

Efeitos da modificação do uso e cobertura da terra no comportamento da recarga e descarga em uma porção do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral

Effects of land use and land cover changes on recharge/discharge behavior in the Guarani/Serra Geral Integrated Aquifer System

Geovano Pedro Hoffmann*, Luiz Fernando Scheibe**, Alberto Elvino Franke***, Arthur Schmidt Nanni****

* Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: hoffmange@hotmail.com

** Programa de Pós-Graduação em Geografia e Programa Interdisciplinar em Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: scheibe2@gmail.com

*** Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: alberto.franke@ufsc.br

**** Departamento de Educação do Campo, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: arthur.nanni@ufsc.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v54i0.75297>

Resumo

Além das condições climáticas, modificações no uso e na cobertura da terra interferem na disponibilidade de águas subterrâneas que compõem o escoamento em bacias hidrográficas. Na região que compreende o Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG), a avaliação da influência dessas mudanças foi verificada através de processos quantitativos tanto para a recarga quanto para a descarga. O objetivo da pesquisa foi investigar os efeitos da modificação do uso e cobertura da terra sobre o escoamento superficial e recarga das águas, em regime de fluxo de base, em uma área de descarga do SAIG/SG na sub-bacia do Rio Canoas, abrangida pela estação hidrometeorológica Vila Canoas. A metodologia consistiu em identificar, através de mapeamento multitemporal (de 1957, 1976, 1997 e 2017) o uso e cobertura da terra e estimar o fluxo de base, a recarga subterrânea e a velocidade média do escoamento superficial. Os dados sugerem que o predomínio de pastos e áreas cultivadas, entre 1957 e 1976, proporcionou redução anual da recarga e da descarga de águas do SAIG/SG. Por outro lado, houve uma melhoria das condições de infiltração nos cenários de 1976 a 2017, a partir da expansão contínua da cobertura florestal e do aumento da precipitação, de forma que o comportamento passou a ser de aumento anual da recarga e da descarga de águas subterrâneas nos cursos fluviais. Esses resultados indicam ser possível a aplicação dessa metodologia em outras bacias hidrográficas e a necessidade da discussão sobre a conservação ambiental na gestão de águas.

Palavras-chave: Interação de águas; fluxo de base; mudanças antropogênicas; Sistema Aquífero Guarani; Sistema Aquífero Serra Geral

Abstract

Beyond climatic conditions, changes in land cover can interfere on the groundwater availability on watersheds. In the region of occurrence of Guarani/Serra Geral Integrated Aquifer System (SAIG/SG), the assessment of this influence has been verified in outcrop areas, which allow groundwater recharges and discharges. This paper aims to show an investigation of the effects of land cover changes on baseflow of SAIG/SG discharge area on Canoas river basin, drew by Vila Canoas hydrometeorological station. The methodology consisted on detection of land cover changes through multitemporal mapping (1957, 1976, 1997 and 2017) and baseflow estimation, the groundwater recharge, discharge and the runoff linked to each land coverage. The results suggest that the predominance of pastures and cultivated areas between 1957 and 1976 provided less infiltration, as observed in the reduction of the annual groundwater recharge and discharge from SAIG/SG. On the other hand, there was an improvement in the infiltration conditions on the scenarios from 1976 to 2017. The continuous expansion of the forest cover and the increasing of precipitation volumes has incremented the annual groundwater recharge and discharge into the streams. The results show that the methodology is able to be applied to other watersheds where there are no historical fluvial data and indicates the necessity of further discussion about the environmental conservation by the watersheds management institutions.

Keywords: Water interaction; baseflow; anthropogenic changes; Guarani Aquifer System; Serra Geral Aquifer System.

I. INTRODUÇÃO

Normalmente, pela insuficiência de dados, o conhecimento das águas para o planejamento em uma bacia hidrográfica é baseado apenas em modelos hidrológicos. Esses modelos costumam considerar o uso da terra estático e priorizam a variabilidade do clima para explicar o comportamento de uma bacia hidrográfica. No entanto, a gestão de águas exige uma abordagem abrangente frente à pressão humana sobre o ambiente. É nesse ponto que aparecem questões mais complexas aos planejadores e gestores. À vista disso, as tomadas de decisão exigem análises que envolvem, sobretudo, o conhecimento do fluxo de base na interação aquífero-rio, como o comportamento da contribuição das águas subterrâneas às águas superficiais, e da sua relação com diferentes cenários de uso da terra (GILFEDDER *et al.*, 2012).

As investigações sobre alterações do uso da terra e os seus efeitos nas águas subterrâneas têm focado principalmente no estudo da qualidade da água e negligenciado estudos sobre a sua quantidade (DAMS *et al.*, 2008). Ao mesmo tempo, nas avaliações quantitativas de dinâmica hidrológica, é recorrente a separação tradicional entre águas subterrâneas e superficiais. Estudá-las de forma interdisciplinar e transdisciplinar evidencia que elas se encontram no ambiente, via de regra, hidraulicamente conectadas, através de interações

entre aquíferos e bacias hidrográficas (BRUNKE e GONSER, 1997; WINTER *et al.*, 1998; KALBUS *et al.*, 2006; VASCONCELOS *et al.*, 2013; BARTHEL, 2014).

Considerando o ciclo hidrológico, como avaliado em diversos estudos (ZHANG e SCHILLING, 2006; JUCKEM *et al.*, 2008; OGDEN *et al.*, 2013), o fluxo de base, o qual supre os cursos d'água de uma bacia hidrográfica, tem como variáveis o clima e o uso e cobertura da terra no momento da recarga do sistema hidrogeológico. Dessa forma, o estudo integrado dessa influência das águas subterrâneas nas águas superficiais é verificado nas estimativas de descarga. O objetivo deste trabalho é investigar os efeitos da modificação do uso e cobertura da terra sobre o escoamento superficial e a recarga das águas, em regime de fluxo de base, em área onde ocorre tanto a recarga, quanto a descarga do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) na porção da bacia do rio Canoas à montante da estação hidrometeorológica Vila Canoas/SC (Figura 1).

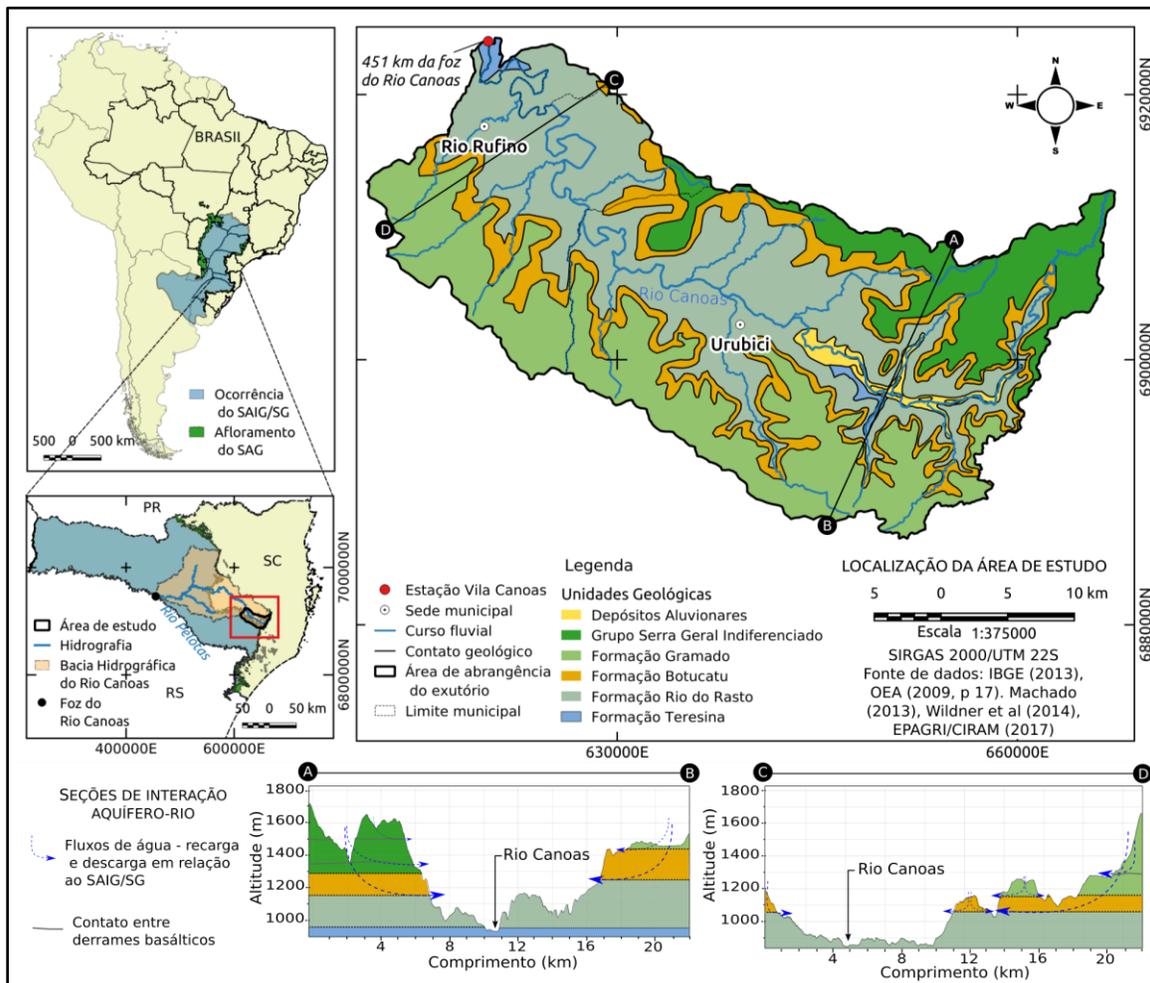


Figura 1 – Localização da área de estudo. Fonte: Elaboração dos autores.

O SAIG/SG é o conjunto de unidades hidroestratigráficas formado pela conectividade hidráulica entre o Sistema Aquífero Guarani – SAG – e o Sistema Aquífero Serra Geral – SASG (SCHEIBE e HIRATA, 2008). A região elencada para a pesquisa (Figura 1) estende-se desde as nascentes do rio Canoas, nos campos de cima da Serra Geral, até a estação fluviométrica Vila Canoas, com área total de 1021 km². Apresenta drenagem disposta predominantemente no sentido leste-noroeste e compreende parte do município de Urubici, inteiramente o município de Rio Rufino e pequena parte do município de Bom Retiro. Na área de estudo, como verificado nas seções de interação aquífero-rio, o canal principal está situado topograficamente abaixo da superfície potenciométrica do SAIG/SG, servindo como área de descarga de suas águas subterrâneas, que contribuem para a manutenção dos fluxos de base.

De acordo com Wildner *et al.* (2014) essa região tem como unidades geológicas o Grupo Serra Geral (Indiferenciado ou sua Formação Gramado) e as formações Botucatu, Rio do Rasto, Teresina e Depósitos Aluvionares. O Grupo Serra Geral Indiferenciado é considerado uma unidade geológica no Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina, de 2014, e é formado por “basaltos, basalto andesitos, riocitos e riolitos, de filiação tholeiítica, com arenitos intertrápicos Botucatu na base” (WILDNER *et al.*, 2014 – MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DE SANTA CATARINA). Data do Cretáceo Inferior e nele é possível individualizar a Formação Gramado, também composta por derrames basálticos, e que se diferencia pelas “formas de lóbulos, melanocráticos cinza; horizontes vesiculares espessos e abundantes”, em que “predominam zeolitas, carbonatos, apofilita e saponita, com estruturas de fluxo e pahoehoe” (WILDNER *et al.*, 2014 – MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DE SANTA CATARINA), assim como intercalações intertrápicas da Formação Botucatu. Já a Formação Botucatu data do período Jurássico, é de ambiente desértico e é formada por arenitos eólicos, variando o tamanho do grão de fino a médio, que em Santa Catarina constituem o Aquífero Guarani.

A Formação Rio do Rasto apresenta litologias de ambientes “lacustre, deltaico, eólicos e raros depósitos fluviais” originadas no Período Triássico. A mais antiga unidade geológica encontrada na área de estudo, a Formação Teresina, datada do Permiano, apresenta “depósitos marinhos rasos representados pela alternância de argilitos e folhelhos cinza-escuro com siltitos e arenitos muito finos cinza-claro” (WILDNER *et al.*, 2014 – MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DE SANTA CATARINA). Estas unidades afloram, predominantemente, nas porções mais baixas da área de estudo, sendo pouco permeáveis e de baixa capacidade de transmissão de água, o que as caracteriza como aquíferos. De acordo com Machado (2013), a unidade hidroestratigráfica Rio do Rasto, quando confinada pelo SAIG/SG, comporta-se com armazenamento reduzido, e, em áreas aflorantes,

como aquífero livre a semiconfinado. Já a Formação Teresina comporta-se como uma unidade selante para a percolação de águas, desviando os fluxos verticais de infiltração para uma condição horizontal.

A unidade Depósitos Aluvionares correspondente ao Holoceno, situada, em parte, nas imediações do Rio Canoas e de seus tributários na porção inferior da área de estudo, possui “areias grossas a finas, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos, em calhas de rios e planícies de inundação” (WILDNER *et al.*, 2014 – MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DE SANTA CATARINA). Na seção à montante da bacia hidrográfica do Rio Canoas, pela sua limitada distribuição, essa unidade é pouco expressiva como aquífero livre (MACHADO, 2013).

Dentre outros critérios de escolha dessa área, foi decisiva a presença da estação hidrometeorológica Vila Canoas. Ela apresenta dados diários de vazão e precipitação para um período longo, datados a partir do ano de 1957, e de acesso aberto. Por outro lado, durante o período de funcionamento da estação, houve alterações significativas no uso e cobertura da terra, o que permite avaliar os seus efeitos no comportamento do escoamento subterrâneo. Além disso, a área de estudo não possui represamentos artificiais de águas que pudessem interferir na variação dos dados de vazão.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Uso e cobertura da terra

O mapeamento multitemporal do uso e cobertura da terra dos anos de 1957, 1976, 1997 e 2017, utilizou como método de aquisição de dados o sensoriamento remoto. O período de aproximadamente 20 anos de diferença entre cada ano de mapeamento teve como critério mostrar com maior detalhamento a evolução do uso da terra desde o início do funcionamento da estação hidrometeorológica Vila Canoas/SC, em 1957, bem como a seleção de imagens aéreas e de satélite com qualidade visual e radiométrica para a região de pesquisa.

O mapeamento, na escala de 1:50000, foi realizado no *software* QGIS, por fotointerpretação de aerofotografias disponíveis na Secretaria de Planejamento do Estado de Santa Catarina e por classificação supervisionada, através do complemento *Semi-automatic Classification*, de imagens orbitais do satélite *Landsat* obtidas através do portal do *United States Geological Survey* (USGS, 2017 – Quadro 1). Após o processamento, foram extraídos dados referentes à ação antropogênica, na forma de área e porcentagem, para quatro categorias de contribuição ao escoamento, de Kibler (1982) *apud* Porto *et al.* (2000), a saber: florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos.

Quadro 1 – Imagens utilizadas no mapeamento do uso e cobertura da terra.

Ano de cobertura	Tipo de registro	Resolução espacial (m)	Forma de mapeamento	Fonte
1957	Aerofotografia	1	Fotointerpretação	Secretaria de Planejamento/SC
1976	Imagem de satélite	60	Classificação supervisionada	USGS (2017)
1997	Imagem de satélite	30	Classificação supervisionada	USGS (2017)
2017	Imagem de satélite	15	Classificação supervisionada	USGS (2017)

Fonte: Elaboração dos autores.

Séries históricas diárias de precipitação e vazão

A estação hidrometeorológica Vila Canoas é atualmente de responsabilidade da ANA e é operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Até o desenvolvimento da presente pesquisa, o monitoramento da precipitação, sob o código 02749031, disponibilizava dados do período de 14/06/1957 a 30/04/2017, enquanto o monitoramento da vazão, sob o código 71200000, apresentava dados de 01/06/1957 a 31/05/2017 (ANA, 2017). Para as falhas da série histórica de dados de precipitação, foi utilizado o método de ponderação regional, Equação 1, conforme Oliveira *et al.* (2010, p. 1188), para atender de maneira específica cada intervalo de dados diários:

$$Px = \frac{1}{n} \sum_{y=1}^n \frac{Nx}{Ny} Py \quad (1)$$

Sendo Px o valor da precipitação anual da estação Vila Canoas a ser encontrado para o preenchimento do intervalo (em mm); n o somatório de postos pluviométricos na vizinhança; Nx o valor da média aritmética da série histórica de precipitação da estação Vila Canoas (em mm); Ny o valor da média aritmética da série histórica de precipitação do posto pluviométrico vizinho, de ordem “i” para o ano da falha (em mm); Py o valor da precipitação do posto pluviométrico vizinho de ordem “y” para o ano de falha (em mm).

Com o diferencial de serem mais distantes em relação aos demais postos pluviométricos, as estações Bom Jardim da Serra (02849009) e São Joaquim (02849003) tiveram os dados selecionados apenas para os períodos em que nenhuma das outras estações na região de estudo (Urubici – 02849021 e Rio Bonito – 02749035) puderam preencher a série histórica da estação Vila Canoas. Não houve a reconstituição de dados da vazão em virtude da estimativa do escoamento subterrâneo poder ser realizada independentemente da ocorrência das falhas de registro.

Parâmetros de estimativa de recarga e descarga de águas do SAIG/SG

Para a estimativa da recarga e descarga de águas subterrâneas do SAIG/SG na área de estudo foram obtidos inicialmente os parâmetros índice de recessão (k), coeficiente de recessão (a) e índice máximo do escoamento de base ($BFI_{máx}$). Em uma planilha LibreOffice Calc, foram transformados os dados de vazão de m^3/s para ft^3/s e o valor da área de drenagem de km^2 para mi^2 , o que é exigido para o processamento de dados pelos métodos no *software Groundwater Toolbox*, do USGS (BARLOW *et al.*, 2015).

O índice de recessão k foi obtido pelo modelo RECESS, desenvolvido por Rutledge (1998), através do *software Groundwater Toolbox*, do USGS (BARLOW *et al.*, 2015), o qual auxilia na identificação dos períodos de recessão de chuvas. No cálculo foi definido um período mínimo de 15 dias de recessão, tomando como critério a recomendação de Rutledge (1998) de considerar entre 10 e 20 dias.

Após o pico de vazão, há um tempo em que o escoamento superficial ainda estará contribuindo para a vazão total registrada (RUTLEDGE, 1998). Esse período, eliminado manualmente dos segmentos de recessão selecionados, foi determinado pela Equação 2, de relação empírica, em que N é o número de dias após o pico de vazão e A é a área de drenagem da estação fluviométrica, na unidade de milhas quadradas (LINSLEY *et al.*, 1982 *apud* RUTLEDGE, 1998). No caso da estação Vila Canoas/SC, o cálculo da Equação 2 fornece um valor de \log em 3,3 dias. Dessa forma, foram contabilizados valores de vazão, no padrão linear, em cada segmento de recessão a partir do número mínimo de 4 dias após o pico de vazão. Outro critério utilizado foi o comportamento de cada período específico de recessão, de modo que *outliers* de valores individuais de k também fossem descartados, especialmente para períodos de recessão muito longos e períodos de recessão demasiado curtos, o que fez a duração para a linearidade ou a sua aproximação para os segmentos selecionados variar entre 5 e 15 dias contínuos.

$$N = A^{(0,2)} \quad (2)$$

Dessa forma, 29 valores dos intervalos de recessão representativos de k foram identificados e inseridos em uma função polinomial de segundo grau (Equação 3) para criar uma curva mestra de recessão e obter automaticamente o valor médio do índice de recessão k . Na equação 3, t é o intervalo de tempo, em dia, $\log Q$ é o logaritmo com valor calibrado de todos os períodos de recessão selecionados, expresso em ft^3/s , e A , B e C são coeficientes (RUTLEDGE, 1998). O valor do índice de recessão médio encontrado para esses períodos foi de 63,39 dias/ $\log Q$.

$$t = A \cdot (\text{Log}Q)^2 + B \cdot (\text{Log}Q) + C \quad (3)$$

O coeficiente de recessão (a) pode ser obtido no *Groundwater Toolbox* a partir da conversão externa do índice de recessão (k), pelo método RECESS, ou a partir do método de Eckhardt (2008). Optou-se por ambos, tendo em vista que o valor do coeficiente de recessão (a) é utilizado nos demais modelos integrados a esse *software*. No primeiro método, o valor médio do índice de recessão (k), de 63,39 dias/log, foi incorporado à Equação 4, em que Δt é o período do intervalo de tempo, para a sua conversão ao coeficiente de recessão (a) (ECKHARDT, 2008) através de planilha baseada no método de Collischonn e Fan (2013), cujo valor identificado foi de 0,984 dia⁻¹:

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (4)$$

O método de correlação de Eckhardt (2008) utiliza dados médios diários da vazão (y_k) de todos os períodos de recessão registrados pela estação fluviométrica e correlaciona os dados da Equação 5, na análise de cada um desses dias (y_{k+1}) (ECKHARDT, 2008). O resultado gerado pelo método de Eckhardt (2008) foi de 0,977 dia⁻¹, o que permite confirmar a aproximação satisfatória ao valor encontrado pela conversão do índice de recessão (k), através do método RECESS, de 0,984 dia⁻¹.

$$a = \frac{y_{k+1}}{y_k} \quad (5)$$

Em razão dos dois métodos utilizarem a mesma forma de obtenção do coeficiente de recessão (a), com vários períodos de recessão da série de dados de vazão, e com valores próximos, foi realizada a média aritmética entre eles, o que resultou em um coeficiente de recessão (a) final de 0,980 dia⁻¹. O *Groundwater Toolbox* realiza a estimativa do índice máximo do escoamento de base ($BF_{m\acute{a}x}$) com o método do filtro inverso de Collischonn e Fan (2013). O filtro inverso (Equação 6) considera que o escoamento de base é proveniente da descarga de águas subterrâneas e é linearmente proporcional ao armazenamento do aquífero durante longos períodos de recessão. Na Equação 6, b'_{i-1} é o intervalo de tempo do dia antecedente menos 1 para o valor do escoamento de base atual (b'_i) e que utiliza o coeficiente de recessão (a), a partir de um ou mais segmentos de recessão, com a condição de que b_{i-1} seja menor que y_{i-1} , isto é, que o valor máximo individualizado e calculado pelo filtro reverso seja menor que a vazão total observada para o tempo i menos 1 (COLLISCHONN e FAN, 2013).

$$b'i - 1 = \frac{bri}{a} \quad (6)$$

Em seguida, o $BFImáx$ é obtido pelo somatório de $b'i$ (do filtro inverso) dividido pelo somatório da vazão total observada (y) da estação fluviométrica, durante determinado tempo (i) (Equação 7 - COLLISCHONN e FAN, 2013).

$$BFImáx = \frac{\sum_{i=1}^N bri}{\sum_{i=1}^N yi} \quad (7)$$

Em uma planilha no LibreOffice construída pelo método de Collischonn e Fan (2013), ao se estabelecer o coeficiente de recessão (a) em $0,980 \text{ dia}^{-1}$, o $BFImáx$ resultou no valor de 0,510.

Escoamento de base

O filtro digital recursivo de Eckhardt (2005) torna possível identificar o fluxo de base em uma hidrógrafa. Para a separação do escoamento, foram utilizados dois parâmetros, o coeficiente de recessão (a) e o índice máximo do escoamento de base ($BFImáx$) aplicados à fórmula geral do filtro de Eckhardt (2005) em que se deve considerar $b_k \leq y_k$, ou seja, com a condição de que o valor do fluxo subterrâneo seja menor ou igual à vazão registrada na seção da estação fluviométrica (Equação 8):

$$bk = \frac{(1-BFImáx) a \times b (k-1) + (1-a) \times BFImáx \times yk}{1-a \times BFImáx} \quad (8)$$

Na equação 8, a é o coeficiente de recessão; $BFImáx$ é o índice máximo do fluxo de base; b é a vazão estimada do fluxo de base; y é a vazão total registrada; e k é o tempo (ECKHARDT, 2005). A separação do escoamento pelo algoritmo de Eckhardt (2005) foi realizada no *Groundwater Toolbox* (BARLOW *et al.*, 2015) para toda a série de dados de vazão da estação Vila Canoas (1957-2017), em ft^3/s , e admitiu a ocorrência de falhas de registro de vazão. No *software*, foram informados os dois parâmetros calibrados para a estação fluviométrica Vila Canoas/SC, com o coeficiente de recessão (a), de valor médio entre o método de Rutledge (1998) e de Eckhardt (2008), em $0,980 \text{ dia}^{-1}$, e o $BFImáx$, do método de Collischonn e Fan (2013), no valor de 0,510. Com os dados anuais em planilha do LibreOffice Calc, o escoamento de base foi convertido da unidade de ft^3/s para m^3/s pela divisão com o fator de conversão 0,0283.

O escoamento de base anual médio, em cada cenário de uso e cobertura da terra analisado (1957-1976, 1976-1997 e 1997-2017), foi obtido pela média aritmética dos valores anuais médios do fluxo de base, estimados com o filtro de Eckhardt (2005).

Recarga subterrânea

A estimativa de recarga subterrânea foi obtida pelo método do deslocamento da curva de recessão ou método Rorabaugh (Equação 9), implementado no modelo RORA e incorporado ao *Groundwater Toolbox* (BARLOW *et al.*, 2014; RUTLEDGE, 1998). Nessa equação, R é o total de recarga; Q1 é a vazão extrapolada do escoamento de base que precede o evento de recarga para um determinado tempo crítico; e Q2 é a vazão extrapolada do escoamento de base posterior ao evento de recarga para um determinado tempo crítico (RUTLEDGE, 2007).

$$R = \frac{2.(Q2-Q1).k}{2,3026} \quad (9)$$

Com os parâmetros definidos, o índice de recessão (k) e o tempo mínimo que antecede as recessões, o algoritmo verifica os períodos de recessão e identifica o maior pico entre dois segmentos da vazão registrada (RUTLEDGE, 2007). Os arquivos gerados, no formato CSV, apresentavam dados em polegadas por ano, para cada unidade de área de drenagem, e foram convertidos em milímetros por ano. A porcentagem da recarga média anual da precipitação em cada cenário de uso e cobertura da terra analisado (1957-1976, 1976-1997 e 1997-2017) foi calculada pela média aritmética dos percentuais anuais de recarga média da precipitação total.

Estimativa da velocidade média do escoamento superficial

A análise da velocidade média do escoamento superficial, utilizada em Hoffmann e Nanni (2017), é um método indireto para avaliar a correlação do escoamento superficial com a variação do escoamento de base. O método utiliza como fonte de dados a declividade do terreno e a velocidade média do escoamento superficial para as categorias de uso e cobertura da terra florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos de Kibler (1982) *apud* Porto *et al.* (2000, p. 819).

A declividade do terreno foi gerada no QGIS e utilizou como fonte o Modelo Digital de Elevação (MDE) do projeto SRTM, com resolução espacial de 30 metros (EPAGRI/CIRAM, 2017). Os valores usados na calculadora *raster* com multiplicação do valor de declividade de cada pixel consideraram a média de valores mínimos e máximos da velocidade do escoamento superficial para as categorias de uso e cobertura da terra nos intervalos

até 11% e incluíram os valores mínimos de velocidade do escoamento superficial para declividade acima de 12% de Kibler (1982) *apud* Porto *et al.* (2000, p. 819 - Tabela 1).

Tabela 1 – Velocidades médias de escoamento superficial (em m/s) em função da declividade (%) e categorias de uso e cobertura da terra.

Uso e cobertura da terra	Declividade (%)			
	0-3	4-7	8-11	>12
Florestas	0,25	0,65	0,9	1
Pastos	0,4	0,95	1,2	1,3
Áreas cultivadas	0,45	1,15	1,55	1,7
Pavimentos	1,3	3,3	4,6	5,2

Fonte: Adaptado de Kibler (1982) *apud* Porto *et al.* (2000, p. 819).

Em uma planilha do LibreOffice Calc, o somatório das áreas em cada ano foi menor que o tamanho da área de estudo, de 1021 km² e, por essa razão, a área de cada valor de escoamento superficial para cada ano analisado teve o seu valor compensado proporcionalmente pela diferença com a área total. Dessa maneira, seguiu-se o método adotado em Hoffmann e Nanni (2017), em que a estimativa do escoamento superficial médio (Es), em m/s, para os anos de 1957, 1976, 1997 e 2017, foi calculada multiplicando-se a área compensada, em km² (para as categorias florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos para cada intervalo de declividade) pela velocidade média do escoamento superficial correspondente (*VmES*) na Tabela 1, cujo somatório foi dividido pela extensão da área total de estudo (1021,1 km²) (Equação 10).

$$ES = \frac{\frac{\text{florestas}}{A \times VmES} + \frac{\text{pastos}}{A \times VmES} + \frac{\text{áreas cultivadas}}{A \times VmES} + \frac{\text{pavimentos}}{A \times VmES}}{\text{Somatório de todas as áreas para todos os usos (100\%)}} \quad (10)$$

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uso e cobertura da terra

Nas elevações, onde se encontra o SAIG/SG, havia no ano de 1957 o predomínio da categoria pastos (48,4%), seguida das florestas (38,8%) e áreas cultivadas (12,7% - Figura 2). Em 1976, houve uma redução da participação da categoria pastos (24,7%), de modo que o seu espaço foi ocupado pelas áreas cultivadas, que migraram das vertentes para o fundo de vale e aumentaram a sua participação na área total (13,5%). Simultaneamente, a redução dos pastos e o deslocamento da atividade agrícola deu lugar ao avanço das florestas (61,5%), as quais passaram a cobrir grande parte das vertentes da área de estudo.

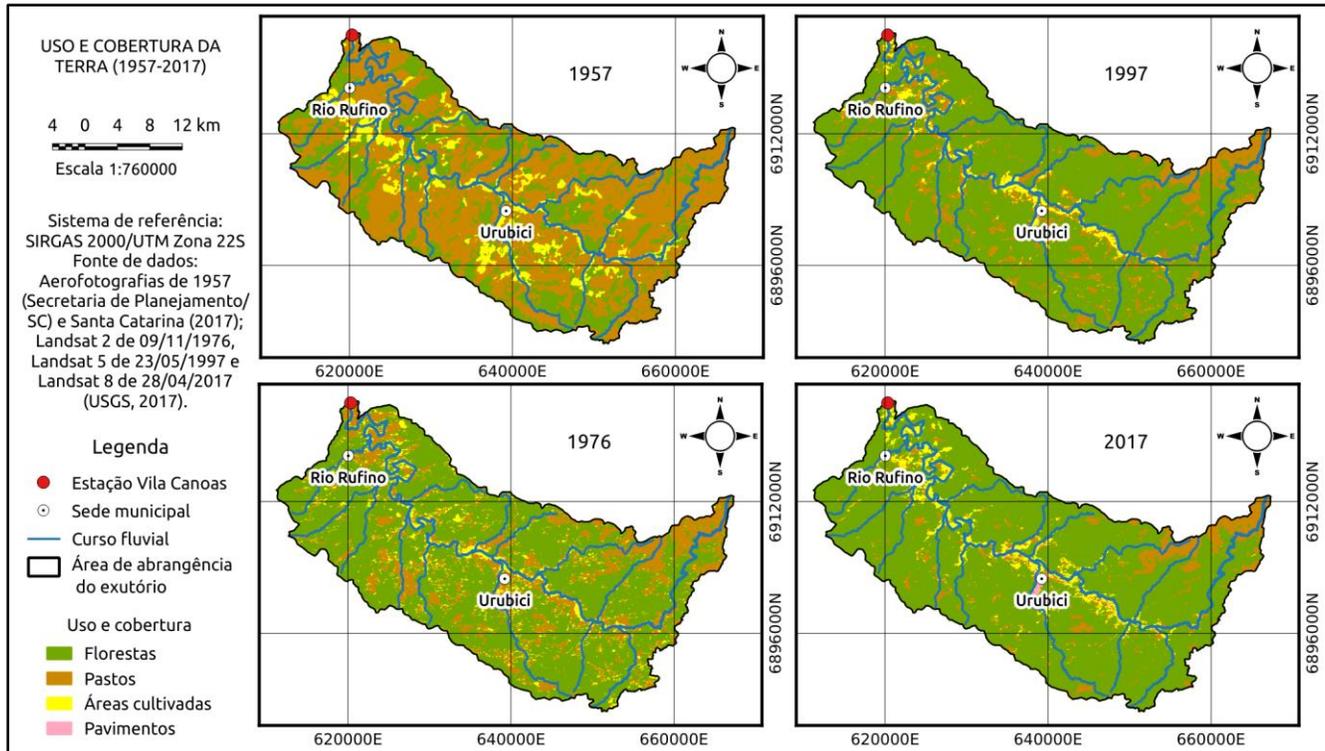


Figura 2 – Mapas de uso e cobertura da terra da área de estudo para os anos de 1957, 1976, 1997 e 2017. Fonte: Elaboração dos autores.

A cena de 1997 mostra uma recuperação relativa da categoria pastos (30,5%) e redução das áreas cultivadas (6,6%), processo que esteve restrito à planície do Rio Canoas, enquanto que nas vertentes houve a manutenção das áreas florestadas (62,4%). Especialmente na planície do vale, a situação se inverteu em 2017, com a redução da categoria pastos (17,5%) e crescimento das áreas cultivadas (13,6%). As florestas (68,1%) continuaram a avançar e tiveram o maior alcance para os quatro cenários analisados. O crescimento da classe pavimentos foi contínuo para os anos de 1957 (0,1%), 1976 (0,3%), 1997 (0,5%) e 2017 (0,8%), porém, não significativo. Na escala de mapeamento adotada para a classificação de uso e cobertura da terra, em 1:50.000, não houve a identificação da categoria florestas no fundo de vale, para todo o período de estudo.

Recarga de águas subterrâneas do SAIG/SG

Ao longo de toda a série histórica de dados, a recarga subterrânea na área de estudo, estimada a partir dos dados de vazão com o método do deslocamento da curva de recessão, no RORA, apresentou correspondência de comportamento com os dados de precipitação, como verificado na Figura 3.

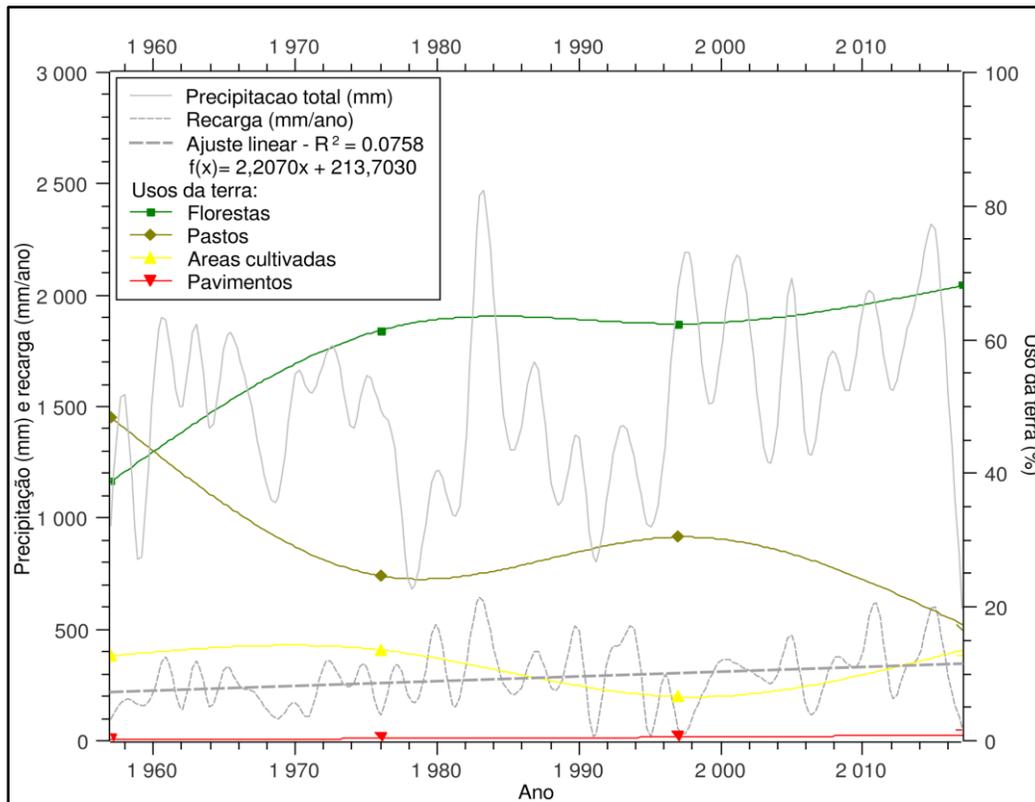


Figura 3 – Gráfico da precipitação total anual, recarga subterrânea e categorias de uso e cobertura da terra para o período de 1957 a 2017. Fonte: Elaboração dos autores.

No primeiro período de análise de uso e cobertura da terra da área de estudo (1957-1976), a recarga subterrânea anual variou entre 111,8 mm/ano e 378,73 mm/ano. A recarga anual média desse período (Tabela 2) foi de 217,34 mm/ano e a sua porcentagem da precipitação total anual foi de 14,52%. No comparativo aos demais períodos da Tabela 2, nota-se que o valor médio da recarga subterrânea entre 1957 e 1976 foi o menor das seis décadas analisadas (Figura 3), mesmo com a maior precipitação total média (1497,35mm) em relação ao período seguinte, de 1976 a 1997. Essa situação leva a crer que o uso e cobertura da terra nas elevações da região de pesquisa, ou seja, do SAIG/SG, especialmente pela presença de pastos e áreas cultivadas identificados nos mapas de 1957 e 1976 (Figura 2), reduzem a capacidade de infiltração em relação às áreas florestadas.

Tabela 2 – Valores médios de precipitação total, recarga anual média e participação da recarga média a partir da precipitação total para os períodos de análise do uso e cobertura da terra na área de estudo.

Período	Precipitação total média (mm)	Recarga anual média (mm/ano)	Recarga média a partir da precipitação total anual (%)
1957-1976	1497,35	217,34	14,52
1976-1997	1336,73	299,72	22,42
1997-2017	1728,27	306,76	17,75

Fonte: Elaboração dos autores.

Entre 1976 e 1997, a área de estudo obteve recargas entre 15,0 mm/ano e 518,2 mm/ano, enquanto que a recarga anual média desse período (Tabela 2) foi de 299,72 mm/ano e a sua porcentagem da precipitação total anual foi de 22,42%. Em relação ao período anterior, mesmo com a redução da precipitação total média (1336,73mm), a menor da série histórica de dados, houve o incremento da recarga subterrânea anual média. No mesmo período, as vertentes da área de estudo mantiveram a área em florestas (Figura 2), inferindo-se, assim, que essa categoria apresentou o crescimento do porte da vegetação em estágio sucessional, o que possibilitou a descompactação dos solos gerada pelas atividades humanas anteriores, a saber, pastos e áreas cultivadas, como mostrado no mapa de uso e cobertura da terra de 1997 (Figura 2).

Da mesma maneira, a variação da precipitação é fundamental para explicar a recarga na área de estudo, comparativamente mais do que a variável uso e cobertura da terra durante determinados períodos. Em uma situação em que chove menos, a água fica retida junto às copas das árvores e evapotranspira, o que reduz as chances de infiltração e, portanto, de recarga subterrânea, condição semelhante à de usos e coberturas da terra com áreas cultivadas e pastos. O período entre 1976 e 1997 apresenta essa situação de forma mais evidente do que nos demais cenários, como a possibilidade de não haver uma recarga ainda maior, tendo em vista que houve aumento da área florestada, mas redução da precipitação total média, o que pode ter ocorrido em períodos menores do que 20 anos, para a área de estudo, ao longo de toda a série histórica de dados. Há de se considerar ainda que a localização da estação pluviométrica no exutório da área de estudo, onde o vale é aberto e com condições climáticas que podem ser diferentes do interior da região em questão, é um fator que pode interferir nessa interpretação.

O período entre 1997 e 2017 (Tabela 2) apresentou valores de recarga subterrânea que variaram de 57,47 mm/ano a 616,86 mm/ano. A recarga anual média foi de 306,76 mm/ano, a maior de toda a série histórica de dados. Por sua vez, a participação da recarga média a partir da precipitação total média (1728,27 mm) foi de 17,45%, sendo o menor valor registrado dos três cenários analisados, dado o aumento proporcional da precipitação total média em comparação com o cenário de 1976-1997. O pequeno aumento da recarga anual média em relação ao período de 1976-1997 pode ser explicado pelo aumento das áreas florestais em relação à categoria de pastos, existentes em 1997 nas elevações em que se encontra o SAIG/SG, os quais mostraram-se menos expressivos em extensão nessas áreas no ano de 2017 (Figura 2).

A linha de ajuste linear para a recarga subterrânea anual (Figura 3) mostra uma tendência de aumento para o período de 1957 a 2017. A elevação contínua da precipitação aliada à expansão das florestas em áreas

em que ocorria a atividade com pastos e áreas cultivadas são fatores que justificam os dados encontrados com o método do deslocamento da curva de recessão no RORA. À vista disso, a resposta hidrológica da tendência geral de aumento de recarga anual é percebida no comportamento da descarga de águas subterrâneas, o que é explicado no tópico seguinte.

3.3 Descarga de águas subterrâneas do SAIG/SG

A Figura 4 ilustra o gráfico do escoamento de base anual para a série histórica de dados da estação Vila Canoas/SC. Em linhas gerais, o período de 1957 a 2017 apresenta picos elevados de vazão subterrânea para as condições ambientais da área de estudo, variando de 15 a 30 m³/s e que intercalam, com certa regularidade, com picos de baixa vazão anual, de 5 a 15 m³/s. As variáveis que podem explicar as diferenças nos valores de descarga de águas subterrâneas, através da recarga subterrânea do SAIG/SG, são a precipitação e as modificações de uso e cobertura da terra.

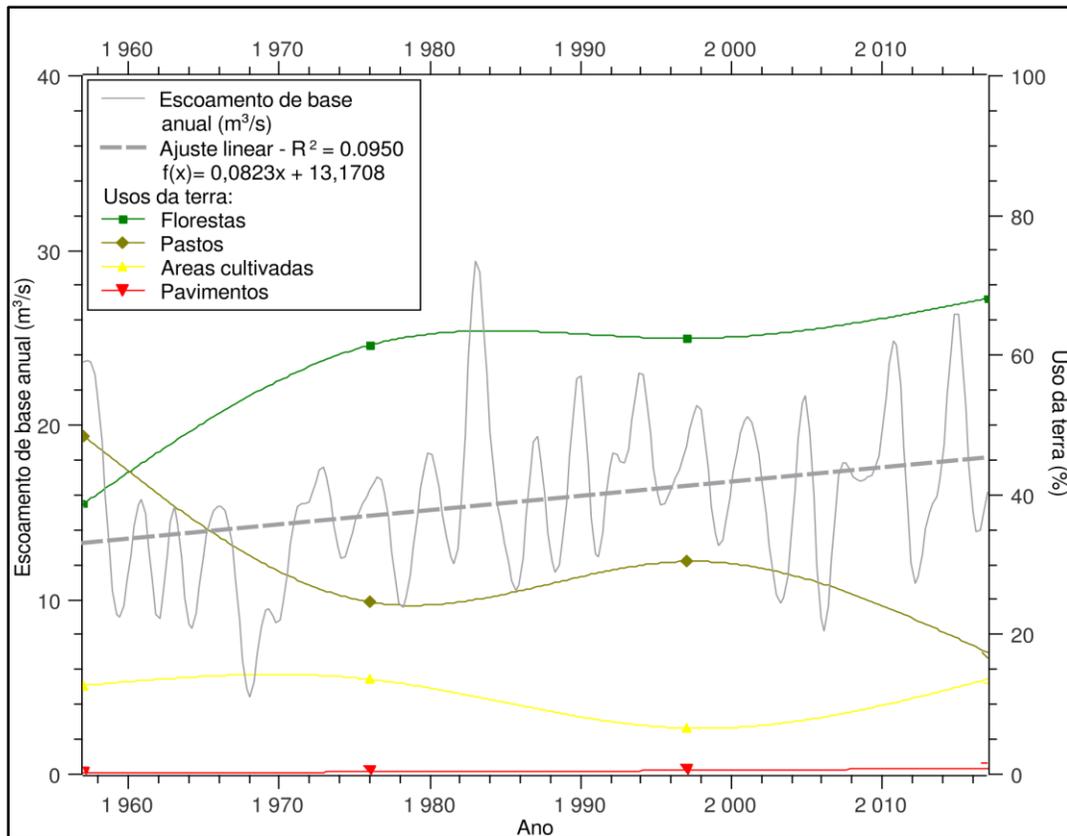


Figura 4 – Gráfico do escoamento de base anual e categorias de uso e cobertura da terra para o período de 1957 a 2017. Fonte: Elaboração dos autores.

Há um padrão de diminuição da estimativa do escoamento de base anual de 1957 até o início da década de 1970, com valores entre 4,4 m³/s a 23,6 m³/s (Figura 4) e valor médio de 13,41 m³/s (Tabela 3). O cenário de 1957 (Figura 2), mostrou o domínio da cobertura por pastos (48,4%), seguido da categoria florestas (38,8%) e áreas cultivadas (12,7%). A falta de florestas até década de 1970, possivelmente provocou a redução da recarga subterrânea. Tendo em vista que houve maior precipitação total média durante esse período, em relação ao período seguinte, de 1976 a 1997, quando ocorreu a diminuição da precipitação total média e aumento da recarga subterrânea (Tabela 3), infere-se que o predomínio da atividade com pastagens tenha ocasionado essa situação.

Tabela 3 – Valores médios do fluxo de base anual médio para os períodos de análise de uso e cobertura da terra na área de estudo.

Período	Escoamento de base anual médio (m ³ /s)
1957-1976	13,41
1976-1997	16,76
1997-2017	17,0

Fonte: Elaboração dos autores.

Entre 1976 e 1997, o fluxo de base anual variou entre 9,69 m³/s e 23,13 m³/s, com apenas um valor fora do padrão desse período, de 29,36 m³/s, correspondente às chuvas excepcionais de 1983 (Figura 4). O valor médio do escoamento de base nesse cenário foi de 16,76 m³/s, maior que o valor médio entre 1957 e 1976 (Tabela 3). As áreas que foram abandonadas com o fim da atividade madeireira deram lugar à floresta em estágio sucessional, com 61,5% da área total, em 1976, e 62,4%, em 1997 (Figura 2). Da mesma maneira, essa situação foi proporcionada pela localização restrita ao fundo de vale das áreas cultivadas (com 13,5%, em 1976, e 6,6%, em 1997) e dos pastos (com 24,7%, em 1976, e 30,5%, em 1997), o que resultou em melhor infiltração e aumento da recarga subterrânea (Tabela 2), como demonstrado nas elevações da região nos mapas de uso e cobertura da terra.

De 1997 a 2017, o fluxo de base apresentou diminuição durante o período 2001-2009, variando entre 8,32 m³/s e 21,5 m³/s, enquanto houve o retorno do aumento dos valores de vazão de base a partir de 2010, com amplitude de 11,61 m³/s a 26,57 m³/s (Figura 4). Para o período, o fluxo de base anual médio foi de 17,0 m³/s (Tabela 3), o que representa um aumento constante da descarga de águas em relação aos períodos anteriores. A continuidade do aumento florestal nas áreas do SAIG/SG, como representado no mapa de uso e cobertura da terra de 2017 (Figura 2), com a categoria florestas em 68,1%, e, com exceção do fundo de vale, principalmente com pastos em 17,5% da área total e áreas cultivadas em 13,6%, permitiu o maior incremento

da recarga subterrânea para todo o período de 1957-2017 (Tabela 3) e, em consequência, da descarga de águas para os cursos d'água da bacia hidrográfica.

Apesar das particularidades nos intervalos de tempo em análise no presente trabalho, a linha de ajuste linear dos dados do escoamento de base anual (Figura 4) demonstra que a tendência foi de aumento da descarga de águas subterrâneas nos cursos fluviais da região de pesquisa para o período de seis décadas analisadas, como verificado pelos valores de cada cenário, de 1957 a 2017 (Tabela 3). Isso indica que a expansão das florestas nas vertentes onde existiam atividades humanas que facilitavam a conversão da precipitação em escoamento superficial, como pastagem e agricultura, possibilitou o aumento da capacidade de infiltração e armazenamento, havendo como resposta hidrológica o aumento da descarga de águas subterrâneas.

Velocidade média do escoamento superficial

No ano de 1957, a velocidade média do escoamento superficial calculada para a área de estudo foi de 1,04 m/s, a maior para os quatro anos de análise (1957, 1976, 1997 e 2017 – Figura 5). A maior contribuição, em termos de velocidade média do escoamento, ocorreu nas elevações da região de pesquisa, nas quais as vertentes apresentam declividade diferenciada.

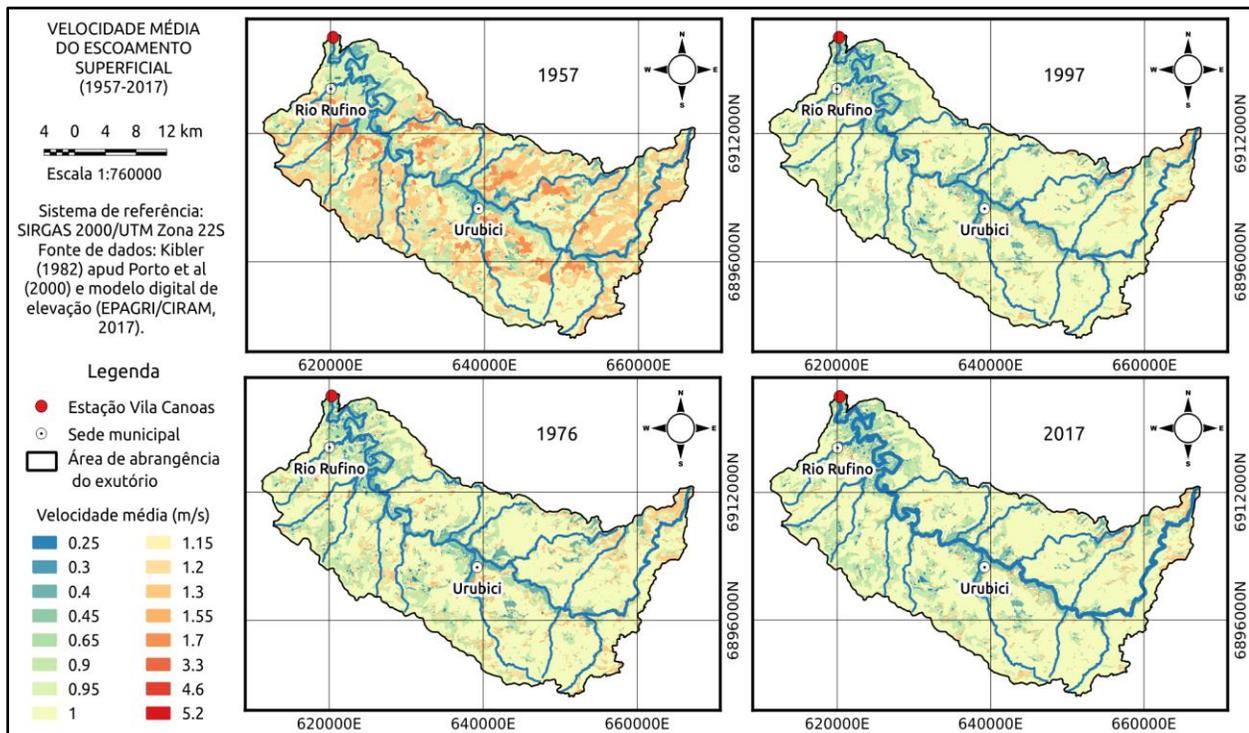


Figura 5 – Mapa de estimativa da velocidade média do escoamento superficial para os anos de 1957, 1976, 1997 e 2017. Fonte: Elaboração dos autores.

A velocidade média de escoamento superficial da área de estudo foi reduzida para 0,98 m/s, em 1976, diminuindo para 0,95 m/s, em 1997, e mantendo-se estacionária em 2017, com 0,95 m/s (Figura 5). Entre 1976 e 1997, ocorreu o crescimento em área de florestas nas elevações, onde havia a presença de pastos e áreas cultivadas no ano de 1957, o que reflete na redução da contribuição de velocidades elevadas ao escoamento superficial na região de estudo. Já no período de 1997 a 2017, o retorno de áreas cultivadas nas elevações compensou a contribuição para uma tendência que seria de maior diminuição da velocidade média do escoamento superficial na área de estudo. Ainda assim, o período de 1997 a 2017 foi o que teve a menor velocidade média de escoamento superficial.

Esses dados sugerem que as categorias pastos, situados especialmente em platôs que bordeiam a área de estudo, e áreas cultivadas, localizadas entre os platôs e as planícies aluviais, proporcionaram menor infiltração das águas e, portanto, da recarga subterrânea e da descarga de águas do SAIG/SG entre 1957 e 1976. Em sentido contrário, houve o melhoramento das condições de infiltração de 1976 a 2017 a partir da expansão das florestas pelas modificações de uso e cobertura da terra. Dessa forma, a variação dos dados espacializados da velocidade média do escoamento superficial da região de estudo são condizentes com o comportamento da recarga e descarga de águas identificado.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos matemáticos para estimar o escoamento de base não costumam incluir a variável uso e cobertura da terra, em virtude de as águas subterrâneas levarem um longo tempo para realizar sua percolação nas rochas. Porém, os resultados da pesquisa indicam que, pelo menos em porções próximas das áreas de afloramento dos aquíferos, pode haver a influência da modificação do uso da terra no fluxo de base para uma resposta perceptível em uma escala de tempo entre duas décadas.

Os dados de recarga e descarga de águas subterrâneas, além das velocidades médias do escoamento superficial, comprovam que a expansão da área de florestas sobre o SAIG/SG gerou estímulo à infiltração. Isto é percebido na descarga, pelo aumento do fluxo d'água subterrâneo e, conseqüentemente, na redução da participação do escoamento superficial direto na vazão total da região de pesquisa. Essa situação permitiu que o SAIG/SG na área de estudo se aproximasse do seu estado inicial de equilíbrio dinâmico, em função da menor influência de perturbações no sistema hidrogeológico/hidrográfico provocadas pelas atividades humanas, ao longo de um processo histórico, através da relação com o uso e cobertura da terra. Dessa maneira, como forma

de considerar as mudanças antropogênicas através do uso e conservação do ambiente, com base nos resultados obtidos por esta pesquisa, torna-se necessária a adoção do uso de análises multitemporais sobre o uso e cobertura da terra, no intuito de caracterizar o comportamento dos fluxos de águas. É também fundamental, a adoção de medidas de conservação do ambiente na gestão de bacias hidrográficas, visando a manutenção das recargas e, conseqüentemente, das descargas que possibilitam a manutenção dos volumes das águas superficiais em períodos de recessão hídrica, situadas na área de ocorrência do SAIG/SG.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, assim como da Rede Guarani/Serra Geral (FAPESC/ANA/CNPq/CAIXA).

V. REFERÊNCIAS

- ANA (Agência Nacional de Águas). Sistema de informações hidrológicas Hidroweb. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 22.jun.2017.
- BARLOW, P. M; CUNNINGHAM, W. L.; ZHAI, T.; GRAY, Groundwater Toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (version 1.0) — User guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data. Department of the Interior: USGS Techniques and Methods, Livro 3, cap. B10, 2015. 27p.
- BARTHEL, R. HESS Opinions "Integration of groundwater and surface water research: an interdisciplinary problem?". Hydrology and Earth System Sciences, v. 18, n. 7, p. 2615-2628, 2014.
- BRUNKE, M.; GONSER, T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. Freshwater Biology, v. 37, n. 1, p. 1-33, 1997.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. Hydrological Processes, v. 27, n. 18, p. 2614-2622, 2013.
- DAMS, J.; WOLDEAMLAK, S. T.; BATELAAN, O. Predicting land-use change and its impact on the groundwater system of the Kleine Nete catchment, Belgium. Hydrology and Earth System Sciences, v. 12, n. 6, p. 1369-1385, 2008.
- ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological processes, v. 19, n. 2, p. 507-515, 2005.
- ECKHARDT, K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. Journal of Hydrology, v. 352, n. 1, p. 168-173, 2008.
- EPAGRI/CIRAM (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/ Centro Integrado de Informações Ambientais de Santa Catarina. Mapas Digitais de Santa Catarina: Mapoteca Topográfica Digital. Cooperação técnica IBGE/EPAGRI. Disponível em: <<http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>>. Acesso em: 13.mar.2017.

GILFEDDER, M.; RASSAM, D. W.; STENSON, M. P.; JOLLY, I. D.; WALKER, G. R.; LITTLEBOY, M. Incorporating land-use changes and surface-groundwater interactions in a simple catchment water yield model. *Environmental Modelling & Software*, v. 38, p. 62-73, 2012.

HOFFMANN, G. P.; NANNI, A. S. O uso da terra e sua influência sobre o volume das águas na Bacia do Rio Biguaçu/SC. *Geosul, Florianópolis*, v. 32, n. 63, p. 97-117, 2017.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Base cartográfica contínua. Apresenta arquivos da área de Geociências da instituição. 2013. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 14.fev. 2017.

JUCKEM, P. F.; HUNT, R. J.; ANDERSON, M. P.; ROBERTSON, D. M. Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin. *Journal of Hydrology*, v. 355, n.1, p. 123-130, 2008.

KALBUS, E.; REINSTORF, F.; SCHIRMER, M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 10, n. 6, p. 873-887, 2006.

KIBLER, D. F. *Urban Stormwater Hydrology*. Washington: American Geophysical Union, 1982.

LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. *Hydrology for engineers*. 3ª ed. New York: McGraw-Hill, 1982.

MACHADO, J. L. F. *Mapa hidrogeológico do Estado de Santa Catarina – Escala 1:500.000*. Porto Alegre: CPRM, 2013.

OEA (Organização dos Estados Americanos). *Aquífero Guarani: Síntese Hidrogeológica do Sistema Aquífero Guarani. Série Manuais e Documentos Técnicos do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani*, v. 5, 2009.

OGDEN, F. L.; CROUCH, T. D.; STALLARD, R. F.; HALL, J. S. Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. *Water Resources Research*, v. 49, n. 12, p. 8443-8462, 2013.

OLIVEIRA, L. F. C.; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, M. A. S. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, v. 14, n. 11, p. 1186-1192, 2010.

PORTO, R.; ZAHTEL, F. K.; TUCCI, C. E. M.; BIDONE, F. Drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre. Ed. UFRGS/ABRH, 2000. Cap. 21, p. 805-847.

RUTLEDGE, A. T. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records: update. Virginia: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 1998. 52p.

RUTLEDGE, A. T. Update on the use of the RORA program for recharge estimation. *Groundwater*, v. 45, n. 3, p. 374-382, 2007.

SANTA CATARINA. SIGSC – Sistema de informações geográficas. Fornece produtos de geoprocessamento derivados do aerolevanteamento do triênio 2010-2011-2012. Disponível em: <<http://sigsc.sds.sc.gov.br/>>. Acesso em: 30.mar.2017.

SCHEIBE, L. F.; HIRATA, R. O contexto tectônico dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral em Santa Catarina: uma revisão. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, v. 15, 2008, Natal: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, nov./2008, p. 1-14.

USGS (United States Geological Survey). Earth Explorer. Apresenta produtos derivados de imagens de satélite. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 13.mai.2017.

VASCONCELOS, V. V.; MARTINS JÚNIOR, P. P.; HADAD, R. M.; KOONTANAKULVONG, S. Recarga de aquíferos: epistemologia e interdisciplinaridade. *Interthesis*, v. 10, n.2, p. 360-409, 2013.

WILDNER, W.; CAMOZZATO, E.; TONIOLO, J. A.; BINOTTO, R. B.; IGLESIAS, C. M. F.; LAUX, J. H. Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Porto Alegre: CPRM, 2014.

WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. Groundwater and surface water: a single resource. Colorado: United States Geological Survey, 1998.

ZHANG, Y. K.; SCHILLING, K. E. Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940s: effect of land use change. *Journal of Hydrology*, v. 324, n. 1-4, p. 412-422, 2006.