeste pelo El Niño, fenômeno este que aquece as águas dos oceanos principalmente o Pacífico interferindo diretamente no padrão de chuvas e temperaturas não só da região como em diversos locais no planeta. A crise de água por falta de chuva no ano de 2014 foi vivenciada por todos no Brasil, além disso, outros fatores meteorológicos também influenciaram, tal como o crescimento da demanda e falta de planejamento hidrológico (NOBRE et al., 2015)

A Figura 5 destaca os resultados encontrados das médias mensais sobre os dados coletados de temperatura na região durante 10 anos.

FIGURA 5 – Média mensal de Temperatura do Ar em °C.

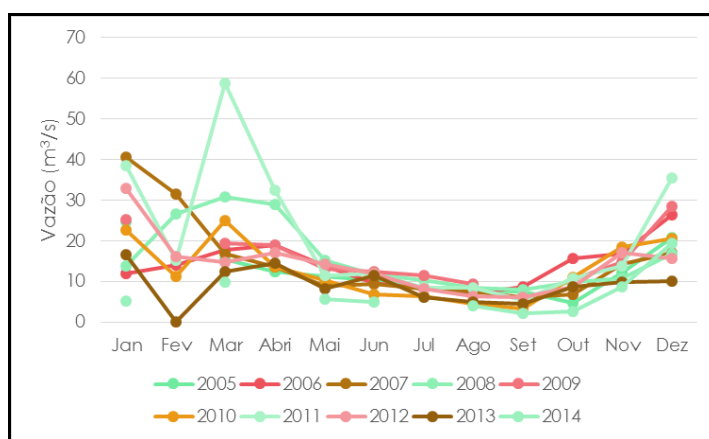


Fonte – Laboratório de Climatologia da UFU (2015).

Devido à localização da região a temperatura conforme demonstra o gráfico não teve muita alteração durante cada mês dos anos avaliados. Cercada pela vegetação do Cerrado, a região da Bacia do Rio Uberabinha possui os meses de outubro, novembro e dezembro com maiores médias térmicas, ou seja, mais quentes e os meses de maio, junho e julho com temperaturas mais baixas, todo este processo interfere no resultado final de cada ano em relação a temperatura, que influencia diretamente na região, além disso a topografia é determinante na variação espacial da temperatura, visto que os municípios que integram a Bacia do Rio Uberabinha estão localizados em altitudes mais baixas, fazendo com que se tenha temperaturas elevadas durante o verão.

A Figura 6 indica os valores coletados de vazão através da plataforma ANA, no poço de monitoramento de dados fluviométricos de cód. 60381000, durante o período estipulado.

FIGURA 6 – Média mensal de Vazão em $m^3 \times s^{-1}$.

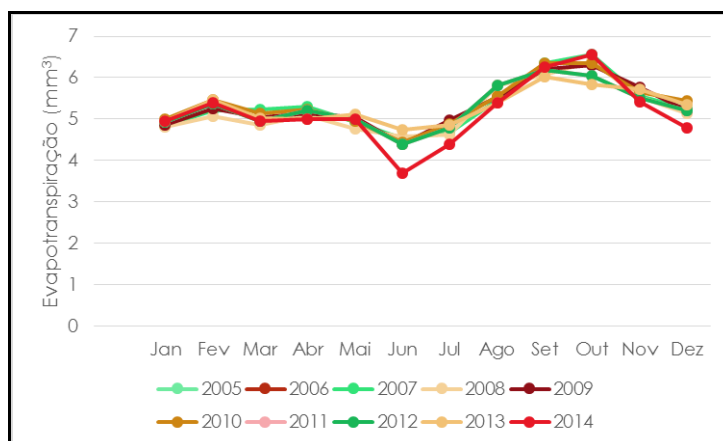


Fonte – ANA (2015).

A vazão está diretamente relacionada com a precipitação, evapotranspiração e até mesmo a temperatura, todos estes parâmetros alteram de certa forma o resultado final do escoamento da água superficial ou subterrânea. De acordo com o gráfico nota-se uma grande variação na vazão durante o período analisado, um exemplo disso pode ser destacado em fevereiro de 2013 onde o resultado encontrado foi praticamente nulo, mês e ano onde o valor de precipitação também alcançou o seu menor valor, o contrário acontece em março de 2011 onde a vazão chega ao seu maior valor juntamente com a precipitação que obteve média acima de 300 mm no mesmo período.

Por fim, a Figura 7 indica os resultados das médias mensais encontradas nos cálculos realizados para obtenção da evapotranspiração mensal durante os 10 anos estipulados.

FIGURA 7 – Média Mensal de Evapotranspiração em mm^3 .

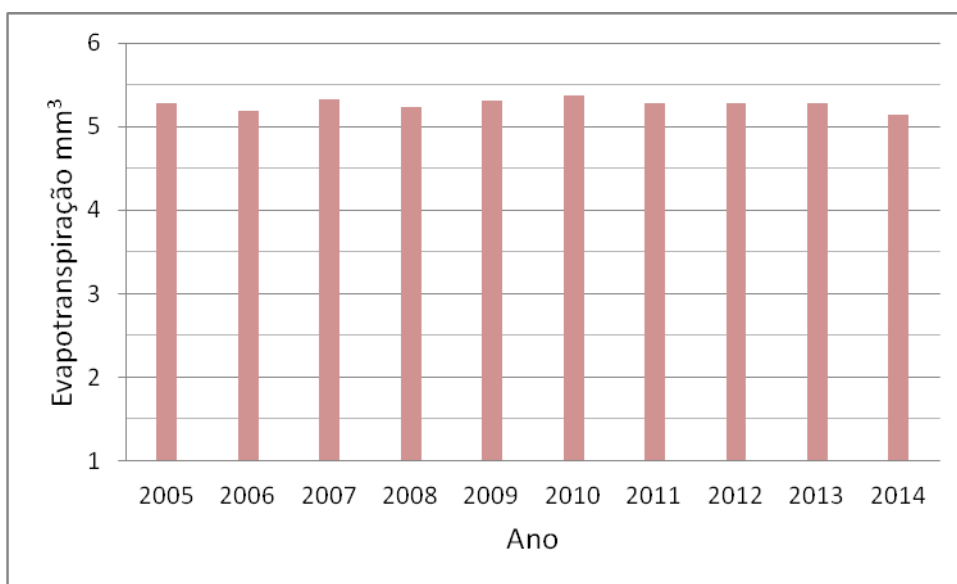


Fonte – Acervo do autor (2015).

Nota-se na Figura 4, que ano de 2014 houve uma diminuição de chuvas na região. Além disso, a evapotranspiração também foi menor comparando-se com os anos anteriores. A evapotranspiração é influenciada diariamente por parâmetros meteorológicos como: radiação solar, vento, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor, ela é grandemente afetada pelo tipo de cultura, porcentagem de cobertura do solo e disponibilidade de água no solo. A evaporação somente ocorrerá se existir água disponível, a disponibilidade de água é o fator limitante principal de todo o processo, por isso existe uma variação, as vezes mínima, mas existe em relação a todos os parâmetros dependendo do mês.

Ao final, a média de todos os meses resulta a disponibilidade tanto de água quanto de outros parâmetros em cada ano, um exemplo vivenciado foi no ano de 2014 onde a região do Triângulo Mineiro sofreu com a crise hídrica, prova disso são os índices de precipitação e evapotranspiração terem alcançados os menores índices durante os 10 anos analisados (Figuras 4 e 8).

FIGURA 8 – Média Anual de Evapotranspiração em mm³.



Fonte – Laboratório de Climatologia da UFU (2015).

CALIBRAÇÃO

Neste trabalho os parâmetros climatológicos e fluviométrico foram calibrados manualmente através do algoritmo evolutivo SCE-UA.

- ❖ β = Parâmetro de ajuste do modelo;
- ❖ FC = Máxima capacidade de armazenamento do solo;
- ❖ PWP = Parâmetro de saturação do solo;
- ❖ $L_{máx}$ = Limite máximo de fluxo subsuperficial;
- ❖ K_0 = Coeficiente de escoamento superficial;
- ❖ K_1 = Coeficiente de escoamento subsuperficial;
- ❖ K_2 = Coeficiente de escoamento de base;
- ❖ K_{perc} = Coeficiente de percolação.

Pela robustez e simplicidade, todos os parâmetros foram calibrados manualmente, este ajuste é realizado por tentativa e erro, ou seja, cada parâmetro recebe diversos valores e então é realizada repetidas execuções do modelo assim como análises dos resultados. A cada tentativa os valores de vazões mínimas, volume, forma do hidrograma, fator de correção e tempo são analisados.

Os valores de cada parâmetro assim como os respectivos valores de vazão observada e simulada para cada mês durante os 10 anos são apresentados no Apêndice A e os parâmetros calibrados manualmente pelo algoritmo SCE-UA assim como o valor da função $F_{média}$ estão disponibilizados no Quadro 2 abaixo.

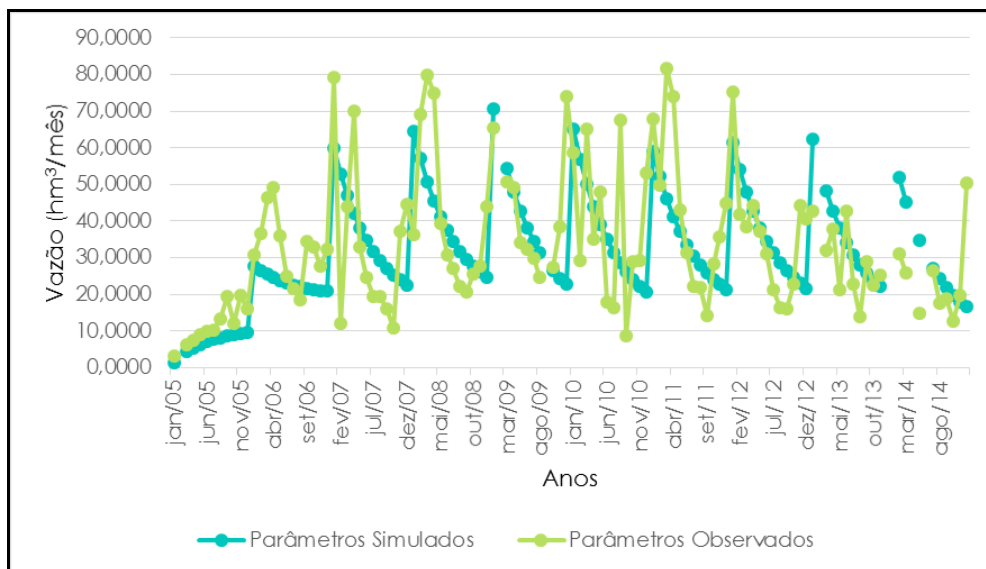
QUADRO 2 – Parâmetros calibrados e valores da $F_{média}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA.

Modelo HBV	
$H_{máx}$	450,45
B	1,56
PWP	423,89
$L_{máx}$	100,00
K_0	0,076
K_1	0,01577
K_2	0,000023
K_{perc}	0,1409
$F_{média}$	0,42

Fonte – Acervo do autor (2015).

A partir da aplicação inicial já descrita, os valores dos parâmetros foram refinados de forma a melhorar o desempenho do modelo e o ajuste com os dados observados, esse refinamento foi realizado através da ferramenta Solver, trata-se de um comando específico do Excel onde se localiza um valor ideal de (máximo ou mínimo) para uma fórmula em uma célula, ou seja, através do Solver ocorre o ajuste dos valores nas células variáveis de decisão para satisfazer os limites nas células de restrição e produzir o resultado desejado para a célula do objetivo. A Figura 9 apresenta os valores encontrados entre os parâmetros simulados e os observados obtidos através da calibração manual e refinamento no Solver.

FIGURA 9 – Comparação entre os dados simulados e observados após a calibração.



Fonte – Acervo do autor (2015).

Os resultados da calibração dos parâmetros através do método utilizado indicam que os mesmos possuem classificação satisfatória durante o período analisado, isto porque alcançou em seu total uma função $F_{média}$ de 0,42 ocasionando assim um melhor ajuste entre os valores simulados e observados de vazão.

Por falta de literaturas para a comparação de resultados em níveis de águas subterrâneas, o valor obtido na calibração manual é considerado aceitável para o estudo em si. Um fator que contribui para esta consideração é justamente pela discrepância entre os valores dos parâmetros calibrados pelos modelos com esta finalidade, isso porque se devem levar em consideração as diversas características das bacias hidrográficas estudadas, tais como uso e ocupação do solo, declividade do solo, forma da bacia hidrográfica, configuração da rede de drenagem natural e etc.

Valores aproximados a este foram observados por Costa (2015), onde o mesmo utilizou o modelo para calibração da vazão no Rio Uberaba, obtendo assim um valor de função $F_{m\acute{e}dia}$ de 0,64 e por Salla et al., (2015), que utilizou o mesmo modelo para simulação de vazões no alto curso do rio Araguari, onde os autores obtiveram valores da função $F_{m\acute{e}dia}$ variando de 0,602 a 0,767 para o modelo HBV.

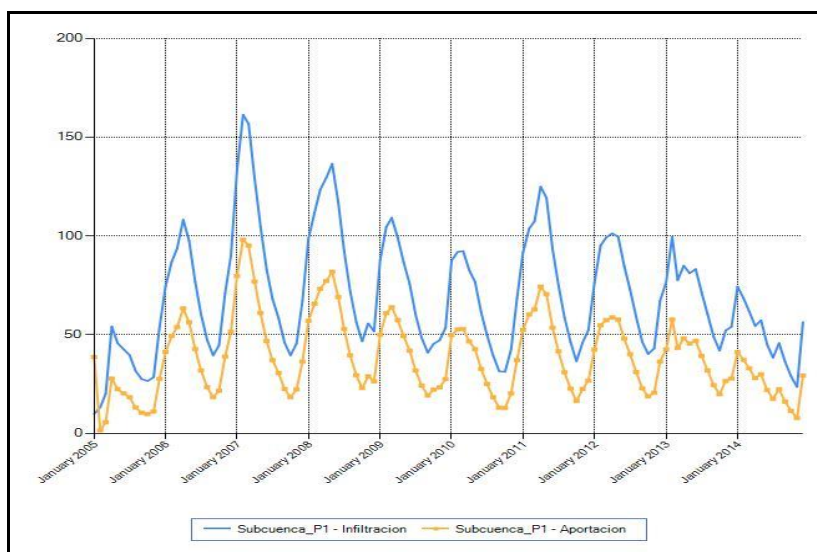
VALIDAÇÃO DO MODELO

De acordo com as informações já citadas, os valores simulados e obtidos de vazão tiveram resultados satisfatórios, ou seja, valores aproximados uns aos outros, todo este processo só foi obtido através da calibração e refinamento do Solver. Como a vazão é diretamente proporcional aos valores de precipitação e evapotranspiração, entende-se que estes dois parâmetros também obtiveram valores aceitáveis em relação ao simulado no modelo EVALHID.

Diante dessas constatações foi possível avaliar a taxa de infiltração durante o período estudado com o auxílio da validação do modelo, dessa forma cada parâmetro (precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial) foi comparado individualmente com a infiltração na Bacia do Rio Uberabinha.

A Figura 10 indica a comparação entre infiltração e escoamento superficial (aportacion) no Rio Uberabinha (denominado Subcuenca_P1).

FIGURA 10 – Comparação entre parâmetros de infiltração e escoamento superficial simulados.

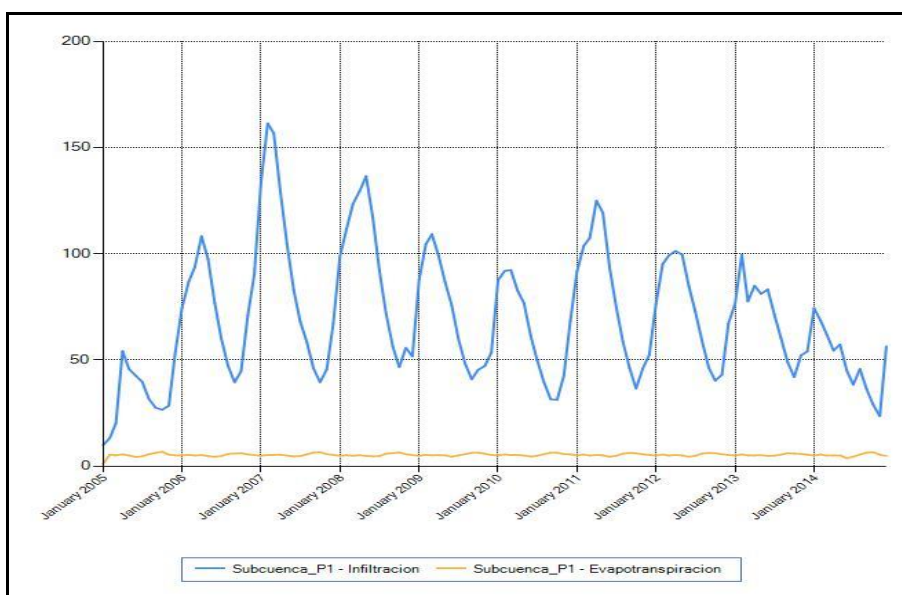


Fonte – Acervo do Autor (2015).

Como já eram esperados os valores de infiltração são maiores do que o de percolação durante todo o período analisado, quando a chuva atinge a área, parte de suas águas é interceptada pela vegetação ocasionando a evapotranspiração e o restante atinge a superfície do solo, neste caso parte se infiltra e o restante escoar pela superfície do terreno, nos meses de maior infiltração como em Maio de 2006 e Março de 2007 o índice de escoamento também foi o maior, isso porque neste período o índice de precipitação foi alto e conseqüentemente resultou nos maiores valores simulados.

A Figura 11 destaca a comparação de dados de infiltração e evapotranspiração na bacia do Rio Uberabinha durante o período avaliado.

FIGURA 11 – Comparação entre parâmetros de infiltração e evapotranspiração.



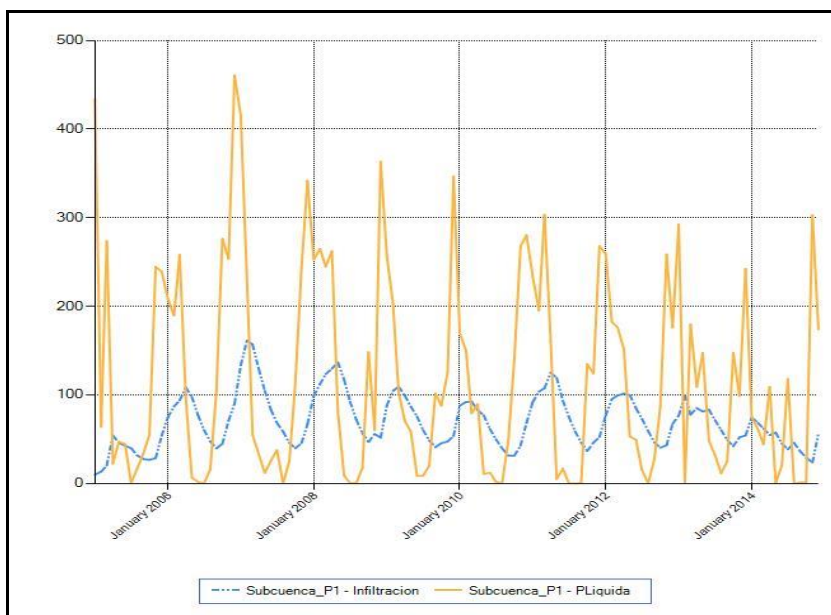
Fonte – Acervo do autor (2015).

A evapotranspiração durante todo o período simulado assim como o observado não sofre muita alteração como ocorre com a infiltração, no entanto é possível perceber que durante os meses onde a evapotranspiração foi maior como, por exemplo, Outubro de 2014 (6,55 mm³) o índice de infiltração foi menor, isso porque como já foi dito, parte da água precipitada evapora, parte infiltra e parte se escoia.

A quantidade evaporada durante as chuvas intensas é desprezível em relação ao total precipitado durante o período de estudo. No entanto a água ao penetrar no solo reabastece os aquíferos subterrâneos que dependem as vazões dos cursos de água nos períodos de estiagem na região.

Por fim, a Figura 12 indica os valores simulados de infiltração e compara com os de precipitação líquida durante o período estipulado.

FIGURA 12 – Comparação entre parâmetros de infiltração e precipitação líquida.



Fonte – Acervo do autor (2015).

Da mesma forma como os parâmetros anteriores, a precipitação está ligada a taxa de infiltração que ocorre na área de estudo, os meses com maiores índices de precipitação como janeiro de 2007 (415 mm) resultou-se no período com maior índice de infiltração, o mesmo ocorre em situação contrária, no mês de setembro de 2014 a precipitação apresentou um valor de 0,8 mm caracterizando assim a baixa taxa de infiltração no mesmo período.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Concluiu-se que o estudo da recarga hídrica no Rio Uberabinha é fundamental para o planejamento e gestão não apenas da bacia em si, mas também para todo o recurso hídrico da região, visto que com essa aplicação abre-se um leque de oportunidades para se realizar a uma melhor gestão da área assim como da disponibilidade de água subterrânea.

Neste trabalho a ferramenta EVALHID, juntamente com o algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA e o Solver, apresentaram resultados satisfatórios a partir do modelo HBV, onde através dos mesmos é possível destacar a importância em se preservar o ciclo hidrológico de toda a região estudada.

Deve-se dar mais atenção a conservação das Áreas de Preservação Permanente (APP's) na região, assumindo um novo modelo de gestão das águas e de drenagem urbana, que se regulariza e tenta resgatar em partes o processo natural do ciclo hidrológico, isto porque todos os parâmetros avaliados são influenciados diretamente por este ciclo.

Através de uma gestão mais criteriosa dos recursos hídricos do Rio Uberabinha é possível obter mais dados climatológicos e fluviométricos do mesmo, isso porque uma das maiores dificuldades durante o trabalho foi a parte de dados obtenção de dados do Rio em específico, justamente por este motivo teve-se que definir um período máximo de 10 anos para coleta dos mesmos, felizmente diversas análises e controles são feitos com as bacias da região, mas a do Rio Uberabinha em si, ainda é muito pouco estudada e todo este processo deve ser revisado, visto que a bacia é responsável por abastecer as cidades de Uberlândia, Martinésia, Cruzeiro dos Peixotos entre outros.

A falta de literatura sobre recarga e/ou disponibilidade de água subterrânea também foi uma das dificuldades encontradas durante todo o trabalho, tema como este se deve ganhar mais espaço dentro de Conferências e Universidade, uma vez em que o país vivenciou a alguns anos uma das maiores crises hídricas da história e um dos métodos mais utilizados durante este período foi a extração de água subterrânea, principalmente nos estados de São Paulo e Minas Gerais.

Recomenda-se prosseguir com os estudos aqui iniciados e com base em mais dados aumentar a demanda de avaliação, levantar pontos de extração da região e verificar a disponibilidade naqueles locais em específico, realizar monitoramento de qualidade da água subterrânea uma vez que ela é extraída para agricultura e em alguns casos até consumo animal, entre outras pesquisas para se colaborar no monitoramento dessas práticas na região.

Por fim, de uma forma geral, a ferramenta AQUATOOL em junção com o modelo EVALHID atendeu as necessidades deste trabalho quanto à análise de infiltração e/ou recarga hídrica de água subterrânea no Rio Uberabinha, com o auxílio da calibração manual SCE-UA.

Um aspecto que merece ser destacado sobre o modelo é sobre a praticidade em se manusear o EVALHID e a maioria dos modelos disponibilizados pela ferramenta, todos possuem manual técnico e de usuário para auxiliar no entendimento dos mesmos. Por isso, é necessário investir mais em pesquisas para os aspectos quantitativos e qualitativos de água subterrânea na região.

REFERÊNCIAS

AQUATOOL. Disponível em: <http://www.upv.es/aquatool/es/evalhid_es.html>. Acesso em 28 set. 2015

BRASIL. IBGE. **Censo demográfico, 2000**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em 28 set. 2015.

_____. IBGE. **Estimativas populacionais dos municípios em 2014**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/14659-asi-ibge-divulga-as-estimativas-populacionais-dos-municipios-em-2014>. Acesso em 28 set. 2015

COSTA, E.S. Estudo de otimização do aproveitamento hídrico superficial no alto curso do rio Uberaba, UPRH GD8. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, UFU, 172 p, 2015.

DINIZ, L. S. **Calibração de modelos hidrológicos**. In: Galvão, C. O.; Valença, M. J. S. 1999 Sistemas inteligentes. Porto Alegre: Editora da Universidade da UFRGS – ABRH, 1999.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of Hydrology**, v. 158 p. 265-284, 1994. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4)

DUARTE, W. O.; BRITO, J. L. S. Análise temporal do uso da terra e cobertura vegetal do alto curso do rio Uberabinha utilizando imagens do satélite CBERS 2. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2965-2972.

FERREIRA, A. M. **Capacidade de autodepuração no médio e baixo cursos do Rio Uberaba, UPRH-GD8**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, UFU, 134 p, 2014.

IRITANI, M. A. Modelação Matemática Tridimensional para a Proteção das Captações de Água Subterrânea. (Tese de Doutorado), Instituto de Geociências, USP, 200 p, 1998.

NASH, J.E.; SUTCLIFF, J. River flow forecasting through conceptual models. **Journal of Hydrology**, v. 10, n.3, p. 282-290, 1970. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

NOBRE, M. E. S.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, v.106, p.31-44, 2015. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44>

PAREDES-ARQUIOLA J.; SOLERA, A.; ÁLVAREZ, J.A.; ELVIRA, N.L. **Manual Técnico v1.0** - Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2011.

REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. **Águas doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo, Acad. Bras. Cien./IEA-USP. 717 p, 1999.

SALLA, M. R.; PAREDES-ARQUIOLA J.; SOLERA, A.; ÁLVAREZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; OLIVEIRA, A. L. de. Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 189-204. 2014a. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p189-204>

SALLA, M. R. Herramienta AQUATOOL en Brasil. Posibles cuestiones del usuário principiante. In: Solera, A.; Paredes-Arquiola, J.; Álvarez, J. A.; Monzonís, M. P. (Org.). **Aplicaciones de Sistemas Soporte a la Decisión en Planificación y Gestión Integradas de Cuencas Hidrográficas**. 1 ed. Barcelona: Marcombo, v. 1, p. 5-18. 2014b.

SALLA, M. R.; PAREDES-ARQUIOLA J.; ELVIRA, N. L.; ALAMY FILHO, J. E.; COSTA, E. S. Aplicação da ferramenta EvalHid para calibração de parâmetros e simulação de vazões no alto curso do rio Araguari, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n.1. p. 189-204. 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n1.p276-285>

SANTOS, M. G. B.; CRUZ, G. D. D.; GOMES, M. M.; SOUTO, R. M. G.; FUSCONI, R.; ROSSI, D. A.; PAVANIN, L. A. Qualidade da água do Rio Uberabinha – o que mudou nos últimos 11 anos? **Anais do 3º Congresso Internacional RESAG**. Disponível em: <http://www.resag.org.br/congressoresag2017/anais/trabalhos/aprovado>. Acesso em 11 de out. 2018.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 3a ed., Org. por ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, pp. 253-289, 2004.

Recebido em: 04/07/2018

Aceito para publicação em: 21/11/2018

Apêndice 1

Planilha elaborada no Excel para se obter dados de Vazão simulada, vazão observada e $F_{\text{médio}}$ durante a calibração.

MÊS/ANO	SIMULADO (hm ³ /mês)	OBSERVADOS (hm ³ /mes)	(SIMULADO OBSERVADO) ²	(OBSERVADO MED OBSERVADO) ²
jan/05	1.3788	3.25568	3.522686884	482.9360889
fev/05				
mar/05	4.3450	6.25376	3.643550723	360.1541183
abr/05	5.3896	7.34816	3.835876199	319.813381
mai/05	6.2702	8.95264	7.195725228	265.0008564
jun/05	7.0123	9.85312	8.070334482	236.4941685
jul/05	7.6377	10.26528	6.904107704	223.9873489
ago/05	8.1647	13.16576	25.0102911	145.5817656
set/05	8.6088	19.41408	116.7547648	33.84222303
out/05	8.9828	12.15648	10.07203075	170.9558054
nov/05	9.2979	19.77792	109.8308721	29.74139192
dez/05	9.5632	16.14688	43.34471911	82.53008251
jan/06	27.8078	30.76704	8.756817223	30.64234813
fev/06	26.5117	36.59904	101.7534548	129.2212635
mar/06	25.4182	46.31904	436.8448512	444.6848958
abr/06	24.4955	49.19616	610.1242734	574.3055568
mai/06	23.7168	36.00288	150.9489703	116.0229093
jun/06	23.0595	24.93504	3.517722603	0.087880764
jul/06	22.5046	21.48768	1.034159759	14.0160901
ago/06	22.0361	18.42912	13.01032951	46.27219543
set/06	21.6404	34.44672	164.0017291	84.92052111
out/06	21.3061	32.90176	134.4592636	58.83308944
nov/06	21.0236	27.5456	42.53681764	5.355119445
dez/06	20.7847	32.4288	135.5850191	51.80131587
jan/07	59.8199	79.15744	373.9395728	2908.008418
fev/07	52.9320	12.15278	1662.947192	171.0526323
mar/07	47.1235	43.83072	10.84208967	345.9314719
abr/07	42.2250	70.17344	781.1158593	2019.779149
mai/07	38.0940	33.04288	25.51337684	61.01786218

jun/07	34.6100	24.4944	102.3261793	0.543297097
jul/07	31.6718	19.5136	147.8215714	32.69423059
ago/07	29.1937	19.41408	95.64014701	33.84222303
set/07	27.1035	15.88896	125.766161	87.28280886
out/07	25.3405	10.80704	211.2221369	208.0646683
nov/07	23.8534	37.24704	179.3894839	144.3735163
dez/07	22.5989	44.50464	479.8612476	371.4544305
jan/08	64.3602	36.13248	796.8064775	118.8316506
fev/08	57.0295	69.25824	149.5421352	1938.354989
mar/08	50.8474	79.88544	843.2052329	2987.05459
abr/08	45.6340	74.83104	852.4675146	2460.115668
mai/08	41.2373	39.34656	3.574882482	199.2352886
jun/08	37.5293	30.63744	47.49780319	29.22432893
jul/08	34.4020	27.06048	53.89864224	3.345215764
ago/08	31.7645	22.1616	92.215403	9.424205572
set/08	29.5398	20.4768	82.13871512	22.60704751
out/08	27.6634	25.58304	4.327824312	0.123589583
nov/08	26.0805	27.83808	3.089008983	6.794327595
dez/08	24.7452	43.88256	366.2373074	347.8625278
jan/09	70.6601	65.42208	27.4369885	1615.283774
fev/09				
mar/09	54.3430	50.62176	13.84764433	644.6659681
abr/09	48.0479	49.29984	1.567265013	579.285621
mai/09	42.7393	34.05888	75.34963992	77.92286896
jun/09	38.2624	32.24448	36.21585158	49.18207224
jul/09	34.4870	29.78208	22.13594076	20.70789757
ago/09	31.3029	24.624	44.60785105	0.369040332
set/09				
out/09	26.3527	27.39744	1.091425006	4.691352836
nov/09	24.4425	38.43936	195.9124496	174.4479119
dez/09	22.8312	74.05344	2623.712875	2383.583105
jan/10	65.1039	58.68288	41.22904373	1118.9957
fev/10	56.8771	29.26368	762.5023627	16.2585812
mar/10	49.9397	65.13696	230.9567727	1592.446783
abr/10	44.0895	35.01792	82.29269356	95.77427284
mai/10	39.1559	47.9568	77.4550362	516.4398555

jun/10	34.9955	17.85888	293.6623079	54.35533249
jul/10	31.4868	16.40736	227.3895072	77.86521553
ago/10	28.5278	67.664	1531.643619	1800.518168
set/10	26.0322	8.52768	306.4093739	279.0171649
out/10	23.9275	28.9008	24.73376358	13.46385863
nov/10	22.1523	29.13344	48.73634058	15.225238
dez/10	20.6550	53.16192	1056.701189	780.1090932
jan/11	59.1052	67.99936	79.10567166	1829.09097
fev/11	52.1219	49.7872	5.450687769	602.9830459
mar/11	46.2328	81.6688	1255.707694	3185.17031
abr/11	41.2666	74.08448	1077.016388	2386.614935
mai/11	37.0784	42.98944	34.94084824	315.3448983
jun/11	33.5463	31.25952	5.229260623	36.33718307
jul/11	30.5674	22.05792	72.41193032	10.07152686
ago/11	28.0551	21.9024	37.85588819	11.08281958
set/11	25.9362	14.28192	135.8213681	119.8930153
out/11	24.1489	28.20096	16.41906979	8.817770498
nov/11	22.6414	35.58816	167.6194109	107.2606777
dez/11	21.3697	45.016	559.1487607	391.4269586
jan/12	61.5216	75.2768	189.2066422	2504.533363
fev/12	54.1361	41.83488	151.318943	275.6726625
mar/12	47.9079	38.51712	88.18707101	176.5080469
abr/12	42.6557	44.40096	3.045943236	367.468699
mai/12	38.2264	37.09152	1.287945935	140.6603852
jun/12	34.4910	31.07808	11.64805742	34.18265089
jul/12	31.3407	21.20256	102.782576	16.23225196
ago/12	28.6839	16.4592	149.4421334	76.95301744
set/12	26.4430	15.96672	109.7526504	85.83590569
out/12	24.5530	22.70592	3.411637335	6.378488161
nov/12	22.9588	44.16768	449.817874	358.5794092
dez/12	21.6140	40.72032	365.0515609	239.9039508
jan/13	62.3363	42.84576	379.8824289	310.2626169
fev/13				
mar/13	48.1524	31.98528	261.3759417	45.61372125
abr/13	42.6802	37.94688	22.4047522	161.6812217
mai/13	38.0655	21.35808	279.1386107	15.003281

jun/13	34.1738	42.57472	70.57529627	300.7877344
jul/13	30.8918	22.6816	67.40672275	6.501923197
ago/13	28.1238	13.98592	199.8794551	126.4627749
set/13	25.7893	28.81952	9.182144058	12.87398153
out/13	23.8204	22.31712	2.259745403	8.493534422
nov/13	22.1596	25.29792	9.848811331	0.004413357
dez/13				
jan/14				
fev/14	51.9519	31.1040	434.6357217	34.48641012
mar/14	45.1676	25.84224	373.4683323	0.37301935
abr/14				
mai/14	34.6221	14.85216	390.8491749	107.7304269
jun/14				
jul/14	27.1227	26.4384	0.468331851	1.456639234
ago/14	24.2294	17.6272	43.58916225	57.82517924
set/14	21.7894	18.67648	9.690015019	42.96811545
out/14	19.7315	12.76512	48.53092205	155.4103037
nov/14	17.9960	19.70592	2.923789327	30.53188955
dez/14	16.5323	50.25888	1137.484811	626.3704054
Somatório		3759.966218	26173.00845	45656.66796

**MED
OBSERVADO
25.2314869**

F1 0.426742914