

Geovano Pedro Hoffmann

**EFEITOS DA MODIFICAÇÃO DO USO DA TERRA
SOBRE O COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO EM ÁREA
DE DESCARGA DO SISTEMA AQUÍFERO INTEGRADO
GUARANI/SERRA GERAL**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Geografia da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Geografia

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando
Scheibe

Coorientador: Prof. Dr. Arthur Schmidt
Nanni

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Hoffmann, Geovano Pedro

Efeitos da modificação do uso da terra sobre o comportamento do escoamento em área de descarga do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral / Geovano Pedro Hoffmann ; orientador, Luiz Fernando Scheibe, 2017.

259 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2017.

Inclui referências

1. Geografia. 2. Gestão de águas. 3. Uso e cobertura da terra. 4. Interação aquífero-rio. 5. Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral. I. Scheibe, Luiz Fernando. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Geografia. IV. Título.

Geovano Pedro Hoffmann

**EFEITOS DA MODIFICAÇÃO DO USO DA TERRA SOBRE O
COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO EM ÁREA DE
DESCARGA DO SISTEMA AQUÍFERO INTEGRADO
GUARANI/SERRA GERAL**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Geografia”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia.

Florianópolis, 13 de dezembro de 2017.

Prof. Dr. Elson Manoel Pereira
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Fernando Scheibe
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Dr. Alberto Elvino Franke
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Dra. Maria Paula Casagrande Marimon
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Prof. Dr. Joel Robert Georges Marcel Pellerin
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Dedico este trabalho à minha mãe
Verônica (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Luiz Fernando Scheibe, coordenador do projeto Rede Guarani/Serra Geral, por aceitar me orientar no Programa de Pós-Graduação em Geografia, pela amizade e por compartilhar a sua sabedoria e experiência, os quais nortearam este estudo.

Ao prof. Dr. Arthur Schmidt Nanni, coordenador do Laboratório de Análise Ambiental (LAAM/UFSC), meu orientador do Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia, por estabelecer a “ponte” com a Rede Guarani/Serra Geral, sugerir a temática entre águas superficiais e águas subterrâneas relacionadas ao uso e cobertura da terra e coorientar as atividades de pesquisa no decorrer do desenvolvimento do presente trabalho. Também pela amizade, parceria, pelo contato com o seu pensamento inovador, criativo e sistêmico e me incentivar na carreira profissional e momentos difíceis da pós-graduação.

Aos membros da banca examinadora de qualificação e defesa, prof. Dra. Maria Paula Casagrande Marimon, Prof. Dr. Alberto Elvino Franke e Prof. Dr. Joel Robert Georges Marcel Pellerin (*in memoriam*) pelas críticas, sugestões e outras contribuições que aperfeiçoaram esta pesquisa.

Em especial ao prof. Dr. Alberto Elvino Franke pela colaboração na reconstituição da série histórica de precipitação e ao prof. Dr. Luiz Carlos Pittol Martini na tentativa de reconstituir a série histórica de vazão.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia pela oportunidade de cursar o mestrado e aos seus professores pelo aprofundamento do conhecimento geográfico e debate em torno das questões relativas à teoria e prática científica.

À Secretaria de Estado de Planejamento do Estado de Santa Catarina por ceder as aerofotografias digitalizadas de 1957 e 1976 da área de estudo.

À Mariana Muniz Blank por georreferenciar as fotografias aéreas do ano de 1957 deste trabalho, fundamental para o prosseguimento das atividades a serem realizadas dentro do cronograma.

Ao Escritório Municipal de São Lourenço do Oeste por fornecer informações sobre o Projeto “Vida” no contexto do Programa Municipal da Mata Nativa.

À Agência Nacional de Águas, à Secretaria de Estado do

Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS), ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e ao *United States Geological Survey* (USGS) por disponibilizarem dados de acesso público.

À Universidade Federal de Santa Catarina por oferecer qualificação acadêmica, em nível de mestrado, através do ensino público e gratuito.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

À Rede Guarani/Serra Geral pelo uso de recursos financeiros utilizados em atividade de campo e pela oportunidade de participação nas atividades de pesquisa.

Às comunidades dos projetos de *softwares* livres, como QGIS, Inkscape, LibreOffice, Groundwater Toolbox, dentre outros, por disponibilizar o acesso e o uso de ferramentas robustas e de elevada qualidade.

Às amigas da Geografia, Diana, Drielle, Elaine, Leonardo, Karine, Márcio, Priscila, Sabrina e Yanna; da Geologia, no LAAM, Leila, Mariana, Regiane e Rossana; e antonio-carlenses que conheci na UFSC, Filipe e Josiély, por todo o apoio e palavras de incentivo.

À todos que de alguma forma contribuíram para o êxito deste trabalho.

Muito grato!

Ninguém entra em um mesmo rio uma segunda vez, pois quando isso acontece já não se é o mesmo, assim como as águas que já serão outras (Heráclito de Éfeso).

RESUMO

Uma das maneiras pelas quais a sociedade se relaciona com uma bacia hidrográfica, de forma equilibrada e/ou conflituosa no contexto dos reservatórios hídricos de um ambiente, é através do uso e cobertura da terra. Com enfoque na relação entre sociedade e bacia hidrográfica, sob a perspectiva da análise ambiental sistêmica, o presente estudo procura abordar a temática da relação aquífero-rio. Nesse sentido, a pesquisa teve por objetivo investigar os efeitos da modificação do uso e cobertura da terra sobre o escoamento superficial das águas, em regime de fluxo de base, em área de descarga do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) e de abrangência da estação hidrometeorológica Vila Canoas/SC. A metodologia, de abordagem quantitativa-exploratória, consistiu em identificar, através de mapeamento multitemporal (de 1957, 1976, 1997 e 2017) a evolução do uso e cobertura da terra; caracterizar a dinâmica físico-temporal da área de estudo para o período em análise; estimar o fluxo de base e a recarga subterrânea a partir de dados de vazão; e estimar a velocidade média do escoamento superficial para as categorias de uso e cobertura da terra. Os dados da recarga e descarga de águas subterrâneas, além das velocidades médias do escoamento superficial, mostraram que a etapa do escoamento subterrâneo, no contexto do ciclo hidrológico das últimas seis décadas, era acelerado no período 1957-1976 e foi sendo reduzido progressivamente de 1976 a 2017 na área de estudo. Os dados obtidos também comprovam a existência de efeitos da modificação do uso e cobertura da terra, pela interferência de ações antropogênicas, na redução do escoamento superficial e, conseqüentemente, no aumento do fluxo d'água subterrâneo. Sendo a única área no Estado de Santa Catarina que permite ser realizada a avaliação da interação aquífero-rio para o SAIG/SG, o estudo da região de pesquisa permitiu considerar estratégias de reconfiguração do uso e cobertura da terra, apropriadas à conservação do SAIG/SG, como mecanismo da gestão integrada de águas, que possam, além de reduzir a exploração do sistema hidrogeológico, estimular a recarga/descarga de águas subterrâneas.

Palavras-chave: Uso e cobertura da terra. Interação aquífero-rio. Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral.

ABSTRACT

The relationship between society and the watershed can be harmonious or conflicting. It depends on land use and its coverage management. The present study aims to explore this relationship between society and watershed, using the understanding about how aquifers may support the river flow, with systemic environmental analysis. Thus, the study compromised to investigate the land use and coverage modifications and its influences on runoff and base flow waters into a discharge area, the drainage basin drew by Vila Canoas/SC meteorologic station, the unique inserted in Guarani/Serra Geral Integrated Aquifer System (SAIG/SG) region, the unique capable to offer this situation in the Santa Catarina State. The methodology involved a quantitative-exploratory mapping technique to identify the land use and coverage changes along the years of 1957, 1976, 1997 and 2017. The water base flow, runoff and groundwater recharge were evaluated through river-flow data for different land coverage and uses. As a result, the river base flow data analysis shows that runoff was more intense for the scenery between 1957-1976 than 1976-2017. It occurs in response to changes in the land coverage that registers an increase for forests coverage in the watershed, starting from the worse condition in 1957 to better nowadays. Other important result was the validation of the applied methodology, since this has confirmed land modifications and base flow relationship, making its uses possible for other SAIG/SG watershed evaluations. Finally, some considerations about integrated management were made to stimulate the SAIG/SG waters conservation.

Keywords: Land use and land cover. Aquifer-river interaction. Guarani/Serra Geral Integrated Aquifer System.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da seção em estudo da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas/SC.....	35
Figura 2. Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guarani na América do Sul.....	39
Figura 3. Mapa da distribuição dos blocos geomorfoestruturais do SAIG/SG no Estado de Santa Catarina.....	44
Figura 4. Seção hidrogeológica do SAIG/SG no Estado de Santa Catarina.....	46
Figura 5: Modelo de evolução geomorfológica em blocos geomorfoestruturais e tectônicos hidrogeológicos do SAIG/SG, tendo como exemplo as bacias dos rios Chapecó e do Peixe/SC.....	48
Figura 6. Perfil estrutural esquemático do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG).....	51
Figura 7. Cenários teóricos de ocorrência da interação aquífero-rio.....	58
Figura 8. Hidrograma e hietograma hipotéticos de uma bacia hidrográfica.....	64
Figura 9. Sequência geral de mudanças dos padrões espaciais de uso da terra no mundo.....	71
Figura 10. Relação entre área florestada e escoamento superficial.....	73
Figura 11. Descarga média mensal para os períodos 1 e 2 do Rio Tocantins em Porto Nacional/TO.....	76
Figura 12. Hidrograma de antes da urbanização (1976) e depois (2005) para um período de retorno de 100 anos.....	83
Figura 13. Comportamento de hidrogramas por década a partir de modelagem no Haydon Wick (HW) e Rodbourne (ROD), sendo 2010a considerado a implantação do sistema pluvial e 2010 como sem ele.....	84
Figura 14. Hidrograma hipotético das vazões máximas nos diferentes tipos de uso e cobertura da terra.....	85
Figura 15. Respostas hidrológicas à transformação de um ambiente rural	

para urbano.....	86
Figura 16. Fluxograma de atividades da presente pesquisa.....	93
Figura 17. Localização de pontos visitados em atividade de campo.....	95
Figura 18. Aerofotografias georreferenciadas do ano de 1957 da área de estudo.....	99
Figura 19. Imagens orbitais do ano de 1976 da área de estudo separadas por linha destacada em amarelo.....	101
Figura 20. Imagem orbital do ano de 1997 da área de estudo.....	102
Figura 21. Imagem orbital do ano de 2017 da área de estudo.....	103
Figura 22. Etapas de análise dos períodos de recessão de um hidrograma.....	117
Figura 23. Recomendações gerais de uso do Groundwater Toolbox....	120
Figura 24. Etapas da obtenção do índice de recessão com o método RECESS através do Groundwater Toolbox.....	122
Figura 25. Gráfico de dispersão do Rio Flint (Michigan/EUA) com a vazão diária observada ($k+1$), em ft^3/s , em função dos dados médios de vazão total dos períodos de recessão (k) e com a linha tracejada do coeficiente de recessão (a), no valor de 0.975 dia^{-1}	126
Figura 26. Modelo esquemático das variáveis usadas em gráfico com dados diários de vazão em função do tempo no método do deslocamento da curva de recessão, no RORA, para a estimativa de recarga subterrânea.....	132
Figura 27. Perfil longitudinal e ocorrência da interação rio-aquífero para a seção em análise da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas/SC.....	141
Figura 28. Mapa da distribuição das nascentes por unidade geológica na área de estudo.....	145
Figura 29. Mapa de declividade da área de estudo.....	149
Figura 30. Evolução do uso e cobertura da terra na área de estudo, entre 1957 e 2017, com valores obtidos a partir da classificação do IBGE (2013).....	152

Figura 31. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1957, com o agrupamento de classes do IBGE (2013) em categorias.	155
Figura 32. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1976, com o agrupamento de classes do IBGE (2013) em categorias.	163
Figura 33. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1997, com o agrupamento de classes do IBGE (2013) em categorias.	169
Figura 34. Modelo de organização espacial de uso e cobertura da terra das pequenas propriedades situadas no fundo do vale do Rio Canoas, no início da década de 1990, situadas na área de estudo.....	172
Figura 35. Evolução da população urbana, rural e total para a área de estudo de 1960 a 2010.....	175
Figura 36. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 2017, com o agrupamento de classes do IBGE (2013) em categorias.	177
Figura 37. Síntese das modificações com agrupamento da classificação do uso e cobertura da terra do IBGE (2013), de 1957 a 2017, nas categorias florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos.....	181
Figura 38. Exemplo de padrão linear para um período de recessão ocorrido entre os dias 22 e 29 de abril de 1987 para a estação Vila Canoas/SC.....	183
Figura 39. Gráficos com índices de recessão individuais (k), expressos em dias, plotados em função da data da série histórica de vazão (1957-2017) da estação Vila Canoas/SC (código 71200000) e em escala logarítmica de vazão.....	184
Figura 40. Gráfico de vazão, em escala semilogarítmica, em função do tempo, em dias, com linha de tendência exponencial da curva mestra de recessão para os índices de recessão (k) dos períodos selecionados da estação Vila Canoas/SC entre 1957 e 2017.....	185
Figura 41. Separação do hidrograma com dados de vazão da estação fluviométrica Vila Canoas/SC para o período de 01/06/2016 a 31/08/2016	186
Figura 42. Gráfico da precipitação total anual, recarga subterrânea e categorias de uso e cobertura da terra para o período de 1957 a 2017.	187
Figura 43. Correlação entre a precipitação total anual e a recarga	

subterrânea para o período de 1957 a 2017.....	188
Figura 44. Gráfico do escoamento de base anual e categorias de uso e cobertura da terra para o período de 1957 a 2017.....	192
Figura 45. Gráfico do índice máximo do escoamento de base (BFImáx) e categorias de uso e cobertura da terra para o período de 1957 a 2017.	194
Figura 46. Mapa da estimativa da velocidade média do escoamento superficial para os anos de 1957, 1976, 1997 e 2017.....	205
Figura 47. Balanço hídrico quali-quantitativo, por bacias hidrográficas e regiões contíguas de Santa Catarina, com vazão de referência Q98 a curto (2019), médio (2023) e longo prazo (2027).....	210
Figura 48. Mapa de poços tubulares cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) por província hidrogeológicas e região hidrográfica de Santa Catarina.....	212
Figura 49. Cota absoluta média do topo da Formação Botucatu para os blocos hidrogeológicos do SAIG/SG em Santa Catarina.....	214
Figura 50. Modelo de estrutura de proteção de fonte modelo caxambu.	217
Figura 51. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1957, com a classificação do IBGE (2013).....	256
Figura 52. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1976, com a classificação do IBGE (2013).....	257
Figura 53. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1997, com a classificação do IBGE (2013).....	258
Figura 54. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 2017, com a classificação do IBGE (2013).....	259

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1. Síntese dos grandes domínios hidrodinâmicos do SAG.....	41
Quadro 2. Efeitos desempenhados pela vegetação florestal na dinâmica hidrológica. Os autores mencionados no quadro abaixo foram citados por Balbinot et al. (2008) e são aqui mantidos apenas para fins de revisão.....	73
Quadro 3. Coeficientes de deflúvio para floresta e pastagem obtidos em experimentos realizados em microbacias hidrográficas. Os autores mencionados no quadro abaixo foram citados por Salemi et al. (2012) e são aqui mantidos apenas para fins comparativos.....	79
Quadro 4. Imagens utilizadas para o mapeamento da evolução do uso e cobertura da terra na área de estudo.....	89
Quadro 5. Relação de objetivos específicos da pesquisa, materiais e métodos, assim como resultados a serem alcançados.....	90
Quadro 6. Classes de uso e cobertura da terra do IBGE (2013, p. 149) agrupadas nas categorias florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos de Porto et al. (2000, p. 819).....	106
Quadro 7. Relação de estações pluviométricas utilizadas para o preenchimento de falhas mensais da série histórica de dados diários de precipitação da estação Vila Canoas/SC.....	112
Quadro 8. Média aritmética da série histórica de dados de cada estação pluviométrica utilizada na técnica da ponderação regional.....	112
Quadro 9. Relação do período de preenchimento de falhas, número de dias sem leitura e as respectivas estações pluviométricas utilizadas para o preenchimento de dados.....	113
Quadro 10. Relação dos períodos com falhas de vazão e respectivo número de dias sem leitura para a estação Vila Canoas/SC.....	115
Quadro 11. Quantidade de nascentes por unidade geológica da região de estudo.....	143
Quadro 12. Conhecimento hidrogeológico aplicado à políticas públicas.	221

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Classificação da declividade.....	135
Tabela 2. Velocidades médias de escoamento superficial (em m/s) em função da declividade (%)......	136
Tabela 3. Valores convencionados atribuídos aos pixels do raster de uso e cobertura da terra (1957-2017) e declividade para multiplicação na calculadora raster do QGIS.....	137
Tabela 4. Valores médios de precipitação total, recarga anual média a partir do método do deslocamento da curva de recessão e participação da recarga média a partir da precipitação total para os períodos de análise de uso e cobertura da terra na área de estudo.....	189
Tabela 5. Valores médios do escoamento de base anual médio para os períodos de análise de uso e cobertura da terra na área de estudo.....	193
Tabela 6. Valores utilizados para a estimativa da velocidade média do escoamento superficial para os anos de 1957, 1976, 1997 e 2017.....	197

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas
CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LAAM – Laboratório de Análise Ambiental
MDE – Modelo Digital de Elevação
ROI – *Regions Of Interest*
SAG – Sistema Aquífero Guarani
SAIG/SG – Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral
SASG – Sistema Aquífero Serra Geral
SCS – *Soil Conservation Service*
SDS – Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável
SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG – Sistema de Informações Geográficas
SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
USGS – *United States Geological Survey*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	27
1.1. OBJETIVOS.....	30
1.1.1. Objetivo geral.....	30
1.1.2. Objetivos específicos.....	31
1.2. JUSTIFICATIVA E HIPÓTESE.....	31
1.3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	33
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	37
2.1. HIDROGEOLOGIA DO SAIG/SG.....	37
2.2. INTERAÇÃO AQUÍFERO-RIO.....	53
2.3. HIDROGRAMA.....	62
2.4. IMPACTOS DA MODIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA NO ESCOAMENTO.....	68
2.4.1. Florestas.....	71
2.4.2. Monocultivos.....	74
2.4.3. Pastagens.....	79
2.4.4. Áreas urbanizadas.....	82
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	88
3.1. PESQUISA DE CAMPO.....	93
3.2. USO E COBERTURA DA TERRA.....	97
3.2.1. Fotointerpretação.....	97
3.2.2. Processamento digital de imagens de satélite.....	100
3.2.3. Quantificação do uso e cobertura da terra.....	106
3.2.4. Mudanças populacionais.....	108
3.3. SÉRIES HISTÓRICAS DIÁRIAS DE VAZÃO E PRECIPITAÇÃO	109
3.3.1. Reconstituição de falhas de registro da precipitação.....	110
3.3.2. Falhas de registro da vazão.....	114
3.4. ESTIMATIVA DE RECARGA E DESCARGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	116
3.4.1. Groundwater Toolbox.....	117
3.4.2. Índice de recessão (k).....	121

3.4.3. Coeficiente de recessão (<i>a</i>).....	123
3.4.4. Índice máximo do escoamento de base (<i>BFImáx</i>).....	126
3.4.5. Separação do hidrograma: filtro digital recursivo de Eckhardt	128
3.4.6. Recarga de águas subterrâneas: método do deslocamento da curva de recessão.....	130
3.5. ESTIMATIVA DA VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA AS CATEGORIAS DE USO E COBERTURA DA TERRA (1957-2017).....	134
3.6. OCORRÊNCIA DA INTERAÇÃO AQUÍFERO-RIO: DISTRIBUIÇÃO DAS NASCENTES.....	138
4. RESULTADOS.....	140
4.1. OCORRÊNCIA DA INTERAÇÃO AQUÍFERO-RIO NA ÁREA DE ESTUDO.....	140
4.2. DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA (1957-2017)	151
4.2.1. Uso e cobertura da terra em 1957.....	153
4.2.2. Uso e cobertura da terra em 1976.....	160
4.2.3. Uso e cobertura da terra em 1997.....	167
4.2.4. Uso e cobertura da terra em 2017.....	176
4.2.5. Síntese das modificações do uso e cobertura da terra.....	180
4.3. ANÁLISE DA ESTIMATIVA DE RECARGA E DESCARGA DE ÁGUAS.....	182
4.3.1. Recarga de águas subterrâneas do SAIG/SG frente à dinâmica de uso e cobertura da terra.....	186
4.3.2. Descarga de águas subterrâneas do SAIG/SG frente à dinâmica de uso e cobertura da terra.....	191
4.3.3. Velocidade média do escoamento superficial frente à dinâmica de uso e cobertura da terra.....	195
4.4. MONITORAMENTO DO USO E COBERTURA DA TERRA COMO MECANISMO DA GESTÃO INTEGRADA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS NA REGIÃO DO SAIG/SG.....	207
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	223
REFERÊNCIAS.....	229

1. INTRODUÇÃO

A problemática ambiental¹ é um dos maiores desafios que vêm sendo debatidos na contemporaneidade e abrange várias discussões, dentre elas, a do clima, da água, energética, da perda da biodiversidade, da erosão genética, do solo e outras (PORTO-GONÇALVES, 2006). Em sua essência, todas apresentam como causa em comum a crise do modelo civilizatório, que gera a degradação da natureza e negação de culturas pelo modelo econômico, tecnológico e cultural vigente. A chamada crise civilizatória é oriunda do modo de produção dominante e do estilo de vida único disseminado para todo o planeta, o qual tem como base o crescimento econômico, de vertente exclusivamente desenvolvimentista, e que desconsidera a natureza como sendo limitada. A problemática ambiental, portanto, não se refere a uma crise ecológica, mas social, do processo econômico globalizado, da crise de instituições políticas, de relações sociais injustas e que parte de ações humanas sob a visão mecanicista do mundo contra a vida (GALANO *et al.*, 2002).

A principal razão para este fato, segundo Porto-Gonçalves (2011), é que o período desde os anos de 1960 é tido como o mais devastador da história, no sentido de que nunca foi tão rápida a transformação da matéria pelo sistema social hegemônico, citando como exemplo o caso de ocupação da região do Cerrado pelo agronegócio, no Brasil, importante área de recarga hídrica dos principais rios do país e de terras de uso comum, como pretexto de proteger a Amazônia, implicando em questões territoriais inseridas na economia mundializada, envolvendo a expulsão dos povos tradicionais, a urbanização, a desigualdade socioeconômica e a degradação ambiental associada. O autor também destaca que tal processo devastador tem uma de suas raízes na dinâmica capitalista, mas, antes de tudo é uma crise social afirmando também que é proveniente do atual modelo hegemônico de sociedade, a partir do jogo de interesses nas revoluções tecnológicas² das relações sociais e de poder. Nela, o pensamento filosófico antropocêntrico, que remete ao

1 Os problemas ambientais, por definição, “são todos aqueles que afetam negativamente a qualidade de vida dos indivíduos no contexto de sua interação com o espaço, seja o espaço natural [...]” e/ou social do ser humano (SOUZA, 2000, p. 117).

Renascimento, parte da ideia de dominação da natureza, em que desenvolvimento é sinônimo de urbanização e industrialização. Com esta linha racionalista, que separou sociedade da natureza ao longo dos séculos, o homem passou a ser entendido como agente de transformação e a natureza como um objeto a ser dominado. Assim, a crise ambiental é ao mesmo tempo uma crise do conhecimento.

Santos (1992) também coloca que, sob um modelo técnico único, que chama de técnico-científico-informacional, o homem se tornou fator geológico, geomorfológico, climático e de cataclismos, cujas ações provocam efeitos espaciais continuados e cumulativos, resultantes de graves problemas no relacionamento da “civilização material” e a natureza, de modo que as preocupações ambientais até agora aumentaram porque os problemas também foram sendo acumulados. Nesse sentido, Leff (2006) acredita que a superação da crise ambiental ocorre através da verdadeira sustentabilidade, que é aquela que agrega as diferentes formas de pensar, sentir, imaginar e de dar valor as coisas no planeta, constituindo a racionalidade ambiental como maneira pela qual a forma de se habitar o mundo pode ser delineada.

Dentro disso, o debate em torno da questão da água, centrado especialmente no discurso de escassez, superficial e/ou subterrânea, e de privatização representa, no contexto do ciclo hidrológico, a crise do sistema urbano-industrial-agrário do atual modelo de sociedade, uma vez que não há nenhum processo de consolidação urbana, industrial ou agrário que não implique no uso da água. Em outras palavras, não é possível separar sociedade de natureza nessa dinâmica. No entanto, tal dicotomia apresenta reflexos para a compreensão da gestão de bacias, devendo-se atentar para o fato de que a problemática ambiental está estritamente presente na relação entre a sociedade e a bacia hidrográfica em suas várias escalas geográficas (PORTO-GONÇALVES, 2011).

2 Porto-Gonçalves (2006, p. 290) considera que a mundialização do capital ocorreu com revoluções tecnológicas, as quais separaram “ o lugar de extração da matéria bruta, o lugar da transformação da matéria-prima (consumo produtivo) e o lugar do consumo conformando toda uma complexa logística de matéria e energia que materializa no espaço-tempo as relações sociais de poder” nas suas diferentes escalas.

Uma das maneiras pelas quais a sociedade se relaciona com uma bacia hidrográfica, de forma equilibrada e/ou conflituosa no contexto dos reservatórios hídricos em um ambiente (formado pela atmosfera, litosfera, hidrosfera, pedosfera e biosfera), é através do uso e cobertura da terra. O uso da terra pode ser compreendido como a forma que o ser humano utiliza o seu espaço num dado momento (LOCH, 2008), refletindo a sua relação com o meio, ou seja, a própria questão ambiental. Na condição em que há o uso inadequado da terra, a exemplo das ações excessivas de desflorestamento e impermeabilização dos solos, são gerados efeitos que afetam direta ou indiretamente a dinâmica hidrológica e, por consequência, as populações que dela dependem (HOFFMANN & NANNI, 2016). Dentre os processos que podem ser afetados está a interação entre rios e aquíferos. Esta interação representa um importante elo do ciclo hidrológico, visto que os componentes e elementos envolvidos realizam tanto a manutenção do escoamento superficial quanto a recarga dos aquíferos. As componentes hidrológicas são interdependentes e atuam de forma sistêmica, de modo que o seu estudo assume um papel fundamental no planejamento territorial (ARANTES, 2003).

Assim, com enfoque na relação entre sociedade e bacia hidrográfica, sob a perspectiva da análise ambiental sistêmica, o presente estudo procura abordar questões pertinentes ao escoamento superficial na relação aquífero/rio a partir da visão da ciência geográfica. A pesquisa tem como finalidade suprir a carência de trabalhos, em especial neste campo da Ciência, sobre a abordagem acerca das relações entre a modificação do uso e cobertura da terra e a influência quantitativa na interação aquífero-rio em área de descarga do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG), no Estado de Santa Catarina/Brasil.

Para tal, o estudo teve como ponto de partida o seguinte questionamento: como a modificação do uso e cobertura da terra influenciou o escoamento superficial durante os períodos de contribuição do fluxo de base desde 1957 aos dias atuais para a porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas/SC? A partir disso, a pesquisa pretende contribuir para uma gestão ambiental planejada e adequada às

condições físico-naturais e socioeconômicas da bacia hidrográfica em questão e das demais situadas na região do SAIG/SG, em Santa Catarina, através da utilização e conservação de suas águas.

Espera-se com este trabalho guiar ações futuras que promovam a manutenção da capacidade de descarga das águas subterrâneas, e consequentemente das águas superficiais, frente a configuração do uso e cobertura da terra a partir de alguma eventual degradação acentuada provocada pela intervenção humana. Além disso, a pesquisa colabora com o Projeto Rede Guarani/Serra Geral, vinculado ao Laboratório de Análise Ambiental (LAAM) do Departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que objetiva produzir conhecimento compartilhado sobre a gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas na região Sul do Brasil.

A dissertação está organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo foi elaborada a introdução, com a delimitação da problemática de pesquisa, no que se refere aos impactos da modificação dos tipos de uso e cobertura da terra sobre a dinâmica de águas, no contexto da temática de análise ambiental; o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho; a justificativa e a hipótese da pesquisa; e o recorte espacial, com a localização da seção em estudo da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas/SC. O segundo capítulo trata do referencial teórico sobre o qual houve a revisão bibliográfica com os principais eixos que foram tomados como essenciais para o desenvolvimento do trabalho, a saber, hidrogeologia do SAIG/SG, interação aquífero/rio, hidrograma e os impactos da modificação do uso e cobertura da terra sobre o escoamento. No terceiro capítulo são apresentados os materiais e métodos que serão empregados para atingir os objetivos da pesquisa. O quarto capítulo diz respeito aos resultados e as discussões acerca deles. O quinto e último capítulo apresenta as considerações finais que encaminham para as respostas obtidas até o momento de finalização da pesquisa.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Investigar os efeitos da modificação do uso e cobertura da terra sobre o escoamento superficial das águas, em regime de fluxo de base, em área de descarga do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral e de abrangência da estação hidrometeorológica Vila Canoas/SC.

1.1.2. Objetivos específicos

Junto ao objetivo geral foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Identificar, através de mapeamento multitemporal (de 1957, 1976, 1997 e 2017) a evolução do uso e cobertura da terra;
- Caracterizar a dinâmica físico-temporal da área de estudo para o período em análise;
- Estimar o fluxo de base e a recarga subterrânea a partir de dados de vazão;
- Estimar a velocidade média do escoamento superficial para as categorias de uso e cobertura da terra dos cenários de 1957, 1976, 1997 e 2017;
- Avaliar a influência das modificações do uso e cobertura da terra no comportamento do escoamento das águas subterrâneas;
- Propor formas de gestão integrada de águas para a área de abrangência do SAIG/SG com base na dinâmica das águas subterrâneas da área de estudo.

1.2. JUSTIFICATIVA E HIPÓTESE

Este trabalho partiu do interesse de vincular o trabalho de conclusão de curso em Geografia do autor desta dissertação, relacionado ao tema da influência do uso e cobertura da terra sobre o escoamento

superficial na Bacia Hidrográfica do Rio Biguaçu/SC (HOFFMANN, 2014), ao Projeto Rede Guarani/Serra Geral³, pela Universidade Federal de Santa Catarina, que realiza estudos sobre o Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG), a fim de suprir a carência de trabalhos sobre a abordagem acerca das relações entre a modificação do uso e cobertura da terra e a influência na interação aquífero-rio em Santa Catarina.

A área elencada para a pesquisa como estudo de caso dentro do Projeto Rede Guarani/Serra Geral abrange a seção da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas/SC, correspondente à área à montante do exutório⁴, definido a partir da estação hidrometeorológica Vila Canoas/SC, na qual estão inseridos os municípios de Urubici, Rio Rufino e pequena parte do município de Bom Retiro. A escolha da região foi definida por participar, como área expressiva, da estreita faixa de afloramento do SAIG/SG, no Estado de Santa Catarina, na qual este contribui para a manutenção dos fluxos de base em virtude da topografia do canal principal estar situada abaixo da superfície potenciométrica do SAIG/SG, servindo, assim, como área de descarga das águas subterrâneas; a estação fluviométrica apresentar dados diários de vazão e precipitação, de acesso aberto, durante um período longo em comparação com outras estações no Estado, datados a partir do ano de 1957; a área de estudo não possuir represamento de águas que possam interferir na avaliação dos dados de vazão, o que não é comum no Estado e, inclusive, ao longo do próprio curso do Rio Canoas; e ter ocorrido alteração significativa do uso e cobertura da terra durante esse longo período na região que permita verificar efeitos no comportamento do escoamento subterrâneo.

De acordo com Almeida & Silva (2011), apesar da área não ser considerada como uma das mais propícias para a recarga direta do SAG, devido ao alto grau de inclinação dos afloramentos do arenito Botucatu associados à conformação do relevo, possui as nascentes do rio Canoas,

3 Disponível em: <<https://rgsgsc.wordpress.com>>. Acesso em: 04.jan.2017.

4 O exutório é definido como sendo o ponto de menor cota altimétrica situado no limite do divisor de águas, para o qual converge o escoamento de uma bacia hidrográfica (IBGE, 2004).

com frequência de vazão condicionada pela descarga de águas subterrâneas presentes no substrato rochoso local, sendo um manancial de relevância para a população local e para os recursos hídricos superficiais do Estado. Acrescenta-se, conforme Machado (2013), que a área é considerada de grande importância hidrogeológica pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Tem-se como pressuposto a Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), a qual prevê que deve haver a articulação entre a gestão de recursos hídricos e do uso da terra aliada à gestão ambiental, assim como se deve assegurar a necessária disponibilidade de água à atual e às futuras gerações; e a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos, de origem natural ou decorrentes de uso inadequado.

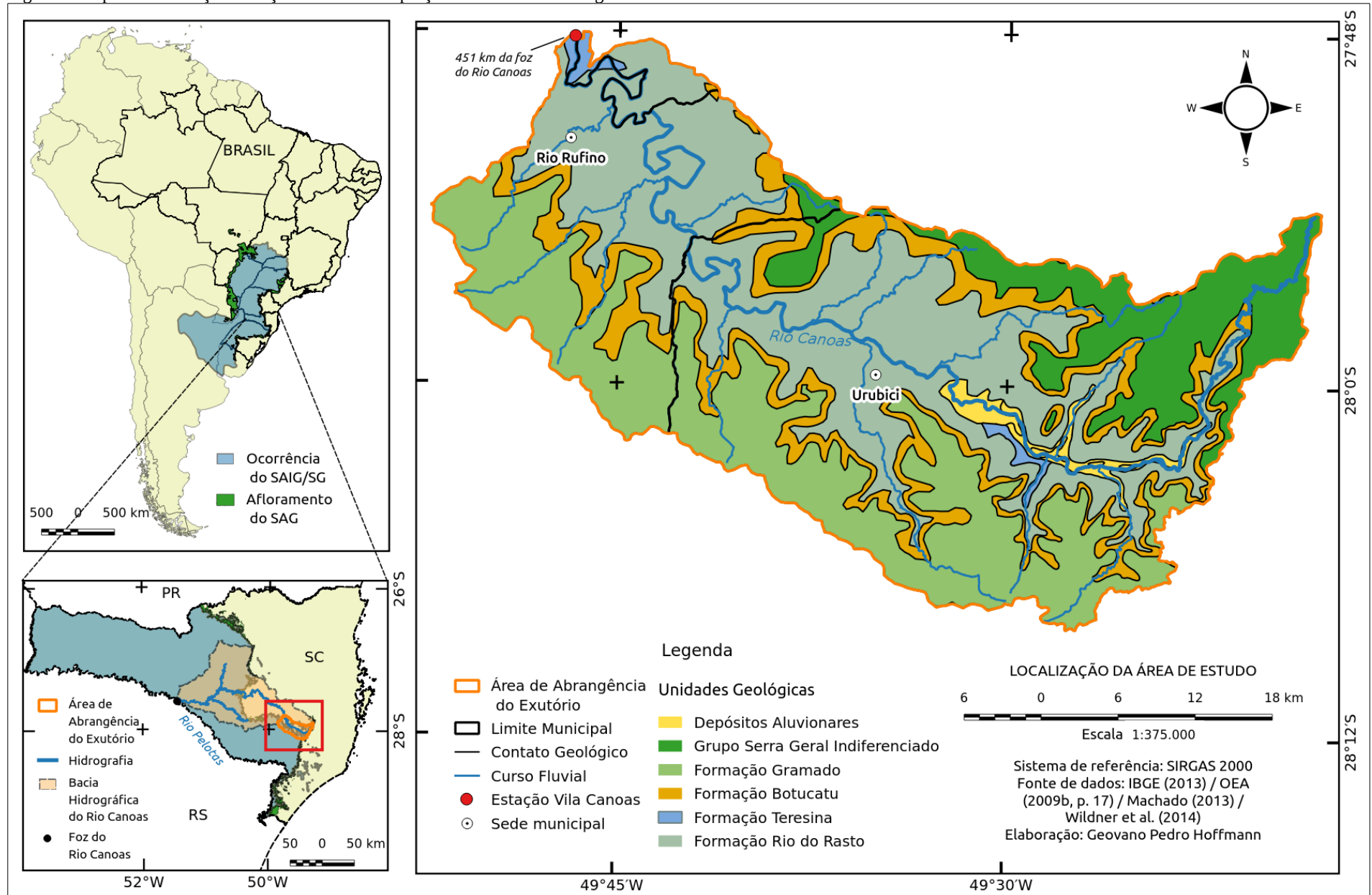
Com base nas evidências analisadas no referencial teórico deste trabalho, apresentado adiante, a hipótese levantada é de que as mudanças nos usos da terra tenham contribuído para aumentar o fluxo de base na área de pesquisa e, em consequência, provocado a redução do escoamento superficial em virtude de uma eventual recuperação da cobertura vegetal nativa na área.

1.3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo desta pesquisa refere-se a área de drenagem abrangida pela seção da porção alta da bacia hidrográfica do Rio Canoas, em Santa Catarina, conformada pela área à montante do exutório, ou seja, desde as nascentes nos contrafortes da Serra Geral até a estação hidrometeorológica Vila Canoas/SC, situada entre os municípios de Rio Rufino e Bocaina do Sul, nas coordenadas de latitude 27°48'14"S e longitude 49°46'45"O (ANA, 2015), distante 451 quilômetros da confluência da foz do Rio Canoas com o Rio Pelotas (Figura 1). O curso d'água principal, o Rio Canoas, estende-se ao longo da região de pesquisa em 126 quilômetros a partir do exutório da seção até a nascente mais distante.

A área de estudo está compreendida entre as coordenadas 27°47' e 28°08' de latitude Sul e 49°18' e 49°52' de longitude Oeste, possui área total de 1021,05 km², com drenagem disposta predominantemente no sentido leste-noroeste, compreendendo grande parte do município de Urubici (711,83 km² ou 69,72% da área de estudo), inteiramente o município de Rio Rufino (281,58 km² ou 27,58% da área de estudo) e pequena parte do município de Bom Retiro (27,64 km² ou 2,7% da área de estudo), todos agrupados na microrregião de Campos de Lages, mesorregião Serrana. A bacia hidrográfica inclui o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e a estreita zona de afloramento do Aquífero Guarani, em Santa Catarina, além de fazer parte do conjunto de rios da vertente interior catarinense, inserida na região hidrográfica do Rio Uruguai.

Figura 1. Mapa de localização da seção em estudo da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas/SC.



Fonte: Elaboração própria.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. HIDROGEOLOGIA DO SAIG/SG

O Sistema Aquífero Guaraní (SAG)⁵ é um manancial subterrâneo e transfronteiriço que envolve parte dos territórios do Brasil (735.918 km²), da Argentina (228.255 km²), do Uruguai (36.170 km²) e do Paraguai (87.536 km²), totalizando uma área estimada de cerca de 1.087.879 km². É considerado o corpo hídrico de maior relevância da porção meridional da América do Sul, em termos de disponibilidade hídrica e de potencial para o desenvolvimento socioeconômico. No Brasil, o SAG está presente nos Estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (OEA, 2009a).

Do ponto de vista geológico atual, o SAG é enquadrado como unidade hidroestratigráfica que está vinculada ao conjunto de rochas sedimentares de idade mesozoica da Bacia Norte (Uruguai), da Bacia Chacoparanaense (Argentina) e da Bacia do Paraná (Brasil e Paraguai). A sua gênese remete à acumulação de partículas siliciclásticas, em camadas rochosas e que, no decorrer do tempo geológico, tiveram a sua estrutura (geometria, compartimentação e arquitetura) controlada por elementos de destaque regional, como os Arcos de São Vicente e Canastra, ao norte do SAG; o Arco do Rio da Prata, ao sul; o Arco Pampeano/Ponta e o Arco de Assunção, a oeste; e o Arco de Rio Grande, o Arco de Ponta Grossa e o Sinclinal de Torres (OEA, 2009b). Desta maneira, a estrutura complexa e heterogênea do SAG, também com falhas e diques, funciona como divisor da bacia sedimentar e dos fluxos regionais e locais de águas subterrâneas, tornando-o um grande reservatório subterrâneo formado por um conjunto de estratos rochosos

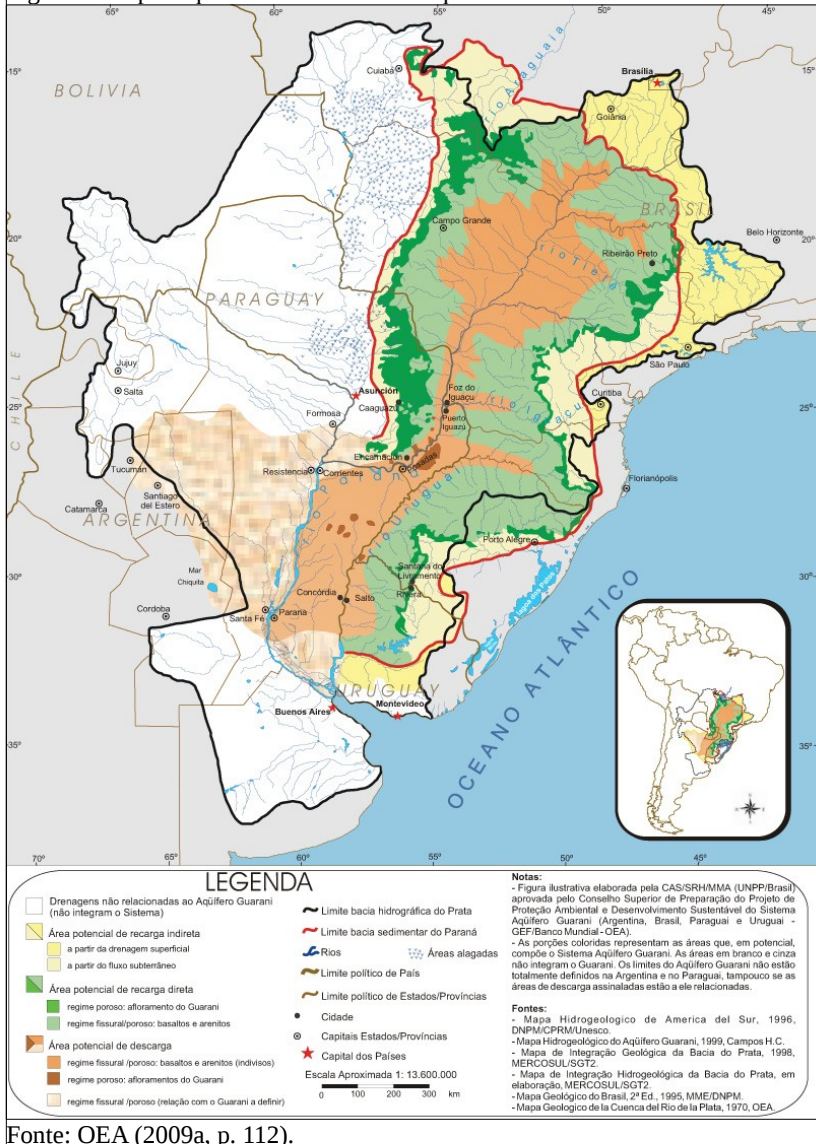
⁵ A origem da expressão “Sistema Aquífero Guaraní” foi sugerida pelo geólogo Danilo Antón e representa uma homenagem ao povo indígena da Grande Nação Guaraní, grupo cujos limites territoriais coincidiam no passado com a área do SAG, e que ainda vivem na região. A denominação, estabelecida em consenso internacional entre universidades, em 1996, também teve a intenção de “resgatar os valores humanos e a rica cultura dessa nação histórica, base ancestral de nossas sociedades mestiças e nacionais” (OEA, 2009a, p. 54).

extensos e com características aquíferas. Apesar do fluxo hídrico subterrâneo do SAG ser renovável, a sua circulação é condicionada por esta estrutura com barreiras hidráulicas e compartimentos naturais, o que dificulta a sua mobilidade e a torna lenta, bem como reflete em diferentes características hidroquímicas nas suas águas (OEA, 2009a).

O arcabouço geológico que compõe o SAG está em contato, em sua base, com unidades de características hidrogeológicas distintas, tal como a argila da Formação Corumbataí, ao norte da Bacia do Paraná; e das unidades arenosas das Formações Buena Vista, Tacuary, Sanga do Cabral e Rio do Rastro, ao sul. Este limite configura uma superfície erosiva na forma de discordância regional, denominada de permotriássica, de 250 milhões de anos, e que está presente na Bacia do Paraná. Em sua porção superior, o SAG está coberto pelos derrames basálticos que compõem a Formação Serra Geral, de 145-130 milhões de anos. Diante desta conjuntura geotectônica, o fluxo das águas subterrâneas tende a um direcionamento de norte para sul, condizente ao eixo da Bacia Sedimentar do Paraná, correspondendo à calha central do SAG e, em parte, coincidente com o Rio Paraná (OEA, 2009b).

As extremidades leste e oeste da Bacia do Paraná são as principais áreas de ocorrência das zonas de afloramento das unidades hidroestratigráficas do SAG e definem os seus limites (Figura 2). Ao Sul do Brasil, no Rio Grande do Sul, o afloramento se dá em uma faixa leste-oeste e no Nordeste do Uruguai, numa faixa de direção quase norte-sul. Ressalta-se que os critérios utilizados para esta definição utilizam diversos elementos para a delimitação do aquífero, podendo ser estratigráficos, quando os sedimentos se dissipam gradualmente, como em Goiás e Minas Gerais, ao norte do SAG; e estruturais, quando os sedimentos desaparecem de maneira abrupta, como é o caso das províncias de Chaco e Santiago del Estero (OEA, 2009b).

Figura 2. Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guarani na América do Sul.



Fonte: OEA (2009a, p. 112).

As principais zonas de afloramento do SAG, em que se encontram as principais áreas de recarga direta⁶ e descarga regional, somam 124.650 km² (OEA, 2009a). No caso do Estado de Santa Catarina, a zona de afloramento se estende por cerca de 1780 km², em uma faixa muito delgada, que em alguns pontos atinge menos de um quilômetro de largura (GOMES *et al.*, 2006).

As áreas de recarga mais expressivas encontram-se a leste do SAG, com tendência de fluxo regional para a porção sul, geradas pelo soerguimento do sistema aquífero a partir da borda leste da Bacia do Paraná, dado o desenvolvimento da Dorsal Assunção–Rio Grande, o que provocou a erosão das rochas sedimentares constituintes e condicionou também a formação das áreas de descarga, especialmente ao longo dos rios Paraná e Uruguai. Outra importante estrutura da Bacia do Paraná que influi no comportamento do fluxo é o Arco de Ponto Grossa, exercendo a função de barreira hidráulica. Nos pontos mais elevados, as zonas de recarga têm como aspecto o fluxo radial, tal como ocorre no Arco de Ponto Grossa e no Domo de Lages (OEA, 2009b).

A dinâmica de fluxo local nas áreas de afloramento é condicionada pelas características geomorfológicas, podendo ser zonas que assumem a função de recarga, assim como de descarga. É comum nas áreas de descarga que haja o suprimento do fluxo de base de rios e de outros corpos d'água a partir do SAG, o que promove a interação entre águas subterrâneas e superficiais (OEA, 2009a).

As zonas de descarga do SAG estão situadas em sua borda oeste, abastecendo o escoamento superficial da Bacia do Rio Paraguai, e na faixa de afloramento leste-oeste, no Estado do Rio Grande do Sul. Entre as Bacias dos Rios Paraná e Paraguai, há a existência de áreas de

6 No "Water Science Glossary of Terms", o USGS (2017) define a recarga subterrânea como sendo a entrada de água para um reservatório subterrâneo a partir da superfície, de modo que a infiltração, a partir da precipitação e o seu movimento para o lençol freático, é considerada uma forma de recarga natural, assim como o volume de água adicionado no decorrer do processo.

descarga no Estado do Mato Grosso do Sul e janelas de arenitos entre as rochas basálticas, condicionando a presença de um divisor de águas subterrâneas paralelo ao divisor de águas superficiais. De um modo geral, tanto nas zonas de recarga quanto nas zonas de descarga é preciso notar que o fluxo de águas subterrâneas apresenta dinâmica própria e que, em fluxos locais, a descarga supre o escoamento de base da rede de drenagem existente (OEA, 2009b).

De acordo com a OEA (2009b), dentre os quatro grandes domínios hidrodinâmicos do SAG (Quadro 1) a área de estudo desta pesquisa está situada no domínio leste, especificamente na área do Domo de Lages até Torres, considerada uma região de não fluxo em razão das características geomorfológicas da zona de recarga, em escarpas e paredões, tal como a Serra do Rio do Rastro em Santa Catarina, que dificultam a entrada da água da chuva em razão da elevada declividade. Não há a ocorrência de recarga ou descarga do SAG neste trecho, tendo em vista que as linhas potenciométricas são paralelas ao afloramento e os gradientes hidráulicos são homogêneos, com variação de 2 a 3m/km. A área de descarga deste domínio do SAG se dá na zona de afloramento em direção leste-oeste no Estado do Rio Grande do Sul, oriunda da zona de recarga dos terrenos mais elevados da área do Domo de Lages (OEA, 2009b). No entanto, Curtarelli *et al.* (2010) contestam esta afirmação e apontam duas razões: a primeira é a de que, com base no estudo do balanço hídrico superficial na bacia do Rio Canoas, em Urubici, pode estar havendo um armazenamento positivo de água nesta região; e, a segunda, refere-se a algumas áreas planas da bacia hidrográfica, com declividade entre 0 e 3%, nas quais o rio Canoas e os seus tributários escoam sobre as rochas areníticas da formação Botucatu, o que as tornam potenciais para a recarga direta do SAG, apesar de que, na área de estudo da presente pesquisa, essa segunda situação não ser comum.

Quadro 1. Síntese dos grandes domínios hidrodinâmicos do SAG.

Domínio	Nordeste	Leste	Oeste	Sul
Zona de recarga	São Paulo e Minas Gerais (Brasil)	Borda leste da Bacia do Paraná	Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul	Rio Grande do Sul (Brasil), Rivera

Domínio	Nordeste	Leste	Oeste	Sul
			(Brasil)	(Uruguai) e Corrientes (Argentina)
Condicio- nantes do fluxo	Diques associados ao Arco de Ponta Grossa	Elevação da borda leste da Bacia do Paraná e diques associados ao Arco de Ponta Grossa	Terrenos elevados; Serra do Maracajú; posição topográfica baixa	Dorsal Assunção–Rio Grande (zona de conexão com os demais domínios)
Direção preferencial do fluxo	Norte	Leste-oeste	Radial	Norte-Sul
Zona de descarga	Calha do rio Paraná	Afloramentos que cortam o Rio Grande do Sul; zona central da Bacia do Paraná	Bacia do Rio Taquari-Coxim e zona central da Bacia do Paraná	Provável direcionamento para os limites
Gradiente hidráulico médio	3 a 5m/km (zona de recarga); 0,1 m/km (zona confinada)	2 a 3 m/km (homogêneo no aquífero)	1,5 a 2 m/km (zona de recarga); 0,8 a 0,5 (em aquífero espesso)	-----

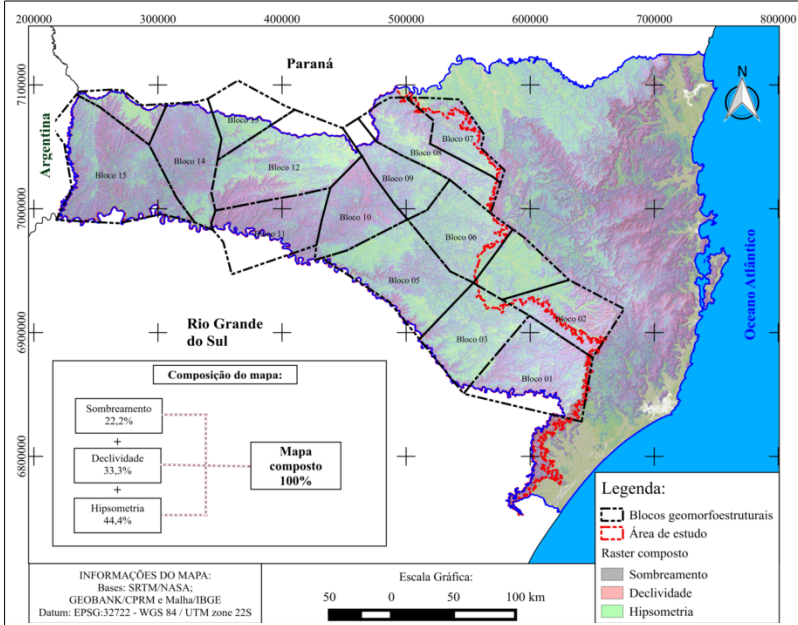
Fonte: Organizado a partir de OEA (2009b).

A análise da distribuição de Sólidos Totais Dissolvidos, como Na, Cl, SO₄ e outros, mostra que boa parte da descarga ocorre por fluxos ascendentes nas zonas mais fraturadas. No limite sudoeste do SAG, a descarga não ocorre por transferência lateral para outras formações e há descarga regional na rede hidrográfica dos rios Paraná, Pelotas, Iguazu e Uruguai. Além da existência de fluxos ascendentes das águas salinas do pré-SAG, outro fator que influencia a distribuição espacial dos solutos é a existência do Arco do Rio Grande–Assunção que também funciona como barreira hidráulica (OEA, 2009b). A água do SAG é considerada de boa qualidade natural e, com a ressalva de casos pontuais, não foram

identificados problemas de exploração ou contaminação excessiva.

Segundo a OEA (2009a), o SAG apresenta continuidade de formação geológica ao longo de toda a sua extensão. No entanto, outros estudos realizados, como o trabalho de Machado (2005), Soares *et al.* (2007) e Nanni (2008), comprovam que os estratos rochosos que compõem o SAG estão na verdade fragmentados em nível regional. Recentemente, Descovi Filho (2015) propôs que o SAIG/SG em Santa Catarina está fragmentado em 16 blocos geomorfoestruturais e tectônicos hidrogeológicos. Segundo o autor, os blocos geomorfoestruturais (Figura 3) representam as áreas que possuem um padrão geomorfológico semelhante, diferenciando-se das demais pela declividade, altitude e direções preferenciais de alinhamentos, possibilitando a sua compartimentação através da correlação com as unidades geológicas.

Figura 3. Mapa da distribuição dos blocos geomorfoestruturais do SAIG/SG no Estado de Santa Catarina.



Fonte: Descovi Filho (2015, p. 144).

Por sua vez, os blocos tectônicos hidrogeológicos partem dos blocos geomorfoestruturais e são caracterizados como áreas com informações hidrogeológicas acerca da cota absoluta média da porção superior da Formação Botucatu, no contato com a unidade Serra Geral. Os blocos tectônicos hidrogeológicos estão representados através de uma seção hidrogeológica na Figura 4 e são classificados em três tipos por Descovi Filho (2015, p. 150-151):

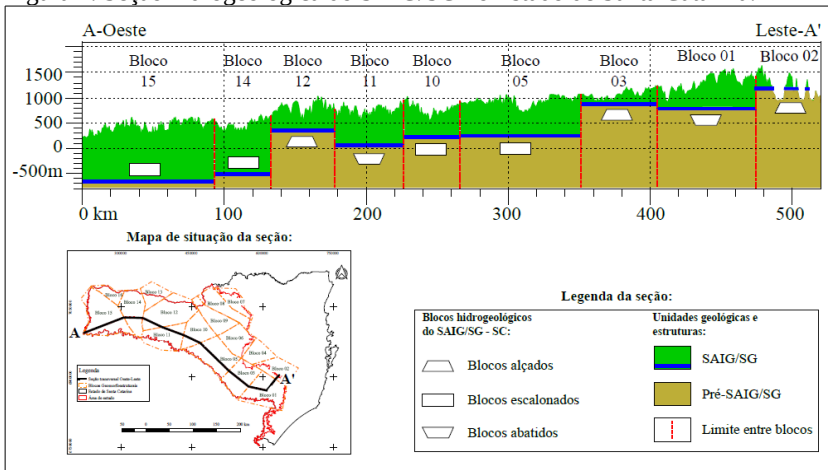
- **Blocos alçados** – aqueles que estão mais elevados em relação aos seus blocos vizinhos (blocos 2, 3 e 12). Nesses blocos o topo do SAG encontra-se, normalmente mais próximo da superfície, implicando em menores

espessuras do SASG a serem perfuradas, para o aproveitamento daquele aquífero, e eventualmente também numa maior vulnerabilidade do mesmo à contaminação a partir da superfície. Tendo em vista que os contatos laterais do SAIG/SG são exclusivamente com rochas do mesmo sistema aquífero, a tendência é de que as características hidroquímicas tendam a ser mais próxima às das águas meteóricas, que segundo Lisboa (1996), Bittencourt *et al.* (2003) e Nanni (2008) são predominantemente bicarbonatadas cálcicas.

- **Blocos escalonados** – Com tendência geral de aprofundamento do topo do SAG para oeste (blocos 5, 10, 14 e 15). Sua interação lateral com unidades geológicas pré-SAIG/SG ocorre apenas nesta direção, através de rejeitos de falha que desconectam lateralmente o SAIG/SG. Nesta condição os volumes de recarga de águas nos blocos são expressivos, permitindo a comunicação hidráulica com áreas com potenciometria mais elevada a partir dos limites leste de cada bloco, podendo conferir-lhes uma hidroquímica de fácies mista, evidenciando uma intensa mistura de águas.
- **Blocos abatidos** – Os blocos 1 e 11 encontram-se em posição inferior aos dois blocos vizinhos, gerando uma maior espessura relativa e uma situação de relativo confinamento, configurando o que tem sido colocado na literatura como “células isoladas” (Lisboa, 1996, Soares

et al., Nanni, 2008). Nesta situação, os blocos podem receber recarga lateral das unidades aquíferas ou aquitardos de idade pré-SAIG/SG. Os volumes de águas de recarga serão mais expressivos, porém a maior superfície de comunicação lateral entre SAIG/SG e unidades geológicas pré-SAIG/SG pode conferir às águas características hidroquímicas de maior tempo de residência, constituindo de acordo com Lisboa (1996) e Nanni (2008) águas do tipo bicarbonatadas sódicas.

Figura 4. Seção hidrogeológica do SAIG/SG no Estado de Santa Catarina.

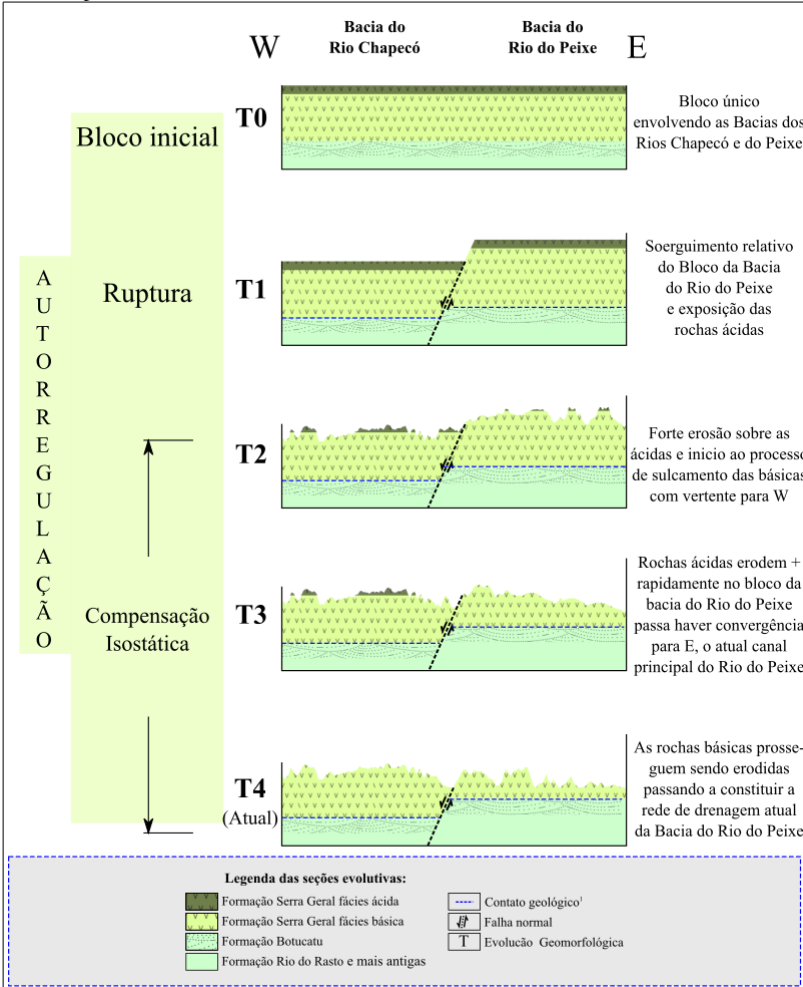


Fonte: Descovi Filho (2015, p. 153).

O fato do SAG apresentar compartimentação nesses diferentes tipos de blocos hidrogeológicos explica a segmentação tectônica em diversos trechos, assim como as diferenças de qualidade e quantidade das águas subterrâneas, dado o posicionamento do SAG, seja ao lado do SASG ou ao lado das camadas pré-SAG (DESCOVI FILHO, 2015). Na Figura 5 é apresentado o modelo geomorfológico proposto por Descovi

Filho (2015, p. 124) que mostra a gênese e evolução em estágios da compartimentação em blocos do SAIG/SG, tomando como exemplo as áreas hoje das bacias dos rios Chapecó e do Peixe/SC.

Figura 5: Modelo de evolução geomorfológica em blocos geomorfoestruturais e tectônicos hidrogeológicos do SAIG/SG, tendo como exemplo as bacias dos rios Chapecó e do Peixe/SC.



Fonte: Descovi Filho (2015, p. 124).

Há pouco tempo foram encontradas evidências da conectividade hidráulica entre o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e o SAG, principalmente em Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul (SCHEIBE & HIRATA, 2008). No SASG, de acordo com Fernandes *et al.* (2006), a circulação da água subterrânea é condicionada principalmente por fraturas horizontais, próximas do contato entre os derrames, e por estruturas tectônicas subverticais, que realizam a recarga vertical do SAG a uma velocidade muito lenta. A partir da ligação das descontinuidades com a superfície do terreno, as saídas desta água criam as nascentes e os cursos fluviais. Descovi Filho (2015) também acrescenta que os grandes alinhamentos do embasamento da Bacia do Paraná condicionam a estruturação do SASG e do SAG em blocos geomorfoestruturais e tectônicos hidrogeológicos, permitindo a conexão entre os dois sistemas aquíferos. Diante disto, conforme Scheibe (2006) *apud* Scheibe & Hirata (2008), a denominação que melhor define no Projeto Rede Guarani/Serra Geral o conjunto formado é Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG).

No três estados da região Sul do Brasil, a proporção do aproveitamento das águas do SASG é muito maior que a do Guarani. Este fato se deve ao total confinamento do SAG e a exploração das águas do Serra Geral ser facilitada por meio de poços de pouca profundidade e com ligação direta com as águas superficiais. Esta situação o torna mais vulnerável aos processos de contaminação, seja pelas próprias fraturas das rochas ou por defeitos construtivos dos poços. Além disso, falhamentos de grande porte ligam os dois sistemas aquíferos, de modo que o seu conjunto é conectado hidráulicamente, o que requer uma gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas (SCHEIBE & HIRATA, 2008).

No Estado de Santa Catarina, o SAG ocupa uma área aproximada de 49.200 km², ocupando a porção central e oeste. As duas unidades hidroestratigráficas que o constituem são as Formações Piramboia e Botucatu, com exceção das áreas aflorantes onde há litologias que correspondem apenas à Formação Botucatu. Esta última unidade possui estreita área de exposição, raramente ultrapassando 70 metros de espessura e apresenta, nas proximidade de áreas escarpadas, poços com

vazões consideradas insignificantes, demonstrando pouco armazenamento e transmissão de águas subterrâneas, em contraste com poços em outras formas de relevo (MACHADO, 2013).

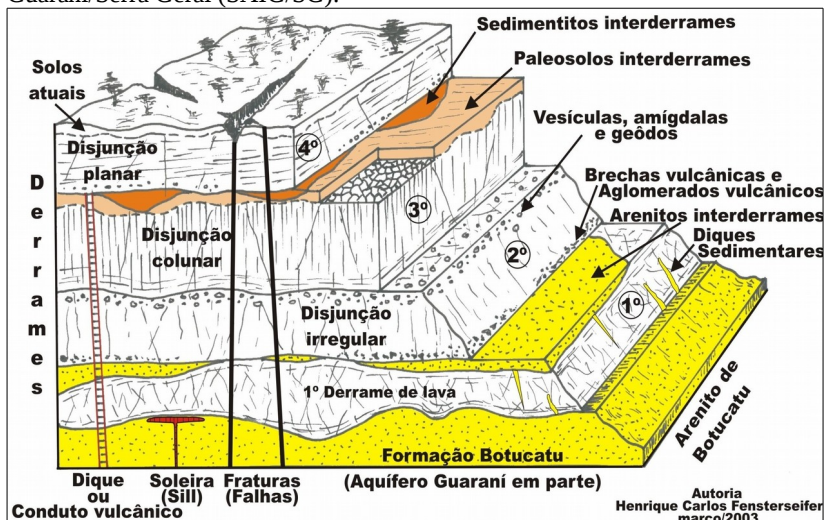
O SAG vem sendo explorado no Estado de Santa Catarina através de poços profundos construídos pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), com uso de importância estratégica para o abastecimento público, indústria, agricultura, dessedentação de animais e turismo. Devido à sua composição e estrutura, possui maior vulnerabilidade à contaminação antrópica nas áreas de afloramento (SCHEIBE & HIRATA, 2008).

Segundo Machado (2013), o SASG é caracterizado em Santa Catarina por rochas vulcânicas de composição ácida e básica, oriundas de derrames basálticos. Cada derrame, resultado do intenso magmatismo de fissura, têm como elementos de estrutura a zona vítrea basal, com disjunção horizontal; a zona intermediária, com juntas verticais; a zona superior, com disjunção horizontal e vertical; e, no topo, o basalto vesicular. As litologias desta unidade hidroestratigráfica confinam as unidades hidroestratigráficas do SAG e comportam-se como aquíferos fraturados. O contato concordante, à exceção das camadas mais antigas da Bacia do Paraná, com a Unidade Hidroestratigráfica Botucatu demonstra a sucessão de derrames basálticos sobre um ambiente árido e, por isso, é frequente a ocorrência de lentes e camadas de arenitos *intertraps*. De acordo com Descovi Filho (2015), o SASG possui diferenças de espessura que variam de 1224 metros, a oeste, até 100 metros a leste do Estado de Santa Catarina.

As características geomorfológicas dos derrames basálticos definem as características aquíferas na Unidade: na porção superior do “platô gondwânico”, favorece apenas a recarga dos aquíferos subjacentes; na porção média, há aquíferos suspensos, do contato entre zonas de disjunção vertical e horizontal, gerando nascentes para inúmeros cursos d'água; há também as soleiras (*sills*) em morros-testemunhos, formadas pela intrusão de diabásio entre as camadas de rochas sedimentares gondwânicas, principalmente na Formação Irati. A condição de ocorrência da água subterrânea é livre, quando próximo à

superfície, e confinado nas zonas mais profundas. Esta unidade, mesmo não contendo a maior quantidade de águas subterrâneas em Santa Catarina, é a mais importante do Estado, dado: o expressivo perfuramento de poços; a sua área de ocorrência, em 49,73% no Estado; a maior facilidade de acesso e custo-benefício para a exploração; e a boa disponibilidade de água (MACHADO, 2013).

Figura 6. Perfil estrutural esquemático do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG).



Fonte: Scheibe & Hirata (2008, p. 3).

No que diz respeito à gestão das águas subterrâneas, em Santa Catarina, conforme Henning (2013), o Projeto Rede Guarani/Serra Geral atua com o desenvolvimento de um modelo de uso integrado dos recursos hídricos que garante a disponibilidade de água, ao considerar nos estudos as inter-relações entre as águas superficiais, o SASG e o SAG. O Projeto Rede Guarani/Serra Geral reúne pesquisadores de diversas áreas e instituições de Santa Catarina que realizam estudos e promovem a ação ambiental na área de abrangência do SAIG/SG no Estado, compreendendo os municípios situados nas bacias dos rios

Pelotas, do Peixe e Canoas. O Projeto é considerado como de caráter disseminador, ou seja, produz a informação sobre o aproveitamento das águas superficiais e subterrâneas de forma integrada e sustentável no Estado, levando-a, em nível local, às instituições usuárias dos recursos hídricos por meio da assistência técnica especializada de pesquisadores e laboratórios equipados da rede interdisciplinar, além da continuidade e realização de mais estudos com a entrada de novos pesquisadores.

De acordo com Wildner *et al.* (2014) a região de estudo desta pesquisa apresenta como unidades geológicas o Grupo Serra Geral Indiferenciado e as Formações Gramado, Rio do Rasto, Teresina e Depósito Aluvionares. O Grupo Serra Geral Indiferenciado é considerado como uma das unidades geológicas no Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina, de 2014, e é constituído por “basaltos, basalto andesitos, riocacitos e riolitos, de filiação tholeiítica, com arenitos intertrápicos Botucatu na base”, além de “litarenitos e sedimentos vulcanogênicos da porção mediana ao topo da sequência”. Data do Cretáceo Inferior, entre 145-100,5 milhões de anos, juntamente com a Formação Gramado, composta por derrames basálticos, diferenciando-se pelas “formas de lóbulos, melanocráticos cinza; horizontes vesiculares espessos e abundantes”, de modo que “predominam zeolitas, carbonatos, apofilita e saponita, com estruturas de fluxo e *pahoehoe*”, assim como intercalações intertrápicas da Formação Botucatu. Já a Formação Botucatu data do período Jurássico, entre 163,5 e 145 milhões de anos, é de ambiente desértico e se refere a arenitos eólicos, em estratificações cruzadas, de coloração avermelhada e com tamanho de partículas variando de fino a médio, podendo conter arenitos argilosos de ambiente lacustre em sua base. Nesse sentido, no estudo de caso do presente trabalho pode-se colocar que a hidrogeologia da seção da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas/SC (Figura 1) está diretamente relacionada às elevações que a bordeiam, estruturadas pelo SAIG/SG e constituídas pela Formação Gramado, Grupo Serra Geral Indiferenciado e Formação Botucatu.

Com idades entre 252,17 e 247.2 milhões de anos, do período Triássico, a Formação Rio do Rasto apresenta como litologias “pelito e arenito com dominância de camadas tabulares ou lenticulares muito

estendidas”, oriundas de ambiente lacustre, e “siltito tabular, arenito fino tabular ou lenticular” de ambientes “lacustre, deltaico, eólicos e raros depósitos fluviais”. Mais antiga, a Formação Teresina, datada do Permiano, entre 259,8-252,17 milhões de anos, apresenta “depósitos marinhos rasos representados pela alternância de argilitos e folhelhos cinza-escuro com siltitos e arenitos muito finos cinza-claro”, havendo “ocorrência de calcários, por vezes oolíticos e leitões de coquina intercalados na porção superior”. Ambas as formações integram o Grupo Passa Dois, originado de “sedimentação fluvial à lagunar gradando a plataforma costeiro raso e costa-afora” (WILDNER *et al.*, 2014). Estas unidades afloram, predominantemente, no baixo curso da área de estudo, sendo pouco permeáveis e de pouca capacidade de transmissão de água, o que as caracteriza como aquíferos. De acordo com Machado (2013), a unidade hidroestratigráfica Rio do Rasto, quando confinado pelo SAIG/SG, comporta-se com armazenamento reduzido, e, em áreas aflorantes, como aquífero livre a semiconfinado. Por sua vez, a Formação Teresina, não apresenta águas subterrâneas em quantidades significativas, definindo-o como um aquífero pouco produtivo.

A unidade Depósitos Aluvionares, também presente no baixo curso da área de estudo, corresponde ao Holoceno, época mais recente, e possui “areias grossas a finas, cascalheiras e sedimentos siltico-argiloso, em calhas de rios e planícies de inundação” (WILDNER *et al.*, 2014). Para a seção da porção alta da Bacia do Rio Canoas, em função de sua limitada distribuição espacial, é pouco expressivo em termos de aquífero livre, sendo mencionada a sua ocorrência de maneira mais abrangente na planície litorânea (MACHADO, 2013).

Neste contexto, é possível inferir que quase a totalidade do volume de águas superficiais que escoam durante os períodos de recessão da precipitação nesta área em estudo do Estado de Santa Catarina depende diretamente das águas subterrâneas provenientes do SAIG/SG, através do processo de interação aquífero-rio.

2.2. INTERAÇÃO AQUÍFERO-RIO

O escoamento é uma das etapas no contexto do ciclo hidrológico

e é caracterizado pelo deslocamento das águas superficiais e subterrâneas na bacia hidrográfica⁷. Através dos solos, aquíferos, canais e reservatórios a água circula até encontrar um canal fluvial. De uma maneira geral, o escoamento é subdividido em superficial, o qual é formado sobre a superfície de solo saturado e pelos seus múltiplos canais; subsuperficial, que ocorre pela infiltração junto às raízes da cobertura vegetal; e subterrâneo, que representa o fluxo de contribuição ao aquífero. O escoamento varia de acordo com os fatores que influenciam o seu comportamento. Podem ser citados o relevo, através da densidade de drenagem, declividade, capacidade de armazenamento e forma da bacia hidrográfica; a cobertura da terra, que ao ter a presença de vegetação em sua maior parte tende a retardar o escoamento e aumentar as perdas por evapotranspiração; as modificações artificiais na morfologia fluvial, tais como reservatórios, canalizações e outros; a distribuição, a duração e a intensidade da precipitação; e o tipo de solo da área (TUCCI, 2009).

O suprimento de águas superficiais por águas subterrâneas, durante períodos de recessão de chuvas, tal como é analisado no presente estudo, diz respeito à relação que ocorre entre aquíferos e bacias hidrográficas, denominada de interação aquífero-rio. Segundo Cherepansky *et al.* (2009) a interação aquífero-rio se enquadra na etapa de escoamento como o processo de trocas, gerado por gravidade ou energia termal, entre as águas superficiais e subterrâneas, situadas permanentemente ou durante certo período em superfície ou nas camadas rochosas abaixo dela. Este processo é influenciado pela combinação de condicionantes naturais e antrópicos que variam no decorrer do tempo e do espaço.

Apesar da pertinência prática, é recorrente a separação tradicional

⁷ O conceito de bacia hidrográfica é aqui empregado como sendo o definido por Lima e Zakia (2000), o qual coloca que é um sistema geomorfológico, do tipo aberto, que recebe matéria e energia através do clima e as perde por deflúvio. A perturbação desse sistema por ações humanas, ocasionalmente com modificação no recebimento ou liberação de energia, apresenta a tendência à mudanças compensatórias de auto-organização que minimizam o efeito da degradação a fim de dar prosseguimento ao estado de equilíbrio.

entre águas subterrâneas e superficiais nos estudos de dinâmica hidrológica, em virtude da dificuldade de se observá-las e mensurá-las. No entanto, por se encontrarem normalmente no ambiente, por via de regra, hidraulicamente conectadas através de suas interações, a mudança deste paradigma é crucial para a proteção das águas e melhor compreensão e quantificação das trocas (BRUNKE & GONSER, 1997; WINTER *et al.*, 1998; MONTEIRO, 2006; KALBUS *et al.*, 2006).

Cada componente do sistema hidrológico, seja ela um rio ou aquífero, está em contínua interação com outra componente, e o entendimento dos processos envolvidos é importante tanto para os gestores de recursos hídricos quanto para os pesquisadores (WINTER *et al.*, 1998; SOPHOCLEOUS, 2002; IDOWU, 2007). As pesquisas acerca da interação aquífero-rio vêm sendo desenvolvidas desde a década de 1960, porém a sua intensificação vem ocorrendo apenas nos últimos anos. Parte destas contribuições focaram no processo físico de trocas entre as águas, trazendo soluções analíticas para as equações, enquanto que outros autores analisaram de maneira mais complexa a interação em estudos de caso específicos (LIMA *et al.*, 2007; ALBUQUERQUE, 2015).

Segundo Vasconcelos *et al.* (2013) os estudos sobre recarga e descarga de aquíferos em análises ambientais suscitam a interdisciplinaridade, em termos de desenvolvimento científico e gestão sustentável do solo e da água. Todavia, no que diz respeito aos aquíferos subterrâneos, consideram que a base teórica ainda não se mostra concisa e articulada, seja para demandas teóricas ou práticas.

A relação aquífero-rio vem sendo estudada também do ponto de vista ecológico, onde considera-se que na miscigenação das águas superficiais e subterrâneas há a formação de duas zonas, a zona ripária e a zona hiporreica, de características hidrogeoquímicas, termais e biológicas diferenciadas e que geram um habitat dinâmico para a biota (BRUNKE e GONSER, 1997; GARDNER, 1999; WOESSNER, 2000; KRAUSE *et al.*, 2007; ALBUQUERQUE, 2015).

Os processos de recarga e descarga fluvial estão intimamente

relacionados à interação entre as águas superficiais e subterrâneas (IDOWU, 2007). O processo de interação ocorre basicamente por trocas através do solo insaturado e pela infiltração ou exfiltração em zonas saturadas. A direção das trocas dos processos varia com a dinâmica hidráulica (BRUNKE & GONSER, 1997).

A interação está ligada à transferência intensiva de matéria e energia do sistema hidrológico, que em alguns casos modifica consideravelmente os regimes térmicos, de composição química das águas subterrâneas e superficiais, a mineralização de água e os processos biológicos. Entre os condicionantes naturais dos processos de interação aquífero-rio podem-se citar as particularidades geoestruturais da área (como plataformas, escudos cristalinos, dobramentos e depressões), geomorfológicas (planícies, vales fluviais, relevo cárstico, maciços de origem vulcânica, depressões, etc) e de permeabilidade das rochas. As condições climáticas do ambiente também são importantes para determinar o regime da água superficial e os volumes de recarga e descarga das águas subterrâneas (CHERPANSKY *et al.*, 2009), de modo que eventos de precipitação extrema e precipitações sazonais podem alterar a dinâmica hidráulica e induzir mudanças na direção do fluxo (BRUNKE & GONSER, 1997).

Além destes fatores de ordem natural, as trocas entre rio e aquífero são controlados também por processos biogeoquímicos; topografia da superfície do terreno e do leito do rio; distribuição e magnitude da condutividade hidráulica na camada de sedimentos, solos e rochas; posição dos corpos hídricos em relação ao sistema de fluxo subterrâneo; morfologia do canal, sinuosidade do rio e grau de incisão através do seu aluvião; infiltração; condições de umidade do solo; retenção de gradientes físico-químicos; e funcionamento do metabolismo da biota. A grande variedade destes fatores revela a importância da compreensão da interação aquífero-rio e a necessidade do estudo multidisciplinar e interdisciplinar que aborde os vários aspectos dos processos associados a ela (IDOWU, 2007).

Ademais, as condições naturais da interação de águas superficiais e subterrâneas são alteradas de maneira expressiva também pelas

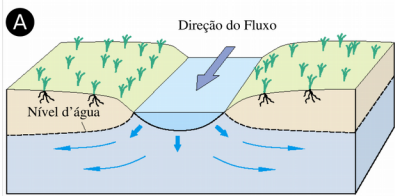
atividades humanas. Em diferentes maneiras ocorre a elevação ou rebaixamento do nível freático, principalmente com reservatórios superficiais, exploração intensiva da água subterrânea e o bombeamento de áreas de mineração com rebaixamento do nível freático local (CHERPANSKY *et al.*, 2009).

As trocas entre águas superficiais e subterrâneas são classificadas de diferentes maneiras na literatura, a exemplo da categorização pela direção dos fluxos (BRUNKE e GONSER, 1997; WINTER *et al.*, 1998), pelo tipo de conexão hidráulica (CHERPANSKY *et al.*, 2009), e pela posição vertical no relevo e características do escoamento (LERNER *et al.*, 2003). As classificações mencionadas estão apresentadas a seguir.

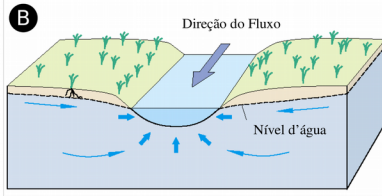
De acordo com Winter *et al.* (1998) os rios interagem com as águas subterrâneas (Figura 7) nos diversos tipos de ambientes através de três formas básicas: suprimento dos cursos d'água a partir da surgência do lençol freático em seu leito (exfiltração ou descarga); perda de água superficial por escoamento para as águas subterrâneas também através do leito (infiltração ou recarga); ou realizar as duas situações, ganhando água em alguns momentos e perdendo em outros. Para a água do aquífero descarregar em um canal fluvial, o nível do lençol freático em sua vizinhança precisa ser maior que o nível das águas superficiais. Em contrapartida, para que as águas superficiais se infiltrem no aquífero e ocorra a recarga, o nível das águas subterrâneas na vizinhança deve ser inferior ao fluxo superficial do canal fluvial.

A interação aquífero-rio (Figura 7) descrita no cenário B é a predominante na área de estudo, haja vista que o SAG está posicionado em cotas mais elevadas que as do Rio Canoas. As situações descritas nos cenários A, F e/ou G, onde prevalece a interação rio-aquífero, ocorre apenas na região dos campos de altitude, localizada nas cabeceiras da bacia hidrográfica, e em situações esporádicas de alta pluviosidade, onde o elevado nível dos rios pode contribuir para o fluxo em direção ao aquífero. Em outros locais da área de estudo, os demais cenários teóricos, menos prováveis de serem observados, também podem ocorrer e dependem das particularidades físico-naturais de cada situação.

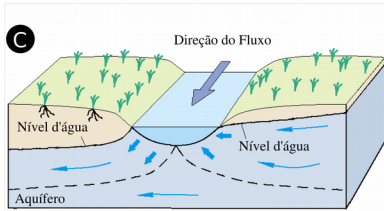
Figura 7. Cenários teóricos de ocorrência da interação aquífero-rio.



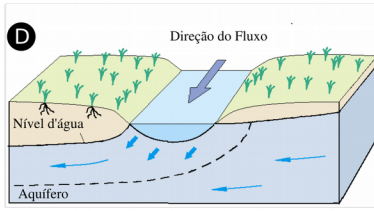
Rio perdendo água para o aquífero.



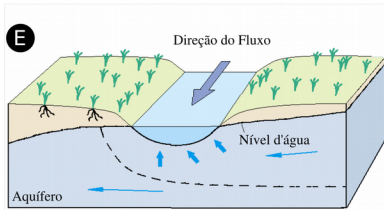
Rio recebendo água do aquífero.



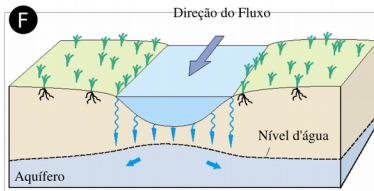
Rio com infiltração e surgimento a partir do aquífero na mesma seção.



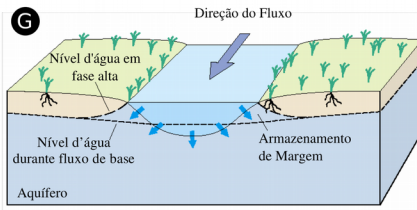
Rio com infiltração apesar de um dos lados ter carga hidráulica maior que o escoamento superficial.



Rio com surgimento apesar de um dos lados ter carga hidráulica menor que o escoamento superficial.



Rio é separado da água subterrânea por zona não saturada, mas mantém infiltração em seu canal.



Se os níveis do rio subirem mais alto que os níveis da água subterrânea adjacentes, a água do rio move-se em direção ao armazenamento de margem.

Fonte: Modificado de Winter *et al.* (1998) *apud* Arantes (2003, p. 18-20).

Brunke & Gonser (1997) colocam que essas direções de fluxos também apresentam outra nomenclatura: a) situação influente, quando a água superficial contribui para o fluxo subterrâneo (chamada de infiltração, subsidência, alimentação do aquífero ou recarga do aquífero); e b) situação efluente, quando a água subterrânea abastece o curso fluvial (denominada também de exfiltração, surgência ou rio alimentado pelo aquífero).

O contato entre o escoamento das águas superficiais em um rio e as águas subterrâneas nos aquíferos significa dizer que ambos, rio e aquífero, estão hidraulicamente conectados (LIMA *et al.*, 2007). Conforme Cherepanky *et al.* (2009) tal conexão pode ocorrer de três maneiras possíveis: a) sem conexão hidráulica, quando as trocas físico-químicas não ocorrem; b) conexão hidráulica constante, quando o processo de trocas entre as águas é frequente; e c) conexão hidráulica periódica, quando as trocas entre as águas ocorre somente em determinados períodos. Estas conexões modificam-se a todo momento, entre anos e estações, ao longo dos cursos d'água e da área dos corpos hídricos superficiais, onde até mesmo cada margem de um rio pode apresentar características diferenciadas de conexão. Além disso, dentro de uma bacia hidrográfica, um mesmo curso d'água poder ser suprido por diferentes aquíferos, assim como um único aquífero pode estar conectado com diferentes cursos fluviais.

Lerner *et al.* (2003) afirmam que os rios podem ser classificados ainda na interação aquífero-rio pela sua posição vertical no relevo em rios conectados, intermitentes ou de situação remota. Os rios conectados ocorrem comumente em climas temperados e úmidos e são alimentados pelo fluxo de descarga das águas subterrâneas. Nesta condição, a recarga é um processo excepcional, ocorrendo quando há mudanças geológicas, bombeamento de poços ou durante o período de elevação do nível das águas do canal fluvial. As trocas aquífero-rio são controladas pelo escoamento do canal, lençol freático e geologia.

Os rios intermitentes são os mais difíceis de analisar, pois alternam os eventos de recarga com as mudanças sazonais do lençol freático. É frequente que em alguns meses do ano, como no verão, em

função da maior evaporação e/ou menos precipitação, ocorra perda completa da água superficial para o aquífero, enquanto que no inverno, época mais chuvosa em determinados locais, a interação na forma de descarga da água subterrânea favoreça a situação de rio conectado. O rio pode ser classificado também como de interação remota, quando as águas subterrâneas não estão em contato direto com a água superficial (LERNER *et al.*, 2003).

Quanto às características do escoamento, Lerner *et al.* (2003) colocam que os rios podem ser perenes ou efêmeros. Os primeiros geralmente estão conectados e associados com a descarga da água subterrânea, próprios de climas úmidos e bacias hidrográficas maiores. Os últimos são peculiares a climas secos e sistemas hídricos intermitentes.

Por sua vez, um ambiente montanhoso apresenta precipitação variável e movimentação das águas em terrenos com elevadas declividades. Nas encostas íngremes, organismos escavadores e as raízes de plantas criam macroporos por onde a água infiltra rapidamente. Alguns tipos de rocha podem ser muito intemperizadas ou fraturadas, tendo a capacidade de transmitir considerável quantidade de água através do fluxo subsuperficial. É principalmente nessa situação, entre os eventos de precipitação, que o fluxo superficial é sustentado pela descarga das águas subterrâneas (WINTER *et al.*, 1998).

A resposta das águas subterrâneas em fundos de vale e próximos a rios conectados é uma parte importante das interações de águas superficiais e subterrâneas. Sem a precipitação, a descarga se dá pelo escoamento de base, ou seja, a percolação da água subterrânea regional. É apenas necessário um pequeno volume de água para saturar o solo para provocar o aumento do escoamento superficial, assim como uma elevação do lençol freático, deslocando um pulso de água subterrânea em direção à superfície, no caso o rio. Se o lençol freático fosse abaixo do leito do rio, o escoamento superficial seria capaz de infiltrar e recarregar o solo e o aquífero, mas o armazenamento limitado faria com que o lençol freático subisse rapidamente e a descarga de águas continuasse (LERNER *et al.*, 2003).

Sobre a gestão das águas no tocante à interação aquífero-rio na legislação brasileira, Costa *et al.* (2008) apontam que representa um grande desafio na prática, uma vez que a aplicação da Política Nacional de Recursos Hídricos e da atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos tem como unidade a bacia hidrográfica, mas que normalmente os aquíferos ultrapassam os limites das bacias hidrográficas, delimitadas a partir da topografia. Mesmo com a prerrogativa de que as águas superficiais e subterrâneas devem ser gerenciadas como um único recurso, na prática das normativas as águas superficiais ainda estão em mais evidência.

Na literatura científica brasileira, alguns estudos já foram realizados sobre a recarga ou descarga de águas subterrâneas no contexto da interação aquífero-rio. As pesquisas são frequentes nos Estados de São Paulo, geralmente relativas à bacia experimental do Ribeirão da Onça (ARANTES, 2003; BARRETO *et al.*, 2006; MAZIERO & WENDLAND, 2008; RABELO & WENDLAND, 2010; LUCAS & WENDLAND, 2011; WENDLAND *et al.*, 2015), e Rio Grande do Sul, em diferentes bacias hidrográficas (COLLISCHON & FAN, 2013; DORA, 2013, MATTIUZI *et al.*, 2015; LEDESMA, 2016).

Ao contrário da água superficial, que é de fácil identificação visual no escoamento do rio e acessível a mensurações, a água subterrânea é apenas reconhecida quando há a perfuração de poços e a interceptação do lençol freático. Quando estas águas estão em comunicação, é difícil estimar e quantificar as interações, uma vez que não é sempre possível diferenciá-las. Tal procedimento é realizado sob o ponto de vista da recarga e/ou descarga, no contexto das águas subterrâneas. Na análise da recarga das águas subterrâneas por águas superficiais, é essencial considerar: o rio como a principal via de recarga, principalmente em zonas áridas e semi-áridas, e a precisão dos métodos de avaliação. Já quando há o estudo da descarga de águas subterrâneas em um rio, como medida alternativa, os dados das medições de vazão disponíveis são o melhor recurso para análise do comportamento dos processos de interação, cujos métodos de análise também serão úteis à gestão de águas (LERNER *et al.*, 2003).

Kalbus *et al.* (2006) apontam para a existência de numerosos métodos para quantificar a interação aquífero-rio e consideram que todos apresentam incertezas e limitações. Aplicados na água superficial, no aquífero ou na zona de transição entre ambos, os métodos diferem quanto ao nível de resolução, tamanho da amostra e escala de tempo. A escala de medida em uma técnica selecionada exerce influência significativa sobre os resultados e o objetivo da pesquisa desempenha um papel decisivo na escolha do conjunto de técnicas mais apropriado. A melhor representação das condições locais é possível através da realização de medições em múltiplas escalas de análise numa única área de estudo, enquanto que em investigações regionais, métodos de larga escala são os mais adequados, mesmo que a análise dos processos exija resolução detalhada.

A quantificação da troca entre rio e aquífero pode ser determinada por métodos diretos, tais como infiltrômetros, diferença de vazões em trechos, lisímetros de fundo de rio e minipiezômetros (ARANTES, 2003). Além destes, há ainda métodos com traçadores térmicos, métodos baseados na lei de Darcy (para definição de gradiente hidráulico, condutividade hidráulica, velocidade da água subterrânea e porosidade), abordagens do balanço de massa (incluindo o método de descarga por seções transversais, a separação do hidrograma, traçadores ambientais e traçadores de soluto), assim como técnicas para determinar a concentração de contaminantes (KALBUS *et al.*, 2006).

Para fins metodológicos, na presente pesquisa de dissertação, optou-se por adotar o método de separação do hidrograma para determinar, em termos quantitativos, a interação aquífero-rio na seção considerada da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas. Tal método é explicado com maior profundidade no tópico seguinte.

2.3. HIDROGRAMA

O hidrograma, fluviograma ou hidrógrafa é o gráfico utilizado para a análise de dados do escoamento, ou seja, com a representação da

variação da vazão⁸ no tempo para a seção de um curso d'água (CARVALHO & SILVA, 2006), de modo que a distribuição da vazão é decorrente da interação na bacia hidrográfica de todos os componentes do ciclo hidrológico (TUCCI, 2009).

Em um hidrograma, a contribuição total para o escoamento se refere principalmente à precipitação ocorrida na área; ao escoamento superficial direto, incluindo o escoamento subsuperficial; e ao escoamento básico (CARVALHO & SILVA, 2006). Na Figura 8 é demonstrado um hidrograma acompanhado de um hietograma⁹. É possível notar que após o início da precipitação há um intervalo de tempo até que a vazão se eleve. Esse tempo de retardamento de resposta da bacia hidrográfica diz respeito ao deslocamento da água na superfície topográfica e inclui as perdas iniciais, que não contribuirão diretamente para o escoamento superficial, como a retenção de chuva em depressões, a infiltração no solo e a evapotranspiração com a interceptação vegetal (BARBOSA JÚNIOR, 2007). Neste caso, há de se considerar que em função da modificação de condições edafoclimáticas, a exemplo do maior uso da irrigação pela expansão de atividades agrícolas, a redução da evapotranspiração, assim como da infiltração, pode elevar o pico da curva do hidrograma pela conversão do volume da precipitação em escoamento superficial (DIAS, 2013).

Após a capacidade de infiltração ser superada, o hidrograma apresenta um período de ascensão, em função do início do suprimento de águas, predominantemente pelo escoamento superficial, com a elevação contínua da vazão até o seu valor máximo. A intensidade e a distribuição da chuva é o que determina a vazão de pico do hidrograma (BARBOSA JÚNIOR, 2007).

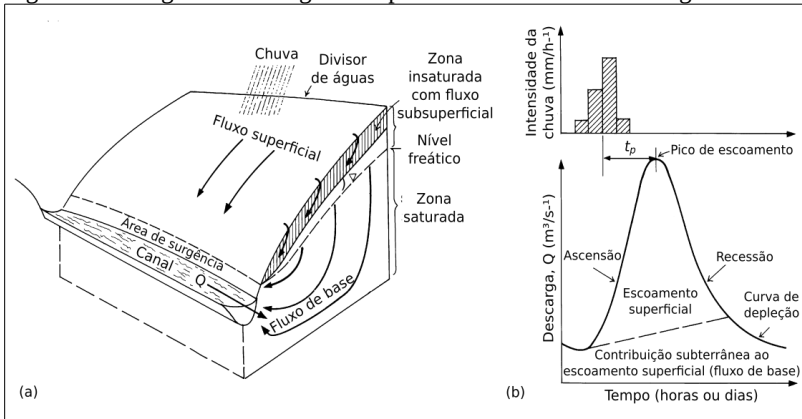
A chuva, transformada em água superficial, leva um certo tempo até ser interceptada através do monitoramento da vazão por uma estação

8 A vazão é definida como o volume escoado numa bacia hidrográfica por unidade de tempo, expressa em metros cúbicos por segundo ($m^3.s^{-1}$) ou em litros por segundo ($L.s^{-1}$) (CARVALHO & SILVA, 2006).

9 O hietograma é a representação gráfica da variação da precipitação no decorrer do tempo (TUCCI, 2009).

hidrometeorológica, em razão das condições físico-naturais do trecho que é considerado da bacia hidrográfica. Assim, apenas quando é atingido o ponto médio do hietograma, ou seja, o seu centro de gravidade, é que há a correspondência com o pico de vazão, sendo esse período denominado de tempo de pico (t_p) (COLLISCHONN & TASSI, 2008).

Figura 8. Hidrograma e hietograma hipotéticos de uma bacia hidrográfica.



Fonte: Hiscock & Bense (2014, p. 272).

Por via de regra, a vazão diminui após a precipitação cessar, desde o pico de vazão, e o hidrograma passa a se caracterizar com uma linha de recessão. Durante o período de recessão, a vazão apresenta um ponto de inflexão no escoamento, na medida em que o fluxo de base passa a ser novamente predominante na contribuição da vazão para a seção da bacia hidrográfica. O segmento que vai do ponto de inflexão em diante é designado como curva de depleção ou de recessão do escoamento de base. É difícil identificar com exatidão o ponto de inflexão, porém, sabe-se que o escoamento superficial direto ocorre em resposta mais rápida que o escoamento subterrâneo, o que no hidrograma é representado pela linha pontilhada de separação das contribuições de cada tipo de escoamento (BARBOSA JÚNIOR, 2007).

O hidrograma também apresenta valores de tempo como componentes de sua análise e que permitem identificar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Dentre estes valores, segundo Tucci (2009, p. 394), está o:

[...] tempo de retardo: é definido como o intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma;

[...] tempo de pico: é definido como o intervalo entre o centro de massa da precipitação e o tempo da vazão máxima;

[...] tempo de concentração: é o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante da bacia, deslocar-se até a seção principal. Esse tempo é definido também como o tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma;

[...] tempo de ascensão: é o tempo entre o início da chuva e o pico do hidrograma;

[...] tempo de base: é o tempo entre o início da precipitação e aquele em que a precipitação ocorrida já escoou através da seção principal, ou que o rio volta às condições anteriores a de ocorrência da precipitação;

[...] tempo de recessão: é o tempo necessário para a vazão baixar [...], quando acaba o escoamento superficial.

O processo de análise de um hidrograma trata de definir e quantificar os seus diferentes elementos. A sua forma é influenciada especialmente pelas características fisiográficas da bacia hidrográfica (PUYOL & VILLA, 2006). Em conformidade com os aspectos relativos ao relevo, como declividade, densidade de drenagem, forma da bacia

hidrográfica e capacidade de armazenamento. Bacias hidrográficas com vertentes íngremes possuem boa drenagem, apresentando hidrogramas mais pronunciados e com fluxo de base de menor contribuição. Por sua vez, bacias hidrográficas com predomínio de áreas planas reduzem o valor de pico e suavizam o escoamento. Já as bacias hidrográficas circulares tendem a antecipar o escoamento e a ter picos de vazão mais elevados em comparação com bacias hidrográficas alongadas (PORTO, ZAHED FILHO & MARCELLINI, 1999).

A presença de cobertura vegetal também influencia na forma de um hidrograma, haja vista que as florestas aumentam as perdas por evapotranspiração e retardam o escoamento. Similarmente, as modificações artificiais na morfologia fluvial alteram significativamente a dinâmica hidrológica, de modo que reservatórios reduzem os picos de vazão e canalizações aumentam (PORTO, ZAHED FILHO & MARCELLINI, 1999). O solo interfere no hidrograma de acordo com o seu tipo, natureza e nível de umidade. Com pouca umidade e o nível do lençol freático baixo, a precipitação pode ser retida, reduzindo o escoamento superficial e as curvas do hidrograma. Por fim, as características da precipitação (distribuição, duração e intensidade) também são essenciais para determinar a forma do hidrograma (BARBOSA JÚNIOR, 2007), uma vez que é a variável mais oscilante. Um hidrograma mais pronunciado revela um escoamento superficial intenso como resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica a um evento de chuva volumoso, enquanto que hidrogramas suavizados, de menor pico de vazão, demonstram chuva pouco significativa (COLLISCHONN & TASSI, 2008).

Particularmente no estudo da estimativa de descarga subterrânea em um rio é utilizado o método da separação do hidrograma, no qual são quantificados, em valores aproximados, o escoamento de base e o escoamento superficial a partir dos dados de vazão e precipitação, de modo que o escoamento de base representa a contribuição das águas subterrâneas para o fluxo superficial (KALBUS *et al.*, 2006). Existem vários procedimentos para separar os dois tipos de escoamento através do hidrograma (VEGTER & PITMAN, 2003), sendo os principais o método gráfico, o de traçadores químicos, isotópicos e os que envolvem

análises estatísticas de séries temporais e filtro autorrecursivos (FERNANDES *et al.*, 2003).

Não há até o momento uma forma segura para diferenciar as águas superficiais das subterrâneas depois que elas se misturam e formam o fluxo de um curso fluvial (BARBOSA JÚNIOR, 2007). O método da separação da hidrógrafa, recebe críticas, como, por exemplo, pela limitação de estações que medem o fluxo superficial em trechos longos (KALBUS *et al.*, 2006). Em investigação sobre a técnica de separação do hidrograma, com aplicação em bacias hidrográficas de todo o leste dos Estados Unidos e Montana, Halford & Mayer (2000) também criticaram a abordagem ao afirmar que a descarga subterrânea de água pode ter mais de uma origem, como da drenagem de margens de armazenamento, lagos, pântanos, solos ou neve de montanhas, e que os pressupostos do método seriam violados nestas condições. Brondie & Hostetler (2005) apontam ainda como fatores de interferência nos registros hidrográficos as perdas de água da corrente, como infiltração em aquíferos ao longo de áreas específicas dos cursos d'água, transpiração da vegetação ripária e evaporação direta, dificultando a identificação de maneira precisa a realidade da bacia hidrográfica.

Conforme Miranda *et al.* (2014), são poucas as pesquisas no Brasil que tratam da separação do escoamento subterrâneo do escoamento superficial direto pela análise do hidrograma. Todavia, este método permite a constituição de uma importante base de dados, que dá suporte à gestão de bacias hidrográficas no que concerne à legislação brasileira sobre o estudo integrado dos recursos hídricos. Dentre os autores que já utilizaram a separação do escoamento, pode-se citar Arantes (2003), Rabelo & Wendland (2010), Wendland *et al.* (2015) e Vasconcelos (2014), Collischon & Fan (2013), Dora (2013), Mattiuzi *et al.*, (2016) e Ledesma (2016).

Ainda a respeito dos procedimentos metodológicos na interação aquífero-rio, Idowu (2007) afirma que a dinâmica de fluxo do processo de interação aquífero-rio é tridimensional, e, assim, é também importante que as ferramentas de pesquisa simulem as condições de campo para a sua melhor compreensão.

2.4. IMPACTOS DA MODIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA NO ESCOAMENTO

Junto às características morfométricas, o clima e o uso da terra são os principais fatores que afetam a dinâmica hidrológica de uma bacia hidrográfica. Na análise de séries históricas de dados de vazão é comum haver uma não-linearidade, em razão da variabilidade hidrológica, que é regulada pelas variáveis de entrada e saída de água de uma bacia hidrográfica, ou seja, pelos aspectos do sistema físico. Pela sua distribuição temporal e espacial, a precipitação é a principal variável de entrada, enquanto que a evaporação possui menor efeito em regiões úmidas. Os anos chamados de úmidos são caracterizados pela elevação da precipitação, o que provoca o aumento do escoamento em detrimento da saturação do solo e redução da evapotranspiração potencial. Em contrapartida, nos anos secos, a evapotranspiração e a infiltração reduzem o escoamento como resposta da bacia hidrográfica. A correlação entre dados de precipitação e vazão ocorre, portanto, sob uma condição de proporcionalidade. As principais influências climáticas envolvem processos em escala regional e global como, por exemplo, mudanças na atividade solar, circulação atmosférica, oscilações decadais e intercadais do Pacífico Sul, alterações da biosfera, no volume de terra e de gelo. Geralmente as séries históricas de dados climáticos não são longas e, em sua maioria, compreendem períodos entre 20 e 50 anos, sendo que quanto maior o tempo, maior a representatividade para identificar a variabilidade natural do clima no ciclo hidrológico (TUCCI, 2002).

Entretanto, as atividades humanas que implicam em mudanças dos tipos de uso e cobertura da terra atuam de tal maneira que podem alterar o comportamento do escoamento de forma mais rápida e realçar os seus extremos, ou seja, aumentar a frequência do escoamento mínimo e máximo como resultado da degradação das condições ambientais. Nesse sentido, o papel das alterações climáticas no ciclo hidrológico, especialmente no comportamento de escoamento, vem sendo extensivamente discutido (BRONSTERT, NIEHOFF & BÜRGER, 2002). Estudos de caso na literatura científica internacional, em diferentes bacias hidrográficas, têm demonstrado que as modificações do

uso e cobertura da terra afetam a dinâmica hidrológica (BROWN *et al.*, 2005; SHUSTER *et al.*, 2005; ZHANG & SCHILLING, 2006; HURKMANS *et al.*, 2009; LIU *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2014). Nesse contexto, Ye *et al.*, (2013) consideram que um trabalho científico da avaliação dos efeitos relativos às alterações climáticas e as atividades humanas é fundamental não apenas para a compreensão do mecanismo de resposta hidrológica na bacia hidrográfica, mas também para contribuir com informações que possam ser utilizadas para a gestão de águas.

As pesquisas, intensificadas nas últimas duas décadas, revelam a crescente conscientização acerca da importância das alterações do uso e cobertura da terra, nas escalas local e regional, dentro do planejamento baseado em bacias hidrográficas. Dentre as áreas em que esse foco tem sido discutido mais amplamente estão situadas a hidrologia, gestão ambiental, agricultura, Geografia, Geologia, espaços verdes, paisagem, assim como o planejamento de prevenção de desastres (LIM & SASAKI, 2016). Também há estudos que se estendem até mesmo em nível global, como, por exemplo, da influência da mudança da cobertura da terra do planeta no ciclo hidrológico terrestre (STERLING, DUCHARNE & POLCHER, 2013).

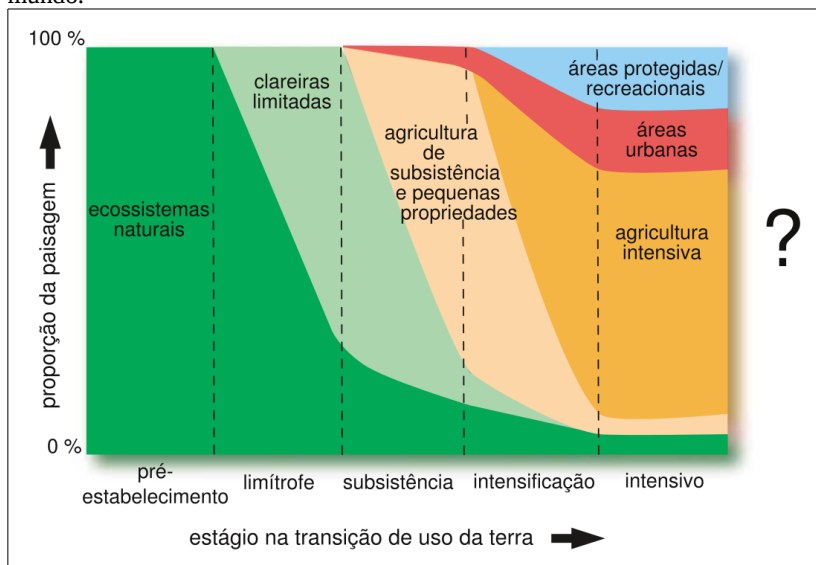
Conforme DeFries e Eshleman (2004), a investigação destinada à compreensão das relações entre a mudança do uso e cobertura da terra e os processos hidrológicos proporcionaria, para o momento atual e as próximas décadas, subsídios teóricos cada vez mais consistentes para as tomadas de decisão, as quais devem equilibrar os compromissos entre os benefícios positivos da alteração do uso da terra aos seres humanos e as consequências não intencionais, mas potencialmente negativas, ao ambiente. Chamam atenção também para o fato de que o enfoque de pesquisa requer uma abordagem multidisciplinar e com uma visão abrangente para os processos hidrológicos, a fim de conciliar a saúde ecológica e as necessidades humanas de alimentos, água e abrigo.

Apesar dos tipos de uso e cobertura da terra variarem em diferentes partes do mundo, a sua finalidade é quase sempre a mesma, ou seja, a de apropriação de recursos naturais (FOLEY *et al.*, 2005). A

mudança no uso e cobertura da terra influencia as características do escoamento em uma bacia hidrográfica, alterando a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, o que promove novas mudanças no uso e cobertura da terra em um círculo vicioso (SAJIKUMAR & REMYA, 2015). No que se refere às alterações do uso da terra e os efeitos nas águas subterrâneas, as pesquisas tem focado principalmente no estudo da qualidade da água e negligenciado estudos sobre a quantidade (DAMS, WOLDEAMLAK & BATELAAN, 2008).

A regulação hidrológica, realizada pelo balanço hídrico e as variáveis hidrológicas, é, em grande medida, controlada pela presença de vegetação na área de drenagem (NOSETTO *et al.*, 2012). Para entender os efeitos futuros no escoamento fluvial é relevante compreender o seu comportamento a partir dos efeitos das mudanças históricas do uso da terra (CROOKS & DAVIES, 2001). A Figura 9 mostra como a vegetação vai sendo substituída por outros usos da terra através de padrões espaciais. De um modo geral, os tipos de uso e cobertura da terra apresentam transições em uma determinada região no decorrer do tempo histórico. Como nos casos das transições demográficas e econômicas, as sociedades seguem uma sequência de padrões de uso da terra, passando da vegetação natural (fase pré-estabelecimento) para clareiras limitadas (fase limítrofe), agricultura de subsistência e pequenas fazendas (fase de subsistência), agricultura intensiva (fase de intensificação), e, por fim, com áreas urbanas e áreas de proteção recreativas (fase intensiva). Não são todas as partes do mundo que passam linearmente por essas transições, uma vez que elas dependem da história, condições socioeconômicas e do contexto ecológico de cada região. Além disso, alguns lugares permanecem em uma mesma fase por um longo período, enquanto outros queimam etapas, atravessando rapidamente os estágios (FOLEY *et al.*, 2005).

Figura 9. Sequência geral de mudanças dos padrões espaciais de uso da terra no mundo.



Fonte: Foley *et al.* (2005).

Os efeitos da conversão de florestas para os principais tipos de uso e cobertura da terra sobre o escoamento estão explicados a seguir. A literatura acerca desse tema é dispersa e fragmentada, ou seja, compartilhada por várias áreas do conhecimento e, para tal, optou-se por trazer algumas investigações de estudos específicos com dados concretos obtidos a partir de experimentos ou modelos hidrológicos que simulassem cenários dessa modificação para monocultivos, pastagens e urbanização. Vale ressaltar que as mensurações nas pesquisas variam em razão dos objetivos de cada pesquisa, dos diferentes métodos empregados e das particularidades ambientais de cada região analisada.

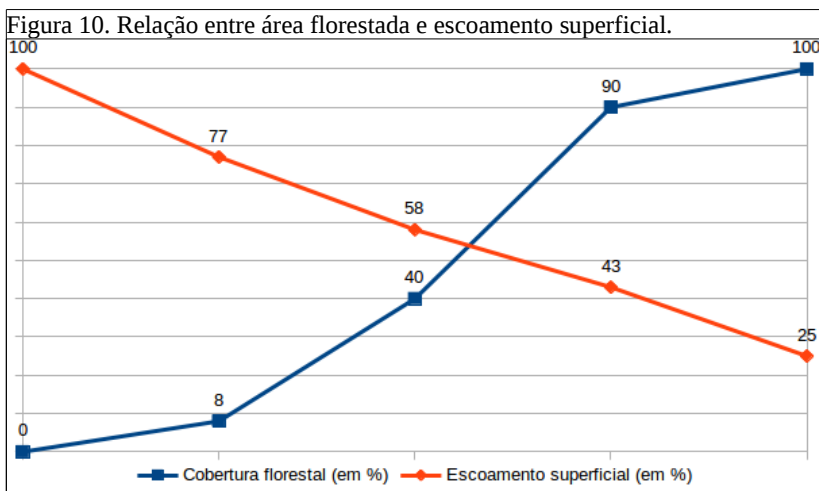
2.4.1. Florestas

O vínculo entre as florestas e as águas faz parte de um dos mecanismos de regulação do equilíbrio dinâmico do ambiente. O

contexto desse vínculo faz parte da evolução da paisagem, quando mecanismos naturais, também chamados de “serviços ambientais”, são estabelecidos para a regulação do controle da quantidade de águas, na conservação das vazões mínimas, bem como na sua qualidade e dos ecossistemas aquáticos presentes (LIMA, 2010). A cobertura florestal desempenha funções eco-hidroológicas em diferentes posições do relevo. Nos topos de morro possibilita a recarga de aquíferos, nas encostas diminui o escoamento e a ação erosiva, nas áreas ripárias exerce a função de proteção dos corpos hídricos e, nos intervalos, auxilia nos diferentes processos. Em seu conjunto, as funções eco-hidroológicas, reguladas pela presença de vegetação adequada em cada posição do relevo, exerce a manutenção hídrica em termos de quantidade e qualidade na bacia hidrográfica. As funções da vegetação garantem maior segurança hídrica frente a cenários de oscilações de pluviosidade, como eventos climáticos extremos, e do crescente consumo hídrico (TAMBOSI *et al.*, 2015).

A remoção da floresta para tornar a terra disponível para a agricultura e o crescimento urbano envolvem o corte das florestas e a remoção da vegetação ciliar. O desflorestamento tende a diminuir a evapotranspiração e a aumentar o escoamento superficial e a erosão do solo. Da mesma maneira, reduz a infiltração e, conseqüentemente, o escoamento de base para a manutenção do suprimento de água dos cursos fluviais durante os períodos secos (WINTER *et al.*, 1998).

Pode-se considerar que numa bacia hidrográfica o escoamento superficial é inversamente proporcional à cobertura florestal. De acordo com Burger (1976) *apud* Balbinot *et al.* (2008) o escoamento superficial tende a ser maior na medida em que a área de florestas diminui como resultado da pouca interceptação vegetal e retenção no solo por meio da infiltração (Figura 10). Hoffmann e Nanni (2016) ressaltam, no entanto, que uma menor porção de floresta em bacia hidrográfica não quer dizer que haja uma retenção contínua de vazões elevadas nos cursos fluviais, uma vez que as águas superficiais se concentram com vazões de pico elevadas em períodos muito curtos de tempo. Nessa situação são geradas enchentes ou inundações seguidas de redução do nível das águas durante os períodos pós-precipitação.



*Há de se ressaltar que nem sempre uma área sem nenhuma cobertura florestal terá 100% da água precipitada convertida em precipitação, o que representaria uma situação excepcional. Os valores foram aqui mantidos apenas para fins comparativos.

Fonte: Adaptado a partir de Burger (1976) apud Balbinot et al. (2008, p. 141).

As florestas, dentro do balanço hídrico¹⁰, possibilitam os processos de interceptação, infiltração, escoamento e erosão, que fazem parte da distribuição de energia e água em uma bacia hidrográfica. (BALBINOT *et al.*, 2008). No Quadro 2 notam-se os principais efeitos da dinâmica da vegetação florestal sobre a quantidade de águas.

Quadro 2. Efeitos desempenhados pela vegetação florestal na dinâmica hidrológica. Os autores mencionados no quadro abaixo foram citados por Balbinot *et al.* (2008) e são aqui mantidos apenas para fins de revisão.

Papel da floresta	Efeito sobre a quantidade de água ofertada na bacia hidrográfica
Interceptação	Ocorre quando as copas das árvores recebem a precipitação,

¹⁰ O balanço hídrico corresponde à quantificação dos componentes que envolvem a transferência de água através de uma bacia hidrográfica, incluindo a precipitação, a umidade do solo, a evapotranspiração e a vazão (TUCCI, 2009).

Papel da floresta	Efeito sobre a quantidade de água ofertada na bacia hidrográfica
vegetal	onde cerca de 10% a 40% da água pode ficar retida pela biomassa e ser evaporada para a atmosfera, perfazendo assim o seu primeiro fracionamento. A outra parte é direcionada, de modo que possa abastecer os lençóis d'água subterrâneos e retardar os picos de cheias (BLACKKE, 1975).
Precipitação interna	Chuva que passou pelos espaços entre as copas das árvores e que atingem o substrato da floresta, reduzindo-se na medida em que há o adensamento da vegetação ou aumento da demanda de água pela mesma (VALLEJO, 1982).
Escoamento pelo tronco	Representa apenas algo em torno de 1,8% da parcela de precipitação, variando de acordo com a morfologia da espécie vegetal e a estrutura do dossel (MIRANDA, 1992).
Fluxos de água no solo	Refere-se à água que infiltra no solo, tornando-se maior quando aumenta a área de cobertura, a densidade e a idade da floresta (LULL, 1963), sendo que a remoção do substrato florestal seguido do adensamento do solo restringe a capacidade de infiltração em até 40% (JOHNSON, 1940).
Evapotranspiração	Processo físico que resulta da transpiração foliar em combinação com a evaporação direta e que retorna a água para a atmosfera, reduzindo o armazenamento de água na bacia hidrográfica (ROBERTS, 1983).

Fonte: Balbinot *et al.* (2008) *apud* Hoffmann e Nanni (2016, p. 87-88).

2.4.2. Monocultivos

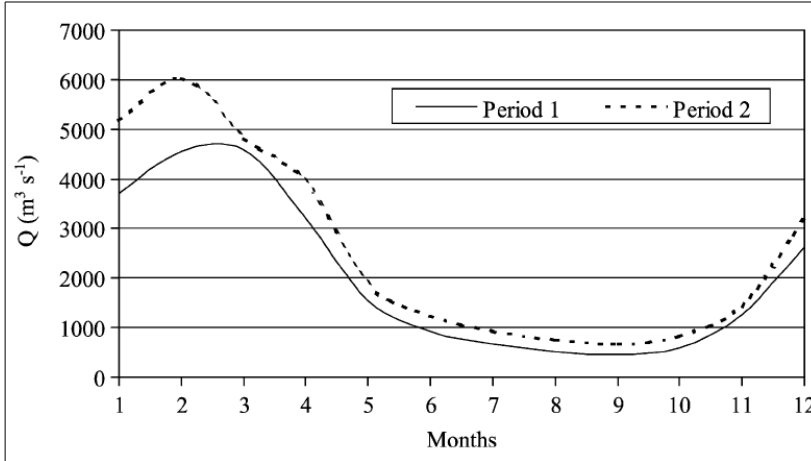
Os monocultivos envolvem o corte da vegetação e o revolvimento do solo em superfície, o que reduz a evapotranspiração e a infiltração da água em comparação com uma floresta ou agrofloresta. Lucas *et al.* (2012), Paes *et al.* (2012), Costa, Botta & Cardille (2003) e Woldesenbet *et al.* (2017) demonstram os efeitos na dinâmica de escoamento provocada por culturas agrícolas.

Sobre o impacto da alteração do uso da terra de floresta nativa

para cultivos, Lucas *et al.* (2012), ao estimarem a recarga na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça/SP pelo tipo de cultura agrícola, identificaram que a infiltração apresentava valores equivalentes entre 7% e 20% da precipitação total, sendo, respectivamente, de 1775 mm e 1808 mm, considerando o período de 2004 a 2011. Dentre os tipos de culturas agrícolas analisadas (cana de açúcar, citros, pastagem e eucaliptos), provou-se que o uso da terra com eucaliptos e citros reduzem as taxas de recarga, alertando que a sua expansão pode potencializar o problema. Os resultados encontrados por Paes *et al.* (2012) demonstraram que a compactação do solo por estas culturas na mesma bacia hidrográfica, em razão do manejo, elevam a contribuição ao escoamento superficial, de modo que as áreas com antigos plantios de citros e cana de açúcar eram mais compactadas e com menor taxa de infiltração, enquanto que as áreas de eucalipto recém-plantado detinham menor compactação e maiores níveis de recarga.

Costa, Botta & Cardille (2003) avaliaram o efeito do uso da terra na série histórica de 50 anos de descarga fluvial, de 1949 a 1998, de um trecho do Rio Tocantins, no município de Porto Nacional/TO. Houve a comparação entre dois períodos: de 1949 a 1968, quando houveram poucas mudanças na cobertura da terra, com o predomínio de agricultura em 30,2% da área de drenagem no ano de 1960; e de 1979 a 1998 quando ocorreram mudanças acentuadas na cobertura da terra, ampliando para 49,2% o uso para a atividade agropastoril em 1995. Embora a variação da precipitação seja estatisticamente pouco significativa para os períodos em análise, a descarga média anual para o segundo período foi 24% maior do que no primeiro período. Do mesmo modo, a descarga durante o intervalo de maior fluxo sazonal de escoamento aumentou em 28% em função da redução da evapotranspiração, como resposta hidrológica da substituição da vegetação do Cerrado pela agricultura e pastagem (Figura 11).

Figura 11. Descarga média mensal para os períodos 1 e 2 do Rio Tocantins em Porto Nacional/TO



Fonte: Costa, Botta & Cardille (2003, p. 214)

Outro estudo de influência da agricultura no escoamento é o de Woldeesenbet *et al.* (2017) que pesquisaram acerca da contribuição individual do uso e cobertura da terra para o balanço hídrico, entre os anos de 1986 e 2010, para a escala de duas sub-bacias hidrográficas, a do Beles e a do Lago Tana, na região da Bacia Upper Blue Nile/Etiópia. No período considerado, a sub-bacia de Tana teve expansão de 46,5% para 56,1% de áreas de cultivo e a sub-bacia de Beles de 6,1% para 40,8%. Ficou comprovado que a expansão da agricultura é diretamente proporcional ao escoamento superficial, dado que na sub-bacia de Tana houve o aumento anual de 145,9 mm para 167,8 mm do deflúvio e na sub-bacia de Beles passou de 199,8 mm para 302,3 mm. Ao mesmo tempo, a ampliação de cultivos é inversamente proporcional ao fluxo subterrâneo, de modo que na primeira sub-bacia reduziu o escoamento anual de 297,8 mm para 286,9 mm e na segunda de 504,4 mm para 416,8 mm. Dessa forma, durante as estações de chuvas houve um acréscimo no escoamento superficial, intensificando os processos erosivos e de sedimentação, enquanto que nas estações secas houve o rebaixamento do fluxo de base na área de estudo.

No que diz respeito ainda aos monocultivos, cabe destacar ainda os impactos provocados pelas coberturas da terra com espécies florestais exóticas, dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, as quais atendem ao sistema industrial madeireiro e de papel e celulose.

Conforme Van Dijk & Keenan (2007), os monocultivos de espécie florestal costumam provocar a redução do escoamento superficial médio e a capacidade de recarga subterrânea e varia de acordo com as características da plantação (diferenças de fisiologia, configuração e gerenciamento, além de operações florestais), funcionamento hidrológico da cobertura terrestre e da dinâmica hidrológica (como o tamanho do cultivo, localização na bacia hidrográfica e perdas internas). Segundo Vogelmann, Prevedello & Reichert (2015), uma das principais características dessas espécies florestais é o recobrimento das partículas do solo por compostos orgânicos hidrofóbicos, os quais agem repelindo do solo a água, provocando como principais impactos a geração de fluxo preferencial, redução da infiltração, alteração da sortividade e elevação do escoamento superficial, o que intensifica a ação erosiva. Para melhor elucidar os efeitos desse tipo de cultivo na quantidade de águas são apresentadas as contribuições de Viola *et al.* (2014), Rodríguez-Suárez, Perez & Diaz-Fierros (2011), Chanie *et al.* (2013) e Mattos (2015).

A simulação da resposta hidrológica provocada pelas mudanças no uso e cobertura da terra a partir da silvicultura, com *Eucalyptus*, e da floresta nativa foi realizada por Viola *et al.* (2014) para um trecho da Bacia do Rio Alto Grande, localizado entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo. Foram definidos cinco cenários para o tamanho da área de cultivo. Os autores identificaram que o escoamento superficial médio se tornaria reduzido com uma cobertura de 20, 50 e 100% da área de *Eucalyptus*, com os respectivos valores de cada cenário em 51,65 mm ano⁻¹, 110,29 mm ano⁻¹ e 59,48 mm ano⁻¹. Já os cenários de 30 e 70% de desflorestamento da vegetação nativa resultariam em acréscimo do escoamento superficial médio, respectivamente, em 57,63 mm ano⁻¹ e 156,78 mm ano⁻¹, apontando que tal mudança nas duas últimas situações simuladas poderia acarretar a ocorrência de enchentes e inundações mais intensas.

Rodríguez-Suárez, Perez & Diaz-Fierros (2011) analisaram como o crescimento da plantação de *Eucalyptus globulus* afeta o nível do lençol freático em pequenas bacias hidrográficas. Em uma bacia hidrográfica de pequena escala, no município de Abegondo/Galícia, setor noroeste da Espanha, houve a conversão de pastagem e cultivo de milho para *Eucalyptus globulus* no ano de 1998. Desde então, os autores observaram que nos primeiros três anos de crescimento da plantação a taxa de queda do lençol freático permaneceu estável, de 2 a 2,5 mm dia⁻¹, atribuindo o valor à presença de transpiração pela vegetação de fundo na área de drenagem. Contudo, no período entre o terceiro e o sexto ano, a taxa aumentou linearmente com o crescimento da folhagem da biomassa e os valores dobraram para 4,5 a 4,9 mm dia⁻¹ no seu auge. Finalizado o crescimento no sétimo ano, a taxa de queda do nível freático passou para os valores iniciais de aproximadamente 2,2 mm dia⁻¹. Tal experimento indica que a presença de monocultivos de espécie florestal exótica precisa ser considerada na gestão de águas.

A área drenada pelo *Eucalyptus* é mais um dos fatores a ser considerado. Numa pesquisa sobre a dimensão do dano provocado pelo *Eucalyptus* no ecossistema, Chanie *et al.* (2013) realizaram experiências de campo e entrevistas com 25 agricultores na Bacia Hidrográfica de Koga, próximo ao Lago Tana/Etiópia. Os autores verificaram que, além da diminuição dos nutrientes no solo em um raio de até 20 metros em torno de cada árvore, afetando a produtividade do cultivo de milho no entorno, houve a redução do teor da umidade em até 30 metros de cada indivíduo, resultado que foi confirmado pela percepção dos agricultores.

A avaliação do efeito da conversão de pastagem para *Eucalyptus* na Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça/SP, na zona de afloramento do SAG, por Mattos (2015), estimou a taxa de recarga subterrânea, variação de armazenamento, fluxo lateral e percolação profunda. Os resultados evidenciaram que com a mudança de uso e cobertura da terra, houve a diminuição da recarga direta de 876 mm, ou seja, 51% da precipitação anual, em 2011, para 147 mm, ou 10 % da precipitação anual, no ano de 2013. Observou também que surgiu um fluxo transversal da área de pastagem próxima em direção à área de cultivo da

espécie florestal. O estudo sugere que a plantação alterou de maneira significativa nesta área o comportamento do balanço hídrico sazonal e anual.

2.4.3. Pastagens

Os impactos das pastagens geralmente estão associados ao baixo porte da vegetação utilizada e à compactação do solo pelo pisoteamento provocado pelo gado. Os trabalhos de Salemi *et al.* (2012), Souza-Filho *et al.* (2016), Zimmermann, Elsenbeer & Moraes (2006), Marshal *et al.* (2009) e Germer *et al.* (2010) comprovam tal comportamento das águas em bacias hidrográficas com esse tipo predominante de uso e cobertura da terra.

Na pesquisa relacionada a alteração do uso da terra de floresta para pastagem, Salemi *et al.* (2012) identificaram que a microbacia localizada em Natividade da Serra/SP, completamente coberta por pastagem apresenta conversão de 51% da precipitação (1433 mm) em escoamento superficial anual (736 mm), enquanto que em uma microbacia próxima coberta por floresta o deflúvio foi de 40% da precipitação durante o período analisado. Salemi *et al.* (2012) compararam ainda os resultados de estimativa do escoamento superficial com o de outros autores, mostrando que os coeficientes de deflúvio de uma pastagem são maiores que de uma floresta (Quadro 3). É importante salientar que apesar dos usos da terra serem os mesmos, a diferença de valores para os autores mencionados se dá pelas particularidades ambientais em cada local de estudo, como precipitação, posicionamento do ponto de monitoramento no relevo, porte da vegetação, dentre outros fatores.

Quadro 3. Coeficientes de deflúvio para floresta e pastagem obtidos em experimentos realizados em microbacias hidrográficas. Os autores mencionados no quadro abaixo foram citados por Salemi *et al.* (2012) e são aqui mantidos apenas para fins comparativos.

Local de estudo	Coeficiente de deflúvio (vazão/precipitação)
-----------------	---

Mata Atlântica	
Pastagem (SALEMI <i>et al.</i> , 2012)	0,51
Floresta (GROPPO, 2010)	0,40
Mata Atlântica	
Floresta (FUJIEDA <i>et al.</i> , 1997)	0,70
Mata Atlântica	
Floresta (DONATO <i>et al.</i> , 2008)	0,60
Amazônia	
Pastagem (MORAES <i>et al.</i> , 2006)	0,17
Floresta (MORAES <i>et al.</i> , 2006)	0,03
Amazônia	
Pastagem (GERMER <i>et al.</i> , 2009)	0,18
Floresta (GERMER <i>et al.</i> , 2009)	0,01
Amazônia	
Pastagem (BIGGS <i>et al.</i> , 2006)	0,35

Fonte: Adaptado a partir de Salemi *et al.* (2012, p. 136).

Souza-Filho *et al.* (2016) investigaram os efeitos das mudanças de uso e cobertura da terra a partir da construção da rodovia Trans-Amazônica, na Bacia do Rio Itacaiúnas/AM. O estudo abrangeu quatro décadas, com a classificação de imagens de satélite dos anos de 1973, 1984, 1994, 2004 e 2013. Na década de 1970 a região apresentava 99% de Floresta Amazônica e 0,3% de Savana, enquanto que em 2013 havia aproximadamente 48% de Floresta Amazônica, o predomínio de 50% de pastagens e 2% com outros usos. Na pesquisa em questão foram identificadas evidências de que a temperatura média do ar aumentou 1,7°C, a umidade relativa foi reduzida em 10% e houve um acréscimo de 85% no escoamento superficial entre 1973 e 2013.

Outro estudo acerca dos efeitos das pastagens é o de Zimmermann, Elsenbeer & Moraes (2006), que pesquisaram sobre os

impactos de uso e cobertura da terra em áreas representativas de desflorestamento na bacia amazônica sobre a dinâmica hidrológica no solo, mensurando a infiltração e a condutividade hidráulica. Dentre os usos da terra, a pastagem obteve o menor valor de infiltração e condutividade hidráulica, seguido das áreas de cultivo (com banana e teca, esta última também conhecida como *Tectona grandis*), de capoeira e floresta. Os autores destacam que mesmo após 13 anos de pastejo, ainda era possível mensurar o efeito provocado pelo pisoteamento do gado nas propriedades do solo na área de cultivo de teca.

Marshal *et al.* (2009) também confirmam os impactos com experimento na bacia hidrográfica do Rio Severn, no Reino Unido, para prever os efeitos em inundações a jusante de áreas de pastagem. Observaram que a condutividade hidráulica e o teor de umidade saturada foi maior na área florestada, mesmo com 10 anos de crescimento, o que representa redução significativa de contribuição aos picos de escoamento superficial frente às áreas de pastoreio.

A estimativa dos efeitos do uso e cobertura da terra a partir da intensidade das chuvas e da condutividade hidráulica do solo sobre a contribuição ao escoamento de base e superficial, por Germer *et al.* (2010), ocorreu através de comparativo entre duas bacias hidrográficas: uma florestada (Floresta Ombrófila Aberta) e outra convertida em pastagem (com vegetação predominante de *Brachiaria humidicola*) para um período de 25 anos. Ambas estavam situadas na fazenda Rancho Grande/RO e em condições ambientais similares. Na pastagem houve um aumento 17 vezes maior do volume de chuvas, acompanhada da duplicação da frequência do escoamento superficial e do fluxo subsuperficial. Por sua vez, a geração do fluxo subsuperficial estava limitado espacialmente e foi somente observado na proximidade dos canais fluviais. Ainda na floresta foi observado o fluxo de retorno rápido, por macroporos, enquanto que na pastagem o fluxo de retorno do lençol freático foi mais lento. Os autores apontam que a conversão de floresta para pastagem altera substancialmente os mecanismos de geração de chuva e aumentam o volume do escoamento em superfície.

2.4.4. Áreas urbanizadas

As construções e a pavimentação das áreas urbanas são os principais coberturas que provocam o aumento do escoamento superficial e a diminuição na recarga da água subterrânea (TEIXEIRA *et al.*, 2009). A principal interferência da ocupação urbana compreende o desflorestamento, a impermeabilização do solo e a implantação de obras hidráulicas que modificam a morfologia fluvial, assim como alterações do clima em pequena escala, que introduzem mudanças significativas no balanço hídrico. Tais mudanças são verificadas pelo aumento dos picos de vazão, que têm como consequência a redução das vazões mínimas ao longo do tempo e as inundações (TUCCI, 2009). Os estudos realizados por Tucci (2000), Maziero & Wendland (2008), Suriya & Mudgal (2012), Miller *et al.* (2014) e Hoffmann (2014) revelam a resposta hidrológica de bacias hidrográficas frente ao quadro de urbanização.

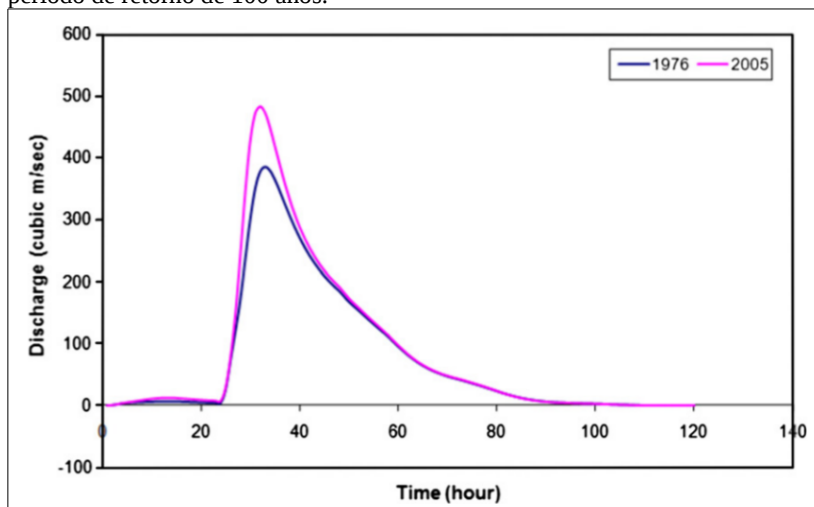
De acordo com os resultados obtidos por Tucci (2000), a cada 10% de aumento de uma área impermeável há cerca de 100% de aumento no volume de escoamento superficial e no coeficiente de cheia. Em um arruamento, o valor torna-se ainda mais elevado, com volume e coeficiente de escoamento em 260%. Já a cada 13% de ocupação de área impermeável de ocupação em um lote, há o aumento de 115% do coeficiente de escoamento.

No caso da área de afloramento de um aquífero, os dados de avaliação quantitativa de Maziero e Wendland (2008) mostram que a recarga subterrânea média sob a área intensamente urbanizada do município de São Carlos/SP é de apenas 16,5% da precipitação total de 1596,5 mm para o período analisado.

Suriya & Mudgal (2012) pesquisaram sobre os impactos da urbanização sobre o escoamento superficial na sub-bacia Thirusoolam, uma das unidades hidrográficas da região metropolitana de Chennai/Índia, entre os anos de 1976 e 2005. As mudanças do uso e cobertura da terra foram refletidos diretamente no comportamento do escoamento, de modo que a área construída aumentou seu tamanho de 70,3 km² para 107,64 km²; a área de inundação de 31,7 km² para 36,61

km² e a altura dos eventos de cheias passou de 3,71m para 4,55m. O aumento do escoamento superficial médio pode ser verificado pelo hidrograma da Figura 12. Os resultados demonstraram que a ampliação de áreas impermeabilizadas altera o ciclo hidrológico e o comportamento de inundações, além de gerar riscos de vida.

Figura 12. Hidrograma de antes da urbanização (1976) e depois (2005) para um período de retorno de 100 anos.

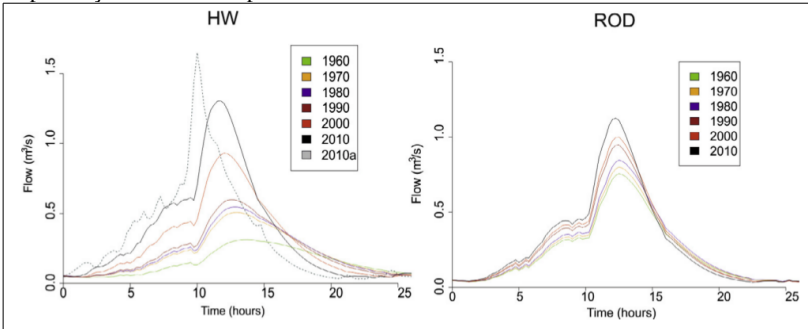


Fonte: Suriya & Mudgal (2012, p. 216).

O trabalho desenvolvido por Miller *et al.* (2014) avaliou o escoamento superficial de uma bacia periurbana na cidade de Swindon/Reino Unido. Os dados revelaram que o aumento da área urbana passou de 11%, na década de 1960, para 44% em 2010, o que reduziu o tempo de duração das inundações em 50% (de 7,75 horas para 3,75 horas) e aumento o seu pico em 400%, de 0,31 m³s⁻¹ para 1,65 m³s⁻¹, após a implantação de um sistema de drenagem pluvial nos anos 2000 (Figura 13). O estudo apontou que o tempo de resposta de uma bacia hidrográfica é maior sob a condição de um desenvolvimento urbano menor, sendo que a rede de drenagem é um elemento que aumenta

significativamente o escoamento.

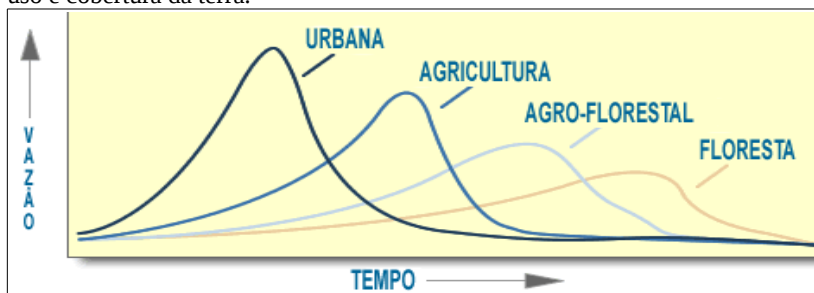
Figura 13. Comportamento de hidrogramas por década a partir de modelagem no Haydon Wick (HW) e Rodbourne (ROD), sendo 2010a considerado a implantação do sistema pluvial e 2010 como sem ele.



Fonte: Miller *et al.* (2014, p. 69).

Assim, a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica frente ao cenário de urbanização está representada pelas curvas do hidrograma hipotético da Figura 14. Nota-se que, sob a mesma precipitação, as coberturas com floresta e agrofloresta se comportam com menores picos de vazão, curvas suavizadas e tempo maior de retardo, sendo explicado pelo fato de promoverem a evapotranspiração e a infiltração das águas no solo. Entretanto, na medida em que a vegetação florestal é convertida para outros usos da terra, como agricultura, pastagem e urbanização, há associada a impermeabilização e a compactação do solo, impedindo a água de retornar para a atmosfera via evapotranspiração ou de fazer a sua percolação subsuperficial e subterrânea.

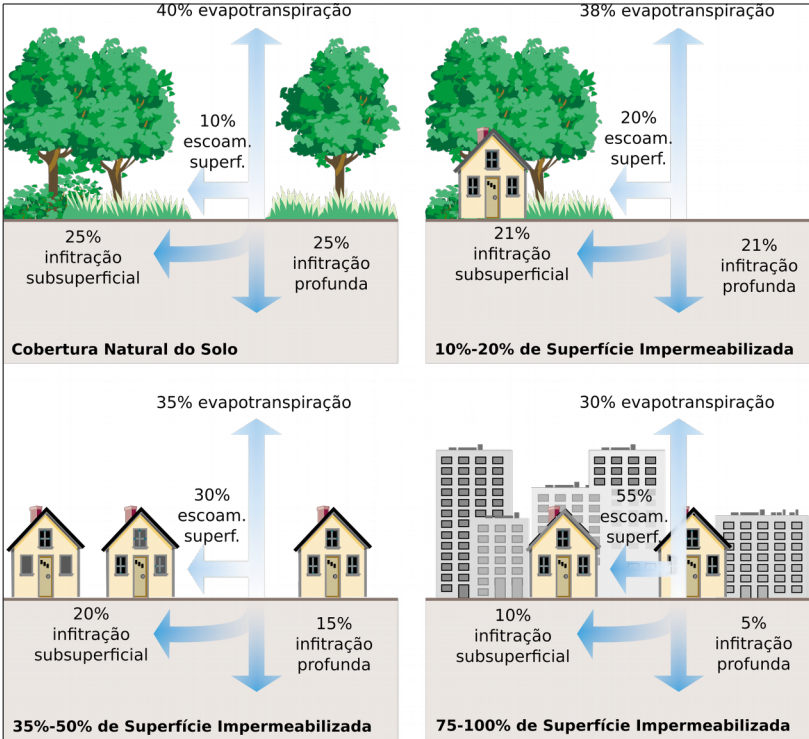
Figura 14. Hidrograma hipotético das vazões máximas nos diferentes tipos de uso e cobertura da terra.



Fonte: Couto (2014).

Como consequência da substituição de florestas por estes últimos tipos de cobertura da terra ao escoamento superficial, de acordo com Tucci (2002), os picos de vazão tornam-se maiores, as curvas são mais acentuadas e o tempo de concentração de águas nos cursos fluviais é curto, o que provoca enchentes ou inundações mais rápidas, ultrapassando o limite da planície de inundação, e ocasiona a redução do escoamento mínimo nos períodos secos (Figura 15). Dessa forma, durante a maior parte do tempo, ocorre a menor retenção de água na bacia hidrográfica, o que pode gerar ou potencializar conflitos de uso dependendo dos tipos de atividades socioeconômicas presentes nela.

Figura 15. Respostas hidrológicas à transformação de um ambiente rural para urbano.



Fonte: Adaptado de FISRWG (1998) *apud* Hoffmann & Nanni (2016, p. 92).

Uma dessas situações é apresentada na pesquisa de Hoffmann (2014), em que houve a identificação dos condicionantes que promovem modificações no volume das águas na bacia hidrográfica do rio Biguaçu/SC a partir da análise do uso e cobertura da terra, em um comparativo entre os anos de 1982 e 2014, e da estimativa do escoamento superficial. Os resultados demonstraram que a ampliação das áreas urbanizadas e de solo exposto associada à criação de canais fluviais retinizados e à restrição da área florestal apenas no médio e alto curso provocou a concentração do escoamento superficial no tempo,

levando ao aumento do pico de cheia e redução do nível mínimo das águas durante os períodos secos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo proposto adotou a abordagem metodológica do tipo quantitativa-exploratória, com levantamento bibliográfico e o uso de dados a serem quantificados para a representação da realidade (GIL, 2002) através de um estudo de caso em seção da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas/SC, em área de descarga do SAIG/SG. A área de estudo apresenta como exutório a estação hidrometeorológica Vila Canoas, situada entre os municípios de Rio Rufino e Bocaina do Sul.

Para alcançar os objetivos, a pesquisa exigiu que se realizassem atividades em gabinete e em campo. O primeiro passo na etapa de gabinete foi a pesquisa bibliográfica acerca da temática de estudo, de maneira que houve o aprofundamento do aporte teórico no decorrer do desenvolvimento do trabalho, o que norteou a investigação científica. Da mesma forma, houve o resgate de informações auxiliares para a caracterização do ambiente natural e histórico-social que contribuíssem para uma visão sistêmica da região.

O segundo passo na etapa de gabinete foi relativo ao mapeamento multitemporal do uso e cobertura da terra dos anos de 1957, 1976, 1997 e 2017, utilizando como método de aquisição de dados o sensoriamento remoto (Quadro 4). O período de aproximadamente 20 anos de diferença entre cada ano de mapeamento foi utilizado para demonstrar com maior detalhamento a evolução do uso da terra desde o início do funcionamento da estação hidrometeorológica Vila Canoas/SC, em 1957, de modo a responder a pergunta desta pesquisa. Assim, foram empregados como ferramentas *softwares* livres e dados de domínio público. A classificação foi realizada com o sistema de informações geográficas QGIS 2.18 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2016), sendo utilizadas aerofotografias da Secretaria de Planejamento do Estado de Santa Catarina e imagens orbitais do satélite Landsat obtidas através do portal do *United States Geological Survey* (USGS, 2017). Após o processamento digital matricial foram extraídas informações referentes à ação antropogênica para a caracterização da dinâmica físico-temporal, na forma de área e porcentagem, em quatro categorias para estimativa da

contribuição de cada uso da terra ao escoamento, a saber: florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos.

Quadro 4. Imagens utilizadas para o mapeamento da evolução do uso e cobertura da terra na área de estudo.

Ano de cobertura	Tipo de registro	Resolução espacial (metros)	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 própria.

Outro procedimento consistiu em estimar o comportamento da recarga e descarga de águas subterrâneas, com o *software* Groundwater Toolbox, a partir dos dados de vazão disponíveis do período de 1957 a 2017. Esses dados permitiram a identificação dos principais condicionantes antropogênicos que afetam o escoamento de águas na bacia hidrográfica quando confrontados com os dados de uso e cobertura da terra. Para confirmar os resultados encontrados, os dados foram confrontados com a estimativa das velocidades médias do escoamento, com base no uso e cobertura da terra do mapeamento multitemporal e na declividade obtida a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), da EPAGRI (2017), com resolução espacial de 30 metros.

Por fim, o estudo possibilitou discutir perspectivas de gestão integrada de águas para o SAIG/SG com vistas ao melhoramento da condição ambiental da interação aquífero-rio na região. O Quadro 5 mostra em síntese os materiais e métodos empregados, assim como os resultados alcançados em conformidade com os objetivos específicos do

trabalho.

Quadro 5. Relação de objetivos específicos da pesquisa, materiais e métodos, assim como resultados a serem alcançados.

Objetivo específico	Materiais e métodos	Resultados
<p>Identificar, através de mapeamento multitemporal (1957, 1976, 1997 e 2017) a evolução do uso e cobertura da terra.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Uso de aerofotografias do ano de 1957; - Uso de imagens de satélite dos anos de 1976, 1997 e 2017; - Aplicação das técnicas de fotointerpretação e de sensoriamento remoto no SIG QGIS; - Agrupamento das classes de uso e cobertura da terra do IBGE (2013) em categorias (florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos). 	<ul style="list-style-type: none"> - Mapas de uso e cobertura da terra dos anos de 1957, 1976, 1997 e 2017.
<p>Caracterizar a dinâmica físico-temporal da área de estudo para o período em análise.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Utilização do Modelo Digital de Elevação (MDE); - Aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no SIG QGIS; - Levantamento das condições históricas que expliquem as configurações espaciais de uso e cobertura da terra identificadas; - Definição dos padrões de uso da terra para cada ano em análise de acordo com as características do ambiente natural da área de estudo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo sombreado de terreno; -Mapa de nascentes; - Mapa de declividade; - Comportamento dos padrões físico-temporais de uso e cobertura da terra nos últimos 60 anos.

Quadro 5 (continuação). Relação de objetivos específicos da pesquisa, materiais e métodos e resultados a serem alcançados.

Objetivo específico	Materiais e métodos	Resultados
<p>Estimar o fluxo de base e a recarga subterrânea a partir de dados de vazão.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dados de vazão da ANA desde 1957; - Processamento de dados de vazão no <i>software</i> Groundwater Toolbox; - Definição do parâmetro índice de recessão (k) com método RECESS; - Definição do parâmetro coeficiente de recessão (a) com método RECESS e de Eckhardt (2008); - Definição do parâmetro índice máximo do escoamento de base ($BFImáx$) com método de Collischonn & Fan (2013); - Separação do escoamento do hidrograma com método de Eckhardt (2005); - Recarga subterrânea pelo método do deslocamento da curva de recessão com RORA; - Dados de precipitação anual da ANA desde 1957. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dados de contribuição do fluxo de base provenientes do aquífero para a identificação da recarga e descarga de águas subterrâneas na área de estudo;
<p>Estimar a velocidade média do escoamento superficial para as categorias de uso e cobertura da terra dos cenários de 1957, 1976, 1997 e 2017.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mapa de declividade; - Mapas de uso e cobertura da terra de 1957, 1976, 1997 e 2017; - Cruzamento de dados de declividade e da evolução do uso e cobertura da terra com método utilizado em Hoffmann (2014) e Hoffmann & Nanni (2017). 	<ul style="list-style-type: none"> - Dados de velocidade média do escoamento superficial para cada intervalo de declividade. - Mapa de 1957, 1976, 1997 e 2017 das velocidades médias do escoamento superficial.

Quadro 5 (continuação). Relação de objetivos específicos da pesquisa, materiais e métodos e resultados a serem alcançados.

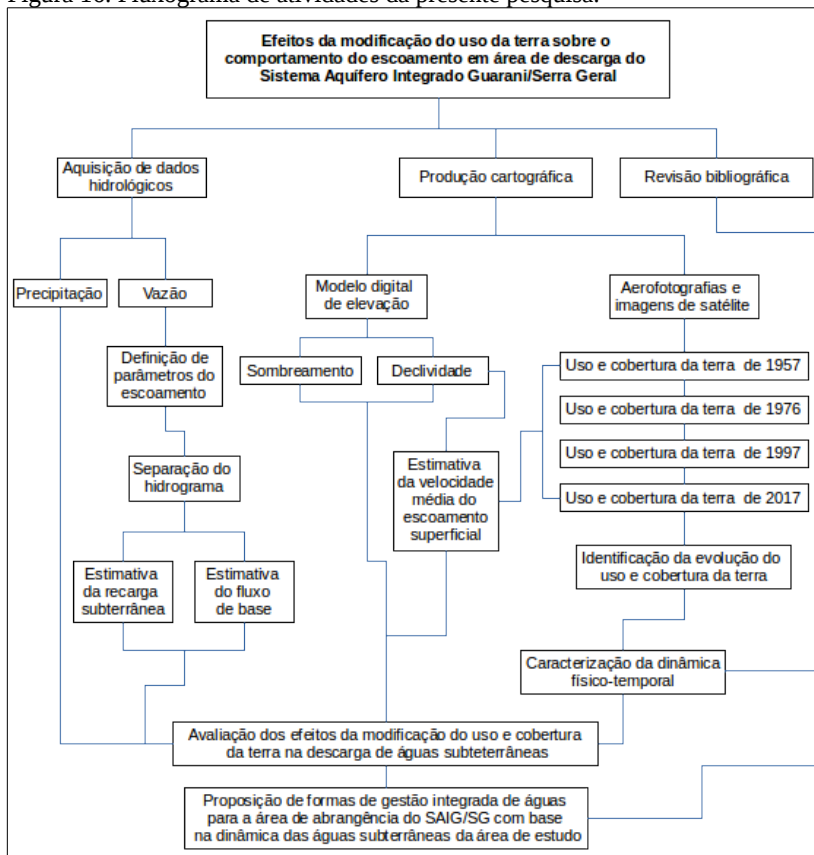
Objetivo específico	Materiais e métodos	Resultados
Avaliar a influência das modificações do uso e cobertura da terra no comportamento do escoamento das águas subterrâneas.	<ul style="list-style-type: none"> - Dados da estimativa da recarga/descarga de águas subterrâneas, precipitação anual e velocidade média do escoamento superficial; - Análise dos fatores e atividades humanas, de acordo com categorias de uso e cobertura da terra, que promovem a alteração da dinâmica hidrológica das águas subterrâneas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comparativo dos dados de descarga subterrânea com os dados de recarga, precipitação anual e velocidade média do escoamento superficial. - Discussão dos condicionantes antropogênicos que impactam o escoamento de águas na área de estudo para cada período (1957-1976, 1976-1997 e 1997-2017).
Propor formas de gestão integrada de águas para a área de abrangência do SAIG/SG com base na dinâmica das águas subterrâneas da área de estudo.	<ul style="list-style-type: none"> - Levantamento bibliográfico considerando aspectos de gestão descentralizada de águas e planejamento territorial; - Reflexão acerca do uso e cobertura da terra como mecanismo da gestão integrada de águas subterrâneas e superficiais na região do SAIG/SG em Santa Catarina. 	<ul style="list-style-type: none"> - Discussão de perspectivas na mudança de uso e cobertura da terra que possibilitem o reestabelecimento, no contexto do equilíbrio dinâmico ambiental, da recarga/descarga de águas para a região do SAIG/SG em Santa Catarina.

Fonte: Modelo de quadro adaptado de Raitz (2012, p. 58-59).

O fluxograma de todas as atividades da pesquisa encontra-se na Figura 16. O detalhamento das atividades relativas aos materiais e

métodos empregados é apresentado no tópicos a seguir.

Figura 16. Fluxograma de atividades da presente pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

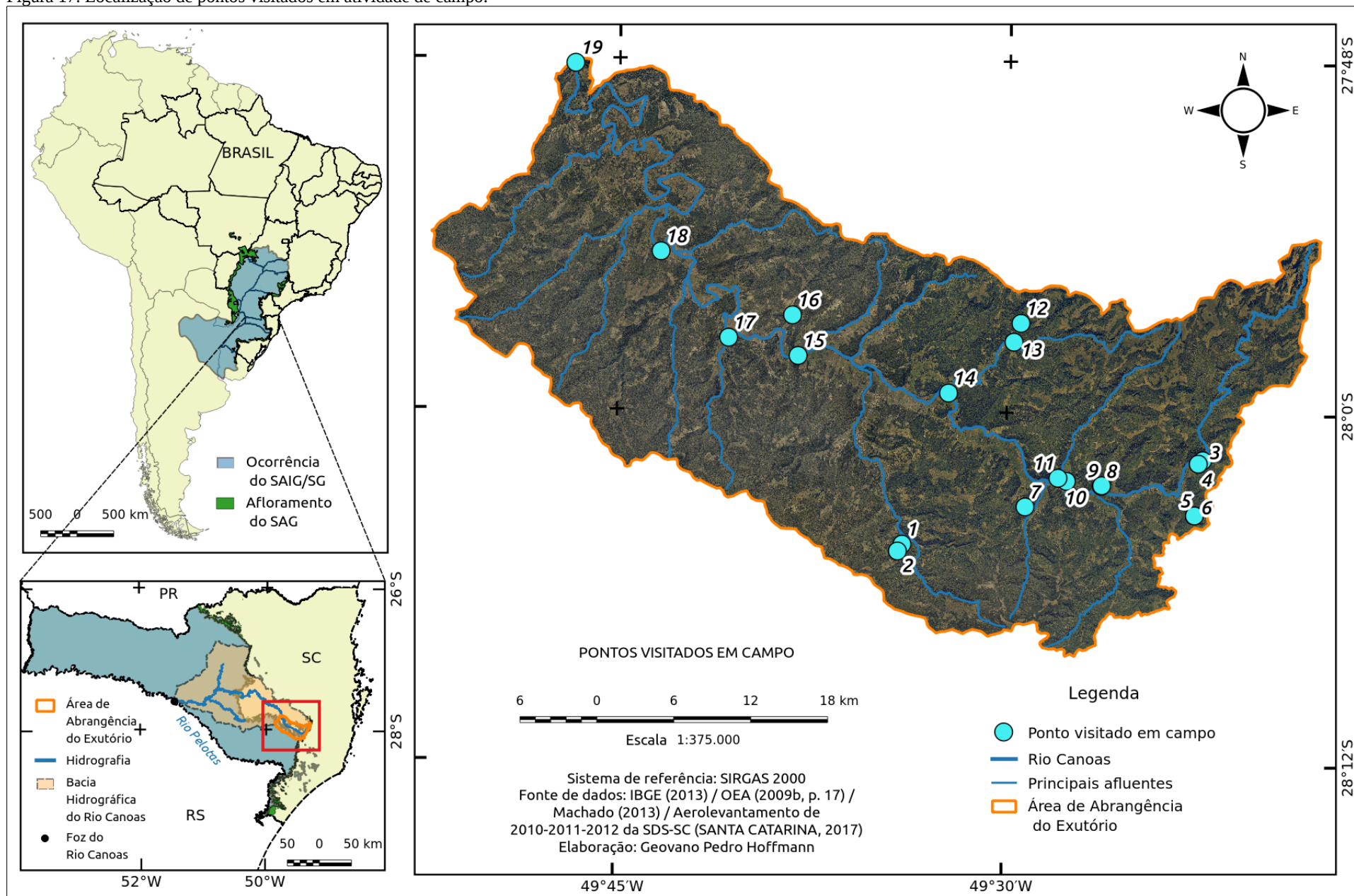
3.1. PESQUISA DE CAMPO

O trabalho de campo ocorreu entre os dias 08, 09 e 10 de março de 2016, na seção de estudo da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio

Canoas/SC, nos municípios de Rio Rufino, Urubici e pequena parte do município de Bom Retiro. Para a realização desta atividade foi utilizado como *hardware* um tablet modelo Samsung Galaxy Tab 2 10.1, contendo o sistema operacional Android 4.3.1, fornecido pelo LAAM/UFSC. Para a tarefa houve o emprego do QGIS Brighton versão 2.6.0 para a visualização e orientação geográfica na área de estudo. Para a execução, o projeto foi criado externamente no ambiente QGIS *Desktop* com as camadas: área da bacia hidrográfica, limites municipais e imagem do *Google Sattelite Layer*, do complemento *Openlayers*, na escala de 1:10.000.

Nessa fase da pesquisa ocorreu a identificação da área de abrangência da estação hidrometeorológica *in loco*, onde foram fotografados e discutidos com a equipe do LAAM/UFSC os diferentes usos da terra que promovem modificações na quantidade das águas. Também foi discutida, ao longo do trajeto, a dinâmica de águas em conformidade com as unidades hidrogeológicas e de uso e cobertura da terra da região. O percurso partiu das elevações que formam os divisores de águas da porção alta da bacia hidrográfica até a estação hidrometeorológica Vila Canoas, sendo registrados 19 pontos por quase toda a área de pesquisa (Figura 17).

Figura 17. Localização de pontos visitados em atividade de campo.



Fonte: Elaboração própria.

3.2. USO E COBERTURA DA TERRA

A representação do uso e cobertura da terra é importante para a identificação e análise dos padrões de organização espacial, a fim de permitir realizar a relação com informações da dinâmica hidrológica subterrânea nesta pesquisa. As tendências de modificação de uso e cobertura da terra podem ser determinadas quando há atualização dos seus registros, dado que o uso da terra dificilmente permanece inalterado (LOCH, 2008).

3.2.1. Fotointerpretação

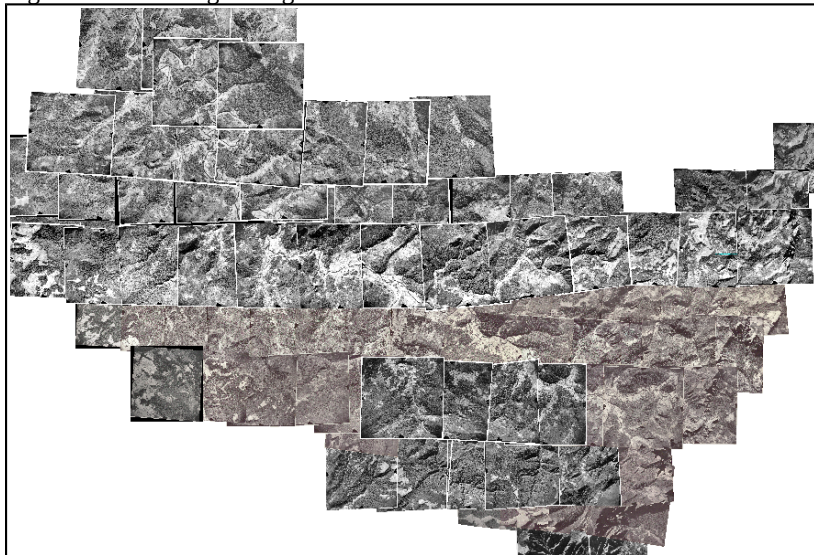
A fotointerpretação é caracterizada como a técnica utilizada para a representação cartográfica e que tem como fonte de dados fotografias aéreas (NOGUEIRA, 2009). A fotointerpretação da evolução do uso e cobertura da terra para a área de estudo na presente pesquisa compreendeu aerofotografias analógicas digitalizadas e não georreferenciadas dos anos de 1957, cedidas pela Secretaria de Planejamento do Estado de Santa Catarina. A cobertura aerofotogramétrica do ano de 1957 foi executada pela Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A., por ordem do Governo do Estado de Santa Catarina. As aerofotografias foram registradas com a câmera Cell 53, de distância focal de 15 mm e em filme pancromático. A escala média é de 1:25.000 e reúne para a região de estudo o fotoíndice das folhas 38, 39, 44 e 45 num total de 205 imagens.

O georreferenciamento das aerofotografias tomou como referência para obtenção de coordenadas o aerolevanteamento do triênio 2010-2011-2012, fornecido pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS) do Estado de Santa Catarina. A cobertura aerofotogramétrica foi executada pelo consórcio Engemap/Hipparkhos, através de sistema aerofotogramétrico, em imagens digitais e coloridas com resolução espacial de 39 centímetros. O material se refere às articulações SG-22-Z-C-VI-3, SG-22-Z-C-VI-4, SG-22-Z-D-IV-3, SH-22-X-A-III-1, SH-22-X-A-III-2 e SH-22-X-B-I-1 (SANTA CATARINA, 2017).

A grande quantidade de dados, no formato TIFF, exigiu que as aerofotografias do triênio 2010-2011-2012 fossem convertidas em camada *raster* virtual (formato OVR). Através da opção de construção de pirâmides do *Geospatial Data Abstraction Library* (GDAL) no QGIS, pelo comando Raster/Miscelânea/Construir visão geral (pirâmides), houve a criação de camada de menor tamanho no disco rígido para visualização e manuseio das articulações, o que agilizou o processo de identificação e correlação de pontos de controle a partir destas imagens.

Para o georreferenciamento das imagens de 1957 (Figura 18) foram descartadas as aerofotos que fazem o recobrimento longitudinal, ou seja, de superposição em 60% entre fotografias aéreas, uma vez que não houve a necessidade de estereoscopia e se otimizou o processo para o tempo da pesquisa. Assim, nas 98 aerofotografias georreferenciadas foram definidos seis pontos de controle, em escala de 1:3.000. O processo foi realizado no QGIS 2.18 através do comando Raster/Georreferenciador/Georreferenciar, gerando como resultado imagens no formato GEOTIFF.

Figura 18. Aerofotografias georreferenciadas do ano de 1957 da área de estudo.



Fonte: Secretaria de Planejamento do Estado de Santa Catarina.

O processo de ortorretificação, para corrigir deformações decorrentes do processo de georreferenciamento de todas as cenas trabalhadas, não foi realizado, tendo em vista a escala de mapeamento adotada neste trabalho, de 1:50.000, que seguiu a orientação proposta pelo Manual Técnico de Uso da Terra do IBGE (2013), sendo uma escala do tipo intermediária, entre um nível regional e outro de maior detalhamento, o que é recomendável no estudo de bacias hidrográficas de porte como o da pesquisa. Nogueira (2009) também ressalta que para escalas como esta, a generalização cartográfica de feições a serem vetorizadas torna-se necessária. Desta forma, a vetorização do uso e cobertura da terra sobre as aerofotografias de 1957 apresenta as áreas de seus polígonos proporcionalmente presentes. Uma vez que a análise numérica final prevê a proporção relativa em área de cada uso da terra, a generalização pôde ser adotada sem maiores comprometimentos de acurácia dos resultados.

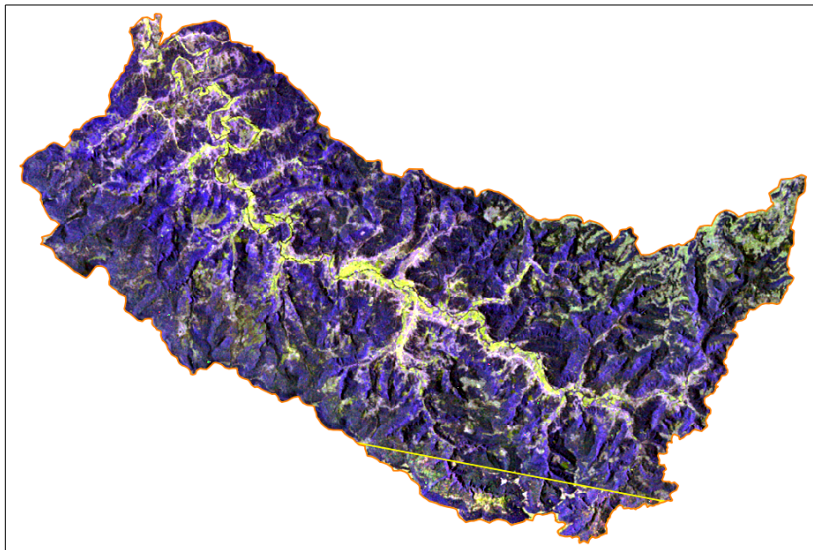
Dessa maneira, a vetorização das classes de uso e cobertura do IBGE (2013) foi realizada manualmente, na escala de 1:50.000, através de fotointerpretação, sendo identificadas as classes florestal, pastagem, campestre, cultura temporária, cultura permanente, área urbanizada e corpo d'água continental. Após a vetorização, ocorreu a validação topológica para a correção de erros geométricos, como nós duplicados, sobreposição de feições, geometrias inválidas, dentre outros.

3.2.2. Processamento digital de imagens de satélite

As imagens dos anos de 1976, 1997 e 2017 foram selecionadas no portal do USGS usando como critério a qualidade radiométrica e visual. A classificação de todas foi do tipo supervisionada e realizada com o complemento *Semi-Automatic Classification* do QGIS 2.18.

Para cobrir a área de estudo para o ano de 1976 foram necessárias duas imagens orbitais (Figura 19), provenientes da plataforma Landsat 2, sensor *Multispectral Scanner System* (MSS), sendo uma delas do ponto 79 e outra do ponto 80, da órbita 236, ambas com data de 09 de novembro de 1976. O lançamento do satélite ocorreu em 1975 e os seus produtos apresentam resolução espacial de 60 metros para as bandas 4, 5, 6 e 7 (USGS, 2017).

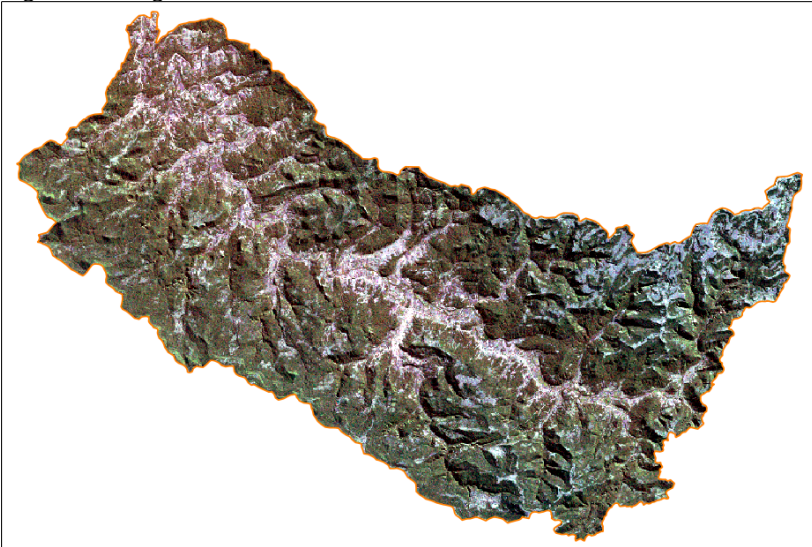
Figura 19. Imagens orbitais do ano de 1976 da área de estudo separadas por linha destacada em amarelo.



Fonte: USGS (2017).

A imagem de satélite do ano de 1997 (Figura 20) é oriunda do Landsat 5, ponto 79, órbita 220, de 23 de maio de 1997. O satélite foi lançado em 1984 e operou com o sensor *Thematic Mapper* (TM), sendo a resolução espacial de 30 metros para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 utilizadas (INPE, 2017).

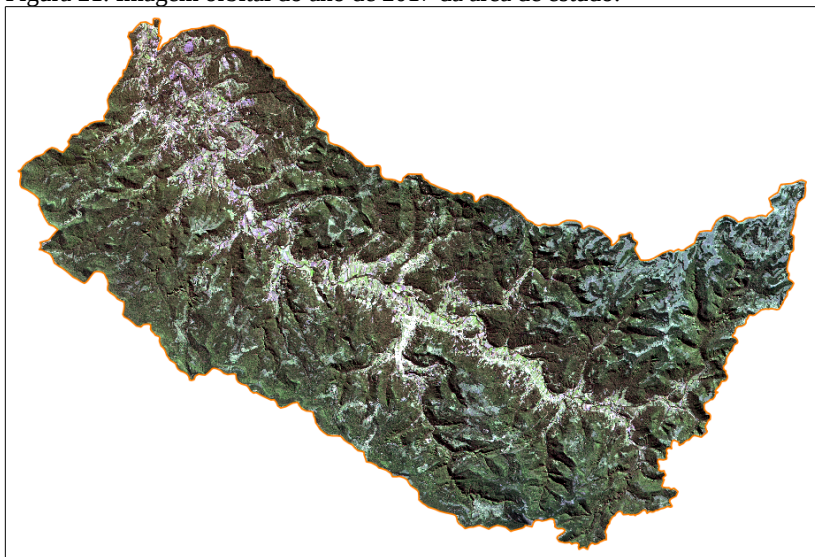
Figura 20. Imagem orbital do ano de 1997 da área de estudo.



Fonte: USGS (2017).

A imagem do ano de 2017 (Figura 21) foi registrada no ponto 79, da órbita 220, com o sensor *Operational Land Imager* (OLI), da plataforma Landsat 8 e com data de aquisição em 28 de abril de 2017. O satélite foi lançado no ano de 2013 e disponibiliza bandas multiespectrais, das quais foram utilizadas as bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7, com resolução espacial de 30 metros, e a banda 8, ou pancromática, de 15 metros (INPE, 2017).

Figura 21. Imagem orbital do ano de 2017 da área de estudo.



Fonte: USGS (2017).

O pré-processamento das quatro imagens, de formato TIFF, envolveu as seguintes etapas de tratamento no complemento *Semi-Automatic Classification* do QGIS: a) reprojeção das bandas com a transformação do sistema de referência de coordenadas para o *datum* horizontal SIRGAS 2000 e projeção UTM/Zona 22 Sul; b) correção atmosférica a partir da conversão automática da radiância para reflectância com base no arquivo de metadados de cada cena orbital; c) apenas para o ano de 2017 houve a fusão da banda pancromática com as bandas multiespectrais, o que resultou na melhoria da qualidade da resolução espacial de todas as suas bandas de 30 metros para 15 metros; d) recorte espacial das bandas das quatro cenas orbitais com a camada, em formato SHP, da região de estudo; e) empilhamento de bandas, de modo a gerar uma imagem colorida RGB única de cada cena de satélite com as bandas anteriormente mencionadas e possibilitar a visualização de diferentes combinações de composição espectral.

Durante a classificação, foram selecionadas áreas de amostragem, na escala de trabalho de 1:15.000, de cada classe de uso e cobertura da terra do IBGE (2013) presente na área de pesquisa: área urbanizada, cultura temporária, cultura permanente, pastagem, silvicultura, florestal, campestre e corpo d'água continental.

Ao mesmo tempo, cada classe de uso e cobertura da terra é melhor identificada em uma imagem orbital de acordo com o realce da composição colorida RGB escolhida. Assim, para diferenciar o conjunto de *pixels* mais representativo durante a seleção de amostras para os respectivos anos de classificação, especialmente aqueles que visualmente pudessem ser semelhantes e confundidos entre categorias de uso e cobertura da terra com apenas uma determinada composição, foram utilizadas as combinações de bandas 4-3-2 (cor natural), 6-5-4 (falsa-cor) e 5-4-3 (falsa-cor).

As imagens de satélite do ano de 1976, em função da dificuldade com a sua resolução espacial, de 60 metros, em identificar as categorias de uso e cobertura da terra tiveram como fonte de dados auxiliares aerofotografias do triênio 1977-1978-1979. O aerolevanteamento foi executado pela empresa Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A., através do Governo do Estado de Santa Catarina em convênio com o Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Eletrosul Centrais Elétricas, Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e Nuclebrás. O registro ocorreu em filme pancromático, com câmera Zeiss RMK-15/23, distância focal nominal de 153 mm e em escala média de 1:25.000. No presente estudo não foram utilizadas as 298 aerofotos que cobrem a região para a fotointerpretação, considerando-se o tempo exigido para a pesquisa em nível de mestrado e o tempo para georreferenciá-las. Com os fotoíndices 38, 39, 44 e 45 georreferenciados, a área evidenciada pelo realce nas duas imagens de satélite de 1976 foi localizada em cada fotoíndice e verificada a aerofotografia não georreferenciada correspondente ao local de cada área de amostragem, tornando possível atribuir com maior confiabilidade um conjunto de *pixels* escolhido a sua respectiva classe de uso e cobertura da terra. Para o referido ano foram identificadas seis

categorias: área urbanizada, cultura temporária, pastagem, silvicultura, florestal e campestre. Apesar de existente em poucas e pequenas propriedades, não foi localizada a classe cultura permanente junto às imagens de satélite de 1976, dada a grande dimensão da resolução espacial.

Uma limitação encontrada para a classificação do IBGE (2013) das imagens do ano de 1976 e 1997 é a confusão entre as classes campestre e pastagem pela existência de dois ambientes diferenciados na área de estudo: o campo nativo e a pastagem com gramíneas plantadas. O mesmo ocorre com a identificação de alguns pixels nas áreas de campo nativo atribuídos à agricultura, que pode ser explicado pela exposição do solo em períodos sazonais.

Por sua vez, a imagem orbital de 1997, tomou como inferência para a seleção de amostras o realce diferenciado de composições RGB e, pela pouca mudança de uso e cobertura da terra verificada em nível de bacia hidrográfica, o mapeamento do ano de 2017. No que diz respeito a este último ano, houve como auxílio imagens recentes do sistema RapidEye, de 6,5 metros de resolução espacial, incorporadas ao QGIS como *Web Map Service* (WMS), com o complemento *DSG Tools*, além da aplicação do reconhecimento adquirido durante atividade de campo ocorrida na área de estudo. Em ambos os anos de classificação, foram identificadas oito classes de uso e cobertura da terra: área urbanizada, cultura temporária, cultura permanente, pastagem, silvicultura, florestal, campestre e corpo d'água continental.

Durante a finalização do processamento das imagens, foi realizada a classificação com os algoritmos que melhor representavam a situação real do uso e cobertura da terra em cada ano, dentre eles, o *Spectral Angle Map* (SAM) que melhor se adequou aos anos de 1976 e 1997, e o de Máxima Verossimilhança (MaxVer) para o ano de 2017, cujos resultados de ambos são considerados satisfatórios em termos de acurácia para estudos de uso e cobertura da terra (MENESES & SANO, 2013; NERY *et al.*, 2013; RODRIGUES *et al.*, 2014), aplicados em pequenas áreas de cada cena orbital, de modo a verificar a consistência do produto final. Para os erros encontrados, foram excluídas ou

definidas novas áreas de amostragem até que a classificação fosse condizente com a resposta espectral de cada imagem.

Ao final, ocorreu a classificação de toda a imagem e a criação de um arquivo *raster*, no formato TIF, e vetorial, no formato SHP, para cada ano mapeado, bem como foram geradas as áreas, em metros quadrados, e as porcentagens de cada classe de uso e cobertura da terra para a região de estudo.

3.2.3. Quantificação do uso e cobertura da terra

Em uma planilha do LibreOffice Calc, foi contabilizada a área das classes de uso e cobertura da terra para o período em análise (1957-2017). Os valores das classificações com processamento digital exigiram a conversão dos dados de metros quadrados para quilômetros quadrados e, por conta da resolução espacial das imagens e do seu recorte pela camada vetorial envoltória para a região de pesquisa, o somatório das áreas em cada ano foi de 1013,1 km², ou seja, menor que o tamanho da área de estudo, de 1021,1 km². Dessa maneira, o valor de área de cada classe de uso e cobertura da terra teve o seu valor compensado proporcionalmente pela diferença com a área total, resultando em 1021,1 km².

As classes de uso e cobertura da terra do IBGE (2013) foram agrupadas, para fins de estudo do comportamento do escoamento subterrâneo e superficial desta pesquisa, em categorias de uso e cobertura da terra (florestas, pastagens, áreas cultivadas e pavimentos) de Porto *et al.* (2000) (Quadro 6). O agrupamento tomou como critérios a similaridade físico-natural quanto à infiltração, em conformidade com o tipo de superfície, os quais podem influenciar a recarga subterrânea, e o porte da vegetação das classes de uso e cobertura da terra.

Quadro 6. Classes de uso e cobertura da terra do IBGE (2013, p. 149) agrupadas nas categorias florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos de Porto *et al.* (2000, p. 819).

Ano do uso e cobertura da terra	Classes de uso e cobertura da terra do (IBGE, 2013, p. 149)	Categorias de uso e cobertura da terra (PORTO <i>et al.</i>, 2000, p. 819)
1957	Florestal	Florestas
	Pastagem e campestre	Pastos
	Cultura temporária e cultura permanente	Áreas cultivadas
	Área urbanizada	Pavimentos
1976	Florestal e silvicultura	Florestas
	Pastagem e campestre	Pastos
	Cultura temporária	Áreas cultivadas
	Área urbanizada	Pavimentos
1997	Florestal e silvicultura	Florestas
	Pastagem e campestre	Pastos
	Cultura temporária e cultura permanente	Áreas cultivadas
	Área urbanizada	Pavimentos
2017	Florestal e silvicultura	Florestas
	Pastagem e campestre	Pastos
	Cultura temporária e cultura permanente	Áreas cultivadas
	Área urbanizada	Pavimentos

Fonte: Elaboração própria.

Na quantificação não foi realizada a inclusão da classe corpo d'água continental do IBGE (2013), uma vez que não se enquadra em nenhuma das categorias de uso e cobertura da terra de Porto *et al.* (2000) que foram usadas no decorrer da pesquisa. Dessa forma, o valor de sua área foi compensado igualmente entre as categorias de uso e cobertura da terra.

No caso particular do ano de 1976, foi observado que a categoria pavimentos teve o seu tamanho superestimado para 0,7% da área total, enquanto que o ano de 1997 registrou 0,5% da área total, de modo que o levantamento de dados da população urbana na área de estudo, verificados em IBGE (1968) e IBGE (1982), indicavam crescimento urbano contínuo. O principal fator que explica esse problema pode ser atribuído à resolução espacial de 60 metros frente a uma infraestrutura urbana pouco significativa em extensão. Nessa perspectiva, a solução encontrada foi calcular a média da categoria pavimentos dos anos de 1957 e 1997, de 0,3% e subtraí-la do valor encontrado, de 0,7%, cuja diferença foi distribuída igualmente entre as outras três categorias (pastos, áreas cultivadas e pavimentos).

3.2.4. Mudanças populacionais

Os dados de população para a área em questão da bacia hidrográfica do Rio Canoas considerou os recenseamentos do IBGE mais próximos dos anos de mapeamento de uso e cobertura da terra, ou seja, com intervalos em torno de 20 anos. Os levantamentos incluíram os censos de 1960, 1980, 2000 e 2010 para os atuais municípios de Rio Rufino e Urubici. Os dados do município de Bom Retiro não foram contabilizados em função de sua área reduzida e pouco habitada na região de pesquisa.

Os dados do recenseamento de 1960 foram atribuídos ao ano de 1957 do mapeamento de uso e cobertura da terra da área de estudo e se baseou nos dados da tabela “População urbana e rural por sexo segundo as zonas fisiográficas os municípios e os distritos” (IBGE, 1968, p. 83). Até então, Urubici havia sido elevado à categoria de município, em 1957, e possuía três distritos: Urubici, Águas Brancas e Rio Rufino (IBGE, 2017a). Para fins da presente pesquisa, a população urbana e rural dos distritos de Urubici e Águas Brancas foram agrupadas para o município de Urubici e separado o distrito de Rio Rufino, para que pudesse haver a análise evolução dos dados frente a configuração administrativa municipal atual.

Por sua vez, o recenseamento de 1980 foi relacionado ao ano de

1976 do mapeamento de uso e cobertura da terra da área de estudo e se baseou nos dados da tabela “População residente, por situação do domicílio e sexo, segundo as mesorregiões, as microrregiões, os municípios e os distritos” (IBGE, 1982, p. 25). Permaneceram aqui agrupados os distritos de Urubici e Águas Brancas e separados a parte os dados do distrito de Rio Rufino.

Os dados do recenseamento do ano de 2000 e 2010 foram atribuídos, respectivamente, ao mapeamento do uso e cobertura da terra de 1997 e 2017, disponibilizados no portal do IBGE (IBGE, 2017b; IBGE, 2017c), não havendo mais a separação por distritos e o município de Rio Rufino passou a ser considerado município, dada a sua emancipação em 1991 (IBGE, 2017a).

Os gráficos gerados para este trabalho partiram dos dados obtidos dos recenseamentos e foram organizados em planilhas, do LibreOffice Calc, com as variáveis população urbana, rural e total.

3.3. SÉRIES HISTÓRICAS DIÁRIAS DE VAZÃO E PRECIPITAÇÃO

A Agência Nacional de Águas (ANA) utiliza a Rede Hidrometeorológica Nacional para o monitoramento dos rios brasileiros. A Rede opera com 4.543 estações pluviométricas e fluviométricas estrategicamente localizadas em 2.176 dos 12.963 rios cadastrados. Estas estações obtêm dados referentes à precipitação, evaporação da água, quantidade de sedimentos, qualidade da água, nível e vazão dos rios, sendo disponibilizadas para a sociedade em tempo real pelo Sistema de Informações Hidrológicas, através do portal *Hidroweb*, e no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). As estações de monitoramento da ANA são operadas por entidades contratadas e parceiras. A partir dos registros das estações, podem ser definidas políticas públicas; pesquisas; avaliação da disponibilidade hídrica para projetos de produção de energia, navegação, abastecimento público e lazer, ou ainda, sobre eventos considerados críticos, como cheias e estiagens; entre outros (ANA, 2016).

No que diz respeito à estação hidrometeorológica denominada de “Vila Canoas”, é de responsabilidade da ANA e é operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). A disponibilidade de dados de vazões, cotas, qualidade da água, resumo de descarga e perfil transversal são referentes ao monitoramento fluviométrico (código 71200000), enquanto que os dados de precipitação constam no monitoramento pluviométrico, sob o código 02749031. O monitoramento da precipitação apresentava, até o desenvolvimento da presente pesquisa de dissertação, dados do período de 14/06/1957 a 30/04/2017, enquanto que o monitoramento da vazão possuía dados de 01/06/1957 a 31/05/2017 (ANA, 2016). Consta no histórico da estação Vila Canoas a sua operação em modo analógico com observador desde o período inicial de instalação, em 01/06/1957 até 19/07/2013, quando a estação passou a ser monitorada de forma automatizada somente com equipamento telemétrico.

Os dados foram pré-processados no LibreOffice Calc e foram organizados em colunas por dia/vazão e dia/precipitação. Foi dada a preferência pelos dados já classificados como consistidos pela ANA no período de junho/1957 a dezembro/2005 em detrimento de dados brutos. O período subsequente, de dezembro/2005 a fevereiro/2017, apresenta exclusivamente dados brutos. Ao longo de toda a série histórica há a presença de descontinuidades temporais, o que exigiu o preenchimento para os intervalos sem dados, conforme descrito a seguir.

3.3.1. Reconstituição de falhas de registro da precipitação

Nas falhas da série histórica de dados de precipitação, houve o utilização do método de ponderação regional. Nesse método, as falhas em uma estação pluviométrica são preenchidas pela média ponderada de dados de ao menos três estações vizinhas, na mesma região climática, e que apresentem no mínimo 10 anos de registros de precipitação. Uma das limitações é a possibilidade da técnica não identificar corretamente a variabilidade da precipitação ou de se realizar a análise isoladamente considerando apenas cada valor (TUCCI, 2009; SILVA *et al.*, 2010). Mesmo não sendo recomendado para a estimativa de dados diários de precipitação, o método da ponderação regional foi utilizado na presente

pesquisa por ser simples e, assim como outros métodos, tal como a regressão linear, utilizar como fonte de dados as estações na vizinhança. Pela insuficiência de postos pluviométricos nas proximidades da área de estudo ou que registrassem dados correspondentes aos períodos de falhas da estação Vila Canoas, houve a necessidade de adaptação da técnica estatística, de modo que foi aplicada a Equação 1, conforme Oliveira *et al.* (2010, p. 1188), que atendesse de maneira específica cada intervalo de dados diários:

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{y=1}^n \frac{N_x}{N_y} P_y \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo que:

- P_x é o valor da precipitação anual da estação Vila Canoas a ser encontrado para o preenchimento do intervalo (em mm);
- n é o somatório de postos pluviométricos na vizinhança;
- N_x é o valor da média aritmética da série histórica de precipitação da estação Vila Canoas (em mm);
- N_y é o valor da média aritmética da série histórica de precipitação do posto pluviométrico vizinho, de ordem “i” para o ano da falha (em mm);
- P_y é o valor da precipitação do posto pluviométrico vizinho de ordem “y” para o ano de falha (em mm).

As estações Urubici e Rio Bonito foram selecionadas por apresentarem valores de precipitação para o período correspondente ao de falhas da estação Vila Canoas, estarem em proximidade com a mesma e possuírem características climáticas semelhantes. Com o diferencial em serem mais distantes em relação às demais, as estações Bom Jardim da Serra e São Joaquim tiveram os dados selecionados

apenas para os períodos em que nenhuma das outras estações na região de estudo pôde preencher a série histórica da estação Vila Canoas.

Quadro 7. Relação de estações pluviométricas utilizadas para o preenchimento de falhas mensais da série histórica de dados diários de precipitação da estação Vila Canoas/SC.

Estação de referência	Código da estação	Município da estação	Latitude	Longitude	Período de dados
Bom Jardim da Serra	02849009	Bom Jardim da Serra	-28,3397	-49,6214	1969-2017
Rio Bonito	02749035	Bocaina do Sul	-27,7464	-49,945	1959-2017
São Joaquim	02849003	São Joaquim	-28,2833	-49,9333	1942-1975
Urubici	02849021	Urubici	-28,0072	-49,5922	1943-1945; 1976-2017

Fonte: ANA (2017).

As médias aritméticas das séries históricas de cada posto pluviométrico foram calculadas sendo apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8. Média aritmética da série histórica de dados de cada estação pluviométrica utilizada na técnica da ponderação regional.

Estação pluviométrica	Média aritmética da série histórica de dados (mm)
Bom Jardim da Serra	4,234
Vila Canoas	4,241
Rio Bonito	4,346
São Joaquim	3,798
Urubici	4,213

Fonte: Elaboração própria.

Os períodos de preenchimento de dados e as suas respectivas estações de referência estão listados no Quadro 9. Em cada posto pluviométrico foi realizada a média aritmética de sua respectiva série histórica de dados e a identificação dos valores do período correlato de falhas na estação Vila Canoas, os quais foram processados através da Equação 1. Mesmo com as cinco estações disponíveis, houve intervalos em que nenhuma delas apresentou registros, como foi o caso do mês de setembro nos anos de 1991, 2007 e 2009.

Quadro 9. Relação do período de preenchimento de falhas, número de dias sem leitura e as respectivas estações pluviométricas utilizadas para o preenchimento de dados.

Período de falhas	Número de dias sem leitura	Estação de referência para o preenchimento
12/06/1957 – 13/06/1957	2	São Joaquim
01/12/1957 – 09/09/1958	283	São Joaquim
01/01/1973 – 31/01/1973	31	Rio Bonito
01/08/1991 – 31/08/1991	31	Urubici
01/09/1991 – 30/09/1991	30	Estações sem dados
18/09/98	1	Rio Bonito e Urubici
18/01/00	1	Rio Bonito e Urubici
25/08/03	1	Rio Bonito e Urubici
23/04/04	1	Rio Bonito e Urubici
04/05/04	1	Rio Bonito e Urubici
11/06/04	1	Rio Bonito e Urubici
28/06/04	1	Rio Bonito e Urubici
02/07/04	1	Rio Bonito e Urubici
04/07/04 – 06/07/04	3	Rio Bonito e Urubici
15/07/04	1	Rio Bonito e Urubici
31/07/04	1	Rio Bonito e Urubici
28/08/04	1	Rio Bonito e Urubici

27/11/04 – 30 /11/04	4	Rio Bonito e Urubici
01/03/2006 – 30/06/2006	30	Rio Bonito e Urubici
01/07/2006 – 31/08/2006	62	Bom Jardim da Serra
01/07/2007 – 31/08/2007	62	Urubici
01/09/2007 – 30/09/2007	30	Estações sem dados
01/10/2007 – 31/12/2007	92	Rio Bonito
01/09/2009 – 30/09/2009	30	Estações sem dados
01/11/2009 – 31/12/2009	61	Rio Bonito
01/12/2016 – 31/12/2016	31	Rio Bonito e Urubici

Fonte: Elaboração própria.

Os dados de precipitação anual, após o preenchimento de falhas, foram usados para confirmar o comportamento da recarga subterrânea no período da série de dados de vazão, a partir do qual foi estimada. O comparativo de comportamento foi realizado com o somatório da precipitação diária para cada ano e o valor médio da recarga subterrânea anual, descrito mais a frente.

3.3.2. Falhas de registro da vazão

Pelo fato da estimativa do escoamento subterrâneo poder ser realizada mesmo com a existência de falhas de registro de vazão, não houve a sua reconstituição. Métodos, como modelos chuva-vazão, isto é, equações que preenchem os dados de vazão a partir de dados de precipitação, utilizam variáveis que representam as condições do ambiente da bacia hidrográfica e são dependentes de parâmetros, tais como evapotranspiração, percolação de água subterrânea, coeficientes, dentre outros. Estes parâmetros variam no decorrer do tempo, o que tornaria inviável a calibração desses modelos para a área de estudo, em virtude da carência de dados dos mesmos para uma série histórica desde o ano de 1957. A regressão linear simples também é um método de preenchimento de falhas de vazão e gera resultados aproximados da realidade, porém, ainda assim pode gerar interferência nos resultados

por tomar como referência dados de outra estação. Além disso, comparada à outras estações fluviométricas do Estado de Santa Catarina, a Vila Canoas apresenta poucos intervalos com falhas, cerca de 505 dias sem leitura, sendo o maior no ano de 1958 (Quadro 10). Mesmo assim, a quantidade de dias com registro na série de dados de vazão é maior, havendo 21.379 dias com leitura. Optou-se também por analisar apenas os dados reais de vazão obtidos da série histórica da estação Vila Canoas.

Quadro 10. Relação dos períodos com falhas de vazão e respectivo número de dias sem leitura para a estação Vila Canoas/SC.

Período de falhas	Número de dias sem leitura
01/01/1958 – 28/02/1958	59
01/04/1958 – 31/08/1958	153
29/08/1971 – 05/09/1971	8
09/09/1971 – 27/09/1971	19
01/01/1976 – 07/01/1976	7
09/01/1976 – 10/01/1976	2
22/01/1976 – 18/02/1976	28
19/08/1977 – 20/08/1977	2
16/08/1991 – 31/10/1991	77
11/09/1994	1
05/10/1994	1
18/05/1995 – 07/06/1995	21
31/12/1997 – 01/02/1998	33
15/02/1998 – 16/02/1998	2
21/02/1998	1
23/02/1998 – 27/02/1998	5
03/03/1998 – 21/03/1998	19

Período de falhas	Número de dias sem leitura
01/10/2001 – 03/10/2001	3
25/02/2007	1
01/11/2007 – 31/12/2007	61
31/01/2011	1
22/07/2013	1

Fonte: Elaboração própria.

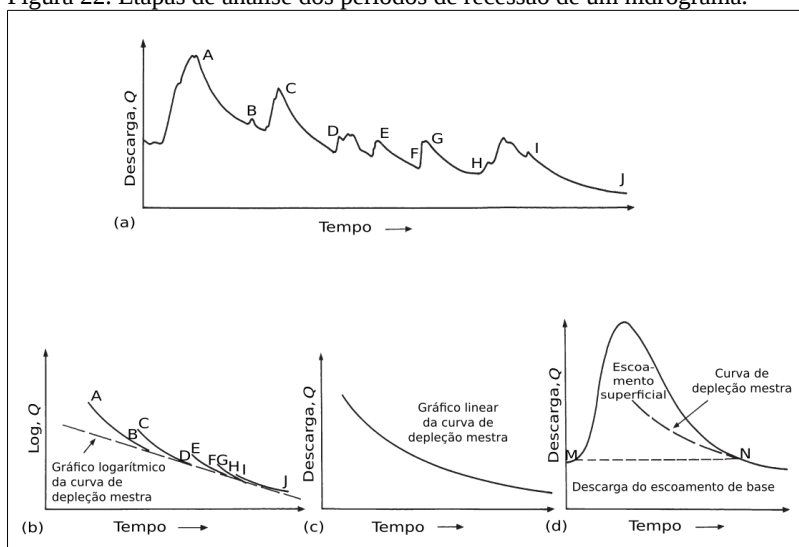
3.4. ESTIMATIVA DE RECARGA E DESCARGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A compreensão da dinâmica da descarga de águas subterrâneas em cursos fluviais utiliza como estratégia a análise do hidrograma (BRODIE & HOSTETLER, 2005). No caso da interação aquífero-rio para a área de estudo, o SAIG/SG supre os cursos d'água durante os períodos de recessão das chuvas. Assim, quantificar o escoamento de base é fundamental para saber se, em proporções, houve redução das vazões em decorrência de uma maior contribuição de recarga a partir das nascentes durante os períodos de recessão de chuvas. Considerando a hipótese de que, com o passar do tempo, as modificações de uso e cobertura da terra tenham incentivado o escoamento subterrâneo na região, então, as vazões "proporcionais" do período de recessão (escoamento de base) devem ter apresentado aumento também. Frente a esse cenário, a identificação da resposta da descarga fluvial com hidrogramas, acompanhado de informações da alteração do uso e cobertura da terra no período da série histórica de dados de vazão e precipitação, permitirá confirmar ou não a hipótese levantada.

Partindo desse raciocínio, um dos métodos de análise da separação do escoamento é o da derivação de uma curva mestra de recessão, também chamada de curva de depleção mestra, para se aplicar a curvas individuais do hidrograma (Figura 22). A análise inicia com a identificação de segmentos de registro contínuo de dados da vazão que

fazem parte dos períodos de recessão de chuvas, em que (Q) representa a vazão em (a). Em seguida, devem ser traçados os segmentos individuais dos períodos de recessão de fluxo em gráfico com escala semi-logarítmica (b). Em um segundo gráfico, porém, linear, deve haver o agrupamento dos segmentos identificados, ou curvas de recessão, o que possibilita a criação de uma curva tangencial única decrescente (c), denominada curva de recessão mestra, cuja representação indica a quantidade máxima da descarga de águas subterrâneas. Dessa maneira, em qualquer hidrograma pode ser aplicada a curva de recessão mestra, de modo que os seus segmentos são comuns a ela e podem ser combinadas (d). O ponto N refere-se ao momento final de contribuição do escoamento superficial no hidrograma e a linha MN representa o limite entre a descarga de águas superficiais e subterrâneas (WILSON, 1990 *apud* HISCOCK & BENSE, 2014).

Figura 22. Etapas de análise dos períodos de recessão de um hidrograma.



Fonte: Wilson (1990) *apud* Hiscock & Bense (2014, p. 248).

3.4.1. Groundwater Toolbox

A separação do escoamento foi realizada com a aplicação do algoritmo de Eckhardt (2005) através do *software* livre de processamento de dados hidrológicos Groundwater Toolbox, desenvolvido pelo USGS¹¹. O programa, lançado em 2014, possui um pacote com seis métodos de separação do hidrograma para estimar a descarga de águas subterrâneas e componentes do escoamento superficial, como precipitação, vazão, escoamentos de base e superficial, recarga subterrânea, além de evapotranspiração (BARLOW *et al.*, 2014). A partir de 2017, com a sua versão 1.3, incorporou também dois filtros digitais recursivos, dentre eles, o de Eckhardt (2005) (BARLOW *et al.*, 2017).













O Groundwater Toolbox é um programa de fácil manuseio, com sua interface integrada ao sistema de informação geográfica livre MapWindow, e integra os modelos de separação do escoamento e estimativa de recarga subterrânea, até então individualizados em *softwares* específicos e com dados em diferentes formatos, o que dificultava de uso para a obtenção dos resultados. Basicamente, todos os seus métodos (BFI, HYSEP, PART, RORA, RECESS e filtros digitais) empregam séries históricas de dados diários de vazão para estimar o escoamento de base e a recarga subterrânea, exigindo, por padrão, o valor da área de drenagem para a conversão do fluxo superficial em volume por unidade de área. O programa é aplicável em bacias hidrográficas que apresentam recarga difusa de águas subterrâneas, com sua distribuição uniforme sobre uma bacia, e desconsidera as perdas ocorridas ao longo dos cursos d'água nos cálculos. Outros fatores que podem interferir para a incoerência dos dados processados no *software* são a presença de grandes lagos, áreas úmidas, reservatórios e derretimento de neve (BARLOW *et al.*, 2014). Na área de estudo desta pesquisa, as precipitações em neve apresentam ocorrência anual, porém, por serem eventos de pouca intensidade, consideram-se de pouca influência nos registros identificados durante os períodos de recessão de chuvas para toda a série histórica de dados de vazão.






Outros pressupostos, baseados em Rutledge (2000) e utilizados






11 Disponível em: <<https://water.usgs.gov/ogw/gwtoolbox/>>. Acesso em: 10.ago.2017.

no Groundwater Toolbox, conforme Barlow *et al.* (2014), são de que há a coincidência entre a área drenagem das águas superficiais e as do fluxo subterrâneo; e de que não há perdas das águas subterrâneas para sistemas regionais ou por desvios, incluindo a sua exploração, por exemplo, para a agricultura. O programa é indicado para bacias hidrográficas perenes, com registros de vazão diários completos e maiores do que um ano, tal como é o caso da presente pesquisa. Também é sugerido o seu uso para bacias hidrográficas de até 1.300 km² (menor que 500 milhas quadradas) (Figura 23), dado que o deslocamento do fluxo superficial não deve superar o tempo de um dia, entre o ponto de descarga do aquífero e o registro pela estação fluviométrica, o que dependerá também das condições hidrogeológicas, dos parâmetros morfométricos e da uniformidade da precipitação. Relevos de baixa declividade e hipsometria devem ser evitados, pois os valores podem gerar inconsistências quando é utilizada apenas a área de drenagem como parâmetro físico-natural para a separação do escoamento.

Figura 23. Recomendações gerais de uso do Groundwater Toolbox.

Condições de fluxo				Unidades hidrogeológicas		Tamanho da bacia, em milhas quadradas			Legenda		
Ganho	Perda	Perene	Intermitente	Simplex	Múltiplo	≤1	>1 a ≤500	>500	 Apropriado	 Cuidado	 Não apropriado
											

Escala de tempo do período de análise			Declividade da bacia, em porcentagem	
Menos que um mês (diário, por hora ou evento)	Mensal ou sazonal	Anual ou maior	<1	≥1
				

Uso das águas subterrâneas ou superficiais (bombeamento subterrâneo, desvios, etc.)			Registros de vazão	
Nenhum	Relativamente pouco (pequeno em condições de baixo fluxo)	Substancial (grande nas condições de baixo fluxo)	Completo e <1 ano	Completo e >1 ano
				

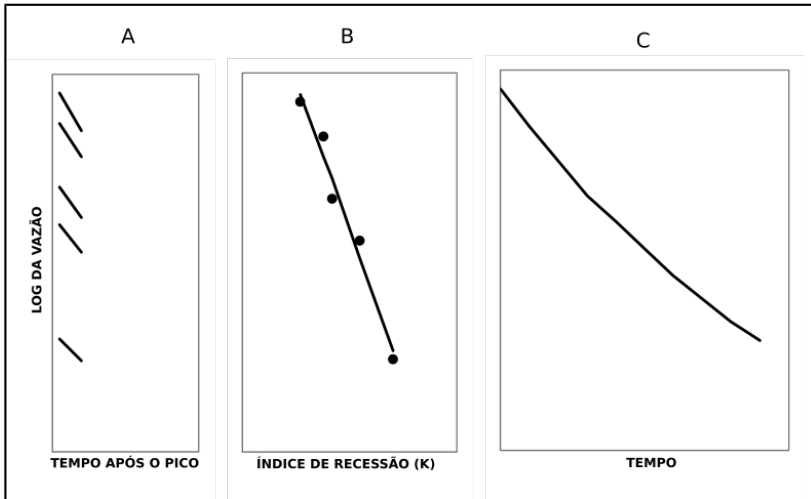
Fonte: Barlow *et al.* (2014, p. 4).

Inicialmente, os dados de vazão com falhas de registro foram copiados para um modelo de arquivo no formato RDB fornecido na documentação do Groundwater Toolbox. Esse formato permite o processamento dos dados nos diferentes métodos para a estimativa de parâmetros e da separação do hidrograma. Foram substituídos determinados dados, como código da estação, nome e área de drenagem, esta última com a área total da região de estudo de 1021 km² multiplicado pelo fator de conversão de 0,386 de milhas quadradas, resultando em 394,21 mi². Os dados de vazão originais, em m³/s, foram convertidos em ft³/s, o que é exigido para o processamento de dados pelos métodos no *software*, com a multiplicação pelo fator de conversão 35,31. Em seguida, o arquivo foi importado para o Groundwater Toolbox para o cálculo de parâmetros, separação do hidrograma e estimativa de recarga subterrânea.

3.4.2. Índice de recessão (k)

O índice de recessão (k) indica o tempo necessário para a descarga de águas subterrâneas repetir um ciclo logarítmico depois que o período de recessão tornar-se linear no gráfico semilogarítmico (RUTLEDGE, 2007b). O método considera os picos de vazão registrados pela estação fluviométrica para identificar os períodos de recessão, ou seja, o tempo imediatamente após o pico de vazão, em que há a diminuição ou estabilidade dos valores de vazão para cada dia até a ocorrência de um novo pico. O objetivo do método é a obtenção do valor médio de vários segmentos de recessão para a construção de uma curva mestra. Inicialmente, o *software* fornece uma lista com os períodos de recessão a partir de um número mínimo de dias, em que o usuário deve selecionar aqueles que apresentam linearidade ou a sua aproximação (cenário A da Figura 24), a fim de que o programa execute a equação linear (Equação 2) mais apropriada a cada segmento e gere um valor k individual (cenário B da Figura 24) (RUTLEDGE, 1998). O índice de recessão k foi obtido pelo modelo RECESS, desenvolvido por Rutledge (1998), através do *software* Groundwater Toolbox, do USGS, o qual auxilia na identificação dos períodos de recessão de chuvas.

Figura 24. Etapas da obtenção do índice de recessão com o método RECESS através do Groundwater Toolbox.



Fonte: Modificado a partir de Rutledge (2007a, p. 4).

A equação 2 é utilizada automaticamente pelo RECESS após a seleção do segmento de recessão pelo usuário, em que t é o intervalo de tempo, em dias, $\text{Log}Q$ é o logaritmo do escoamento, expresso em ft^3/s , e K_1 e K_2 são coeficientes definidos por regressão linear (RUTLEDGE, 2007a).

$$t = K_1 \cdot \text{Log}Q + K_2 \quad (\text{Equação 2})$$

Ao final, os valores individuais de k são inseridos em uma função polinomial de segundo grau (Equação 3) para criar uma curva mestra de recessão (cenário C da Figura 24) e obter automaticamente o valor médio do índice de recessão k (RUTLEDGE, 1998). Na equação 3, t é o intervalo de tempo, em dias, $\text{Log}Q$ 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, 2007a).

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

Rutledge (1998) ressalta que o índice de recessão k varia linearmente, em declínio, com os valores logarítmicos da vazão ao longo do tempo, na unidade de dias, para cada segmento de recessão. Assim, o modelo RECESS exige a identificação de segmentos de recessão com distribuição dos valores logarítmicos em uma curva linear ou mais próxima da linearidade, quando o escoamento superficial cessa, de maneira a identificar as vazões em um padrão de estabilidade que é característico do comportamento da contribuição da descarga de águas subterrâneas fornecida pelos aquíferos. A dificuldade em se encontrar segmentos com todos os valores nesse padrão, e que são incluídos como próximos da linearidade, podem ser ocasionados por diferentes fatores, como a oscilação da recarga de águas do aquífero, evaporação direta, evapotranspiração ou mesmo interferência do consumo de águas do rio nos períodos sem chuvas para atividades humanas, tal como a agricultura, o que pode tornar a curva mestra de recessão não-linear. Além disso, 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 4, 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, elevada à potência de 0,2 (LINSLEY *et al.*, 1982 *apud* RUTLEDGE, 1998).

$$N = A^{(0,2)} \quad (\text{Equação 4})$$

3.4.3. Coeficiente de recessão (a)

O coeficiente de recessão (a) define o comportamento hidrológico particular da bacia hidrográfica para uma série histórica de dados de vazão e tem como finalidade o estabelecimento de parâmetros de entrada a serem utilizados nos filtros numéricos de separação do hidrograma, tal como o filtro de Eckhardt (2005), além de viabilizar a estimativa da recarga de águas subterrâneas, com a obtenção do índice do fluxo de base (*Base Flow Index – BFI*) (CARLOTTO *et al.*, 2015).

Esse coeficiente pode ser obtido a partir da conversão externa do índice de recessão (k), obtido pelo método RECESS ou a partir do método de Eckhardt (2008) no Groundwater Toolbox. Optou-se por ambos, uma vez que os métodos já estão incorporados ao *software*, tendo em vista que o valor do coeficiente de recessão (a) obtido por eles seja utilizado, como esperado, nos demais modelos integrados. Nos dois métodos adotados, o coeficiente de recessão (a) é obtido a partir de uma curva com linearidade.

No primeiro método, o valor médio do índice de recessão (k), de 63,39 dias/log, foi incorporado à Equação 5, com Δt equivalente ao valor de 1, para a sua conversão ao coeficiente de recessão (a), expresso em dia⁻¹ (inverso do índice de recessão) (ECKHARDT, 2008; LEDESMA, 2016) através de planilha¹² baseada na metodologia de Collischonn & Fan (2013), cujo valor identificado foi de 0,984 dia⁻¹:

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (\text{Equação 5})$$

Através da análise de vários segmentos de recessão, o coeficiente de recessão a também foi determinado pelo método de correlação de Eckhardt (2008) no Groundwater Toolbox, através do comando *Analysis/Estimate Hydrograph Parameters/Two-Parameter Digital Filter*. O modelo utiliza dados médios diários da vazão (y_k) de todos os períodos de recessão registrados pela estação fluviométrica e correlaciona, em gráfico, os dados da Equação 6, na análise de cada dia (y_{k+1}) para cada período de recessão por vez, com a condição de que sejam períodos que apresentem, no mínimo, 5 dias de linearidade. O método presume que os períodos de recessão sejam longos suficientes para os cálculos, que não ocorre recarga de águas subterrâneas para os tempos k e $k+1$ e que o valor do coeficiente de recessão (a) corresponderá à descarga linear de águas subterrâneas até então armazenadas pelo aquífero (ECKHARDT, 2008; BARLOW *et al.*,

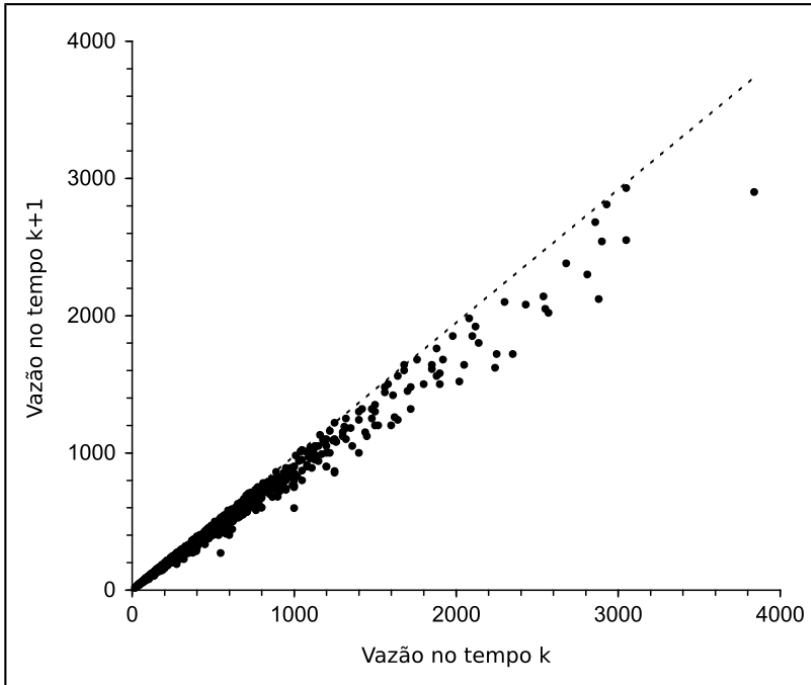
12 Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/equipe/professores/fernando-mainardi-fan/>>. Acesso em: 01.out.2017.

2017).

$$a = \frac{y_{k+1}}{y_k} \quad (\text{Equação 6})$$

Na medida em que o gráfico é construído, o modelo gera uma linha limite com os dados das variáveis da Equação 6, com início no ponto de origem (y_{k+1} e y_k), e que representa o valor do coeficiente de recessão (a) (ECKHARDT, 2008), como exemplificado na Figura 25. Para a série histórica de dados de vazão da área de estudo, o valor identificado pelo método foi de $0,977 \text{ dia}^{-1}$.

Figura 25. Gráfico de dispersão do Rio Flint (Michigan/EUA) com a vazão diária observada ($k+1$), em ft^3/s , em função dos dados médios de vazão total dos períodos de recessão (k) e com a linha tracejada do coeficiente de recessão (a), no valor de 0.975 dia^{-1} .



Fonte: Adaptado de Eckhardt (2008, p. 169).

3.4.4. Índice máximo do escoamento de base ($BFImáx$)

O índice máximo do escoamento de base (*Base Flow Index Maximum* – $BFImáx$) é um parâmetro utilizado, assim como o coeficiente de recessão a , no algoritmo de Eckhardt (2005), com valores que variam até 1 (0 a 100%), em conformidade com as características hidrológicas e hidrogeológicas de uma bacia hidrográfica (ECKHARDT, 2005). O Groundwater Toolbox realiza a estimativa do $BFImáx$ com o método de Collischonn & Fan (2013). Com dados de 15 estações

fluviométricas no Brasil, Collischonn & Fan (2013) utilizaram a operação do filtro inverso, comprovando a correspondência dos valores $BFI_{máx}$ com as características geológicas diferenciadas das bacias hidrográficas analisadas. O filtro inverso (Equação 7) 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 7, 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.

$$b'_{i-1} = \frac{b'_i}{a} \quad (\text{Equação 7})$$

O processamento começa com o cálculo de b'_i (escoamento de base estimado) com o dado de vazão diário final do último período de recessão da série histórica. Em seguida, o filtro inverso é aplicado para o primeiro dia de recessão da série de dados observados e acompanha o comportamento da vazão total, com exceção dos picos elevados de vazão. Pelo método, nenhum filtro digital de separação de hidrograma pode ser maior que o valor diário de recessão identificado pelo filtro reverso (b'_i), visto que ele indica o valor máximo que o escoamento de base pode ter, o que vai depender do valor do coeficiente de recessão (a). Dessa forma, o $BFI_{máx}$ 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 8) (COLLISCHONN & FAN, 2013).

$$BFI_{máx} = \frac{\sum_{i=1}^N b'_i}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad (\text{Equação 8})$$

Em razão do Groundwater Toolbox, na sua versão 1.3, não apresentar a sua funcionalidade em operação, optou-se por realizar o cálculo em planilha com a metodologia de Collischonn & Fan (2013).

3.4.5. Separação do hidrograma: filtro digital recursivo de Eckhardt

A separação do escoamento ou hidrograma determina o fluxo de base a partir da série histórica de dados de vazão do rio. Nela, há a identificação dos pontos em que o escoamento de base intersecta o escoamento superficial na parte ascendente e descendente de resposta do hidrograma. Considerados simples e robustos, os filtros digitais recursivos, empregados na análise de dados hidrológicos, geram resultados que dependem dos parâmetros utilizados em cada filtro, devendo ser numericamente calibrados para torná-los válidos (BRODIE & HOSTETLER, 2005). O algoritmo de Eckhardt, embora bastante subjetivo em seu uso, quando considerados os valores propostos por Eckhardt (2005), fornece uma abordagem rápida e de qualidade para a obtenção de separações do escoamento (O'BRIEN *et al.*, 2013).

Conforme Eckhardt (2005), o fluxo de base geralmente está associado à descarga de águas oriundas do armazenamento subterrâneo. Em uma série de dados de vazão de um hidrograma, os períodos de recessão estão relacionados ao escoamento de base e à variabilidade de alta frequência do escoamento superficial. O filtro digital recursivo torna possível identificar o fluxo de base em uma hidrógrafa a partir de um filtro passa-baixo, separando a vazão em escoamento direto ou superficial e escoamento de base, sendo representado pela Equação 9, de modo que y é a vazão total no canal, f é o escoamento direto ou superficial, b é o fluxo de base, e k é o tempo. O processo de separação do hidrograma é automatizado e recomendado pela facilidade em reproduzir os resultados.

$$y_k = f_k + b_k \quad (\text{Equação 9})$$

A técnica parte do pressuposto de que a vazão de um aquífero é linearmente proporcional ao seu armazenamento. Entretanto, não

significa que a entrada e a saída de águas do aquífero ocorra de forma simultânea, em virtude das próprias características hidrogeológicas que condicionam o tempo de residência das águas subterrâneas através desse armazenamento, mas aproximada, o que é, portanto, uma limitação do método enquanto modelo (ECKHARDT, 2005).

Com o uso de dois parâmetros, o coeficiente de recessão (a) e o índice máximo do escoamento de base ($BFImáx$), a fórmula geral do filtro de Eckhardt (2005) em que se deve considerar $bk \leq yk$, ou seja, com a condição de que o valor do fluxo subterrâneo seja menor ou igual à vazão registrada na seção do posto fluviométrico, é a seguinte (Equação 10):

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

(Equação 10)

Em que (ECKHARDT, 2005):

- 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;
- k é o tempo.

As limitações do método de Eckhardt (2005) são condicionadas a fatores de interferência mencionados para o índice de recessão (k), tendo em vista que é um parâmetro utilizado para determinar o coeficiente de recessão (a) que, por sua vez, é usado para definir o índice máximo do escoamento de base ($BFImáx$).

No Groundwater Toolbox, no modo interativo, em que há o processamento simples de uma única série de dados (em ft^3/s) e que admite a ocorrência de falhas de registro de vazão, foram especificados

manualmente os dois parâmetros calibrados para a estação fluviométrica Vila Canoas/SC, com o coeficiente de recessão, 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 & Fan (2013), no valor de 0,510, além da área de drenagem em $394,21 \text{ mi}^2$ (equivalente a $1021,1 \text{ km}^2$). A separação do hidrograma gerou dados estimados do escoamento de base para o filtro digital recursivo de Eckhardt (2005) em dados do escoamento de base e *BFImáx* diários, mensais e anuais para o período de análise das modificações do uso e cobertura da terra (1957-2017). Com os dados anuais em planilha do LibreOffice Calc, foi gerado um hidrograma com o escoamento de base, cujos dados foram transformados na unidade de ft^3/s para m^3/s pela divisão com o fator de conversão 0,0283. Ao final, foram traçadas linhas de tendência polinomial para a análise geral de cada cenário das mudanças no uso e cobertura da terra na área de estudo.

Quanto ao 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 escoamento de base, estimados no Groundwater Toolbox com o filtro de Eckhardt (2005).

3.4.6. Recarga de águas subterrâneas: método do deslocamento da curva de recessão

O estudo da recarga de águas subterrâneas é importante para compreender o comportamento do balanço hídrico em qualquer bacia hidrográfica. Vários métodos são utilizados para estimar a recarga de águas, tendo em vista a dificuldade de mensurá-la diretamente, e o método do fluxo de base é um dos que realizam essa aproximação (RISSER, GBUREK & FOLMAR, 2005). No presente trabalho, o estudo da recarga de águas subterrâneas têm a importância de gerar informações auxiliares à compreensão do comportamento da descarga de águas subterrâneas do SAIG/SG em função das mudanças do uso e cobertura da terra para o período em análise. A recarga mostra a quantidade de água que está entrando no sistema hidrogeológico que contribui para a descarga de águas subterrâneas no recorte espacial da

área de estudo, o que permite inferir acerca da variabilidade da infiltração, enquanto método indireto. Do mesmo modo, é possível verificar com os dados de recarga se o ciclo hidrológico tornou-se acelerado ou não no decorrer dos últimos 60 anos pelo comparativo com os dados de saída do sistema hidrogeológico, ou seja, a descarga de águas subterrâneas.

Um dos métodos que realiza a estimativa de recarga subterrânea é o método do deslocamento da curva de recessão, implementado no programa RORA, o qual está incorporado ao Groundwater Toolbox (BARLOW *et al.*, 2014), que é calibrado com o índice de recessão (k), obtido a partir de uma única série histórica diária de vazões para determinar a curva de recessão mestra. O método do deslocamento da curva de recessão é derivado de equações de Rorabaugh (1964) e fornece um valor médio de recarga subterrânea (RUTLEDGE, 1998).

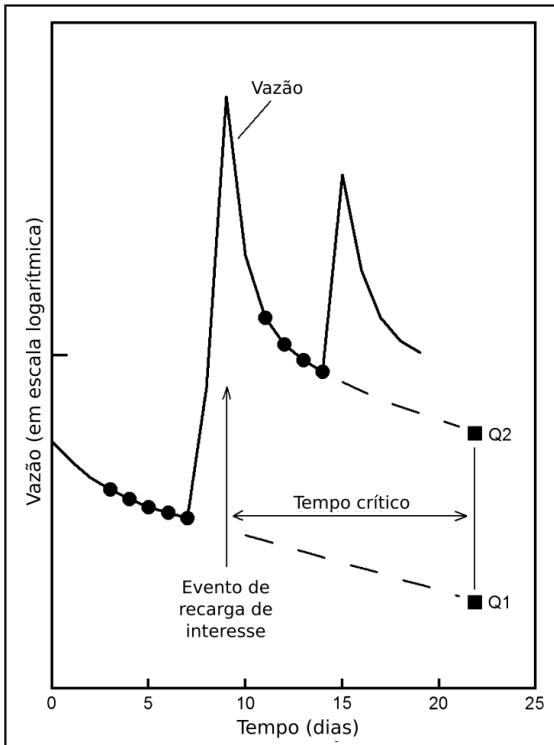
Após a definição do valor médio do índice de recessão (k), com o método RECESS, e do tempo mínimo, em dias, que antecede as recessões, com a Equação 4, o Groundwater Toolbox realiza a estimativa da recarga subterrânea com a Equação 11 no programa RORA. Nessa equação, R é o total de recarga; $Q1$ é a 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, 2007b).

$$R = \frac{2 \cdot (Q2 - Q1) \cdot k}{2,3026} \quad (\text{Equação 11})$$

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, representados com pontos na Figura 26. Dessa maneira, um evento de recarga subterrânea representa o tempo de duração do maior pico de vazão entre dois períodos consecutivos de recessão, isto é, entre os tempos de descarga subterrânea registrados (RUTLEDGE, 2007b).

Assim, o cálculo ocorre pela diferença entre o total de descarga de águas subterrâneas, em um determinado tempo crítico imediatamente após um pico de vazão, quando são projetados, ou extrapolados, os períodos de recessão anterior e posterior a este pico, sendo válido para séries longas de vazão (RUTLEDGE, 1998).

Figura 26. Modelo esquemático das variáveis usadas em gráfico com dados diários de vazão em função do tempo no método do deslocamento da curva de recessão, no RORA, para a estimativa de recarga subterrânea.



Fonte: Rutledge (2007b, p. 376).

O tempo crítico é o período entre o pico de vazão, ou do fim da precipitação, e o valor final da vazão extrapolada do escoamento de base para dois períodos de recessão sucessivos, determinado pelo índice de recessão (k), em que a curva de recessão aparece inteiramente linear no gráfico semilogarítmico (RUTLEDGE, 1998), cuja relação ocorre pela Equação 12 (RUTLEDGE, 2007b). O valor resultante do cálculo do tempo crítico é usado para estimar Q1 e Q2 e, dessa maneira, calcular a recarga subterrânea com a Equação 11 (ABO & MERKEL, 2015).

$$tc = 0,2144 \cdot k \quad (\text{Equação 12})$$

O método do deslocamento da curva de recessão, no RORA, foi a solução mais viável para a área de estudo em virtude da falta de dados de evapotranspiração para o tempo que compreende a análise das modificações do uso e cobertura da terra, de 1957 a 2017. Para a estimativa de recarga de águas subterrâneas também não foram processados dados de poços tubulares pela insuficiência de poços cadastrados na rede do Sistema de Informações em Águas Subterrâneas (SIAGAS) nessa região.

O método do deslocamento da curva de recessão, assim como o Filtro de Eckhardt, está sujeito às limitações mencionadas no tópico do índice de recessão (k), já que utiliza esse parâmetro nas equações. No caso específico do RORA, há outros fatores que podem influenciar os resultados encontrados dos valores médios de recarga subterrânea, principalmente a intensa evapotranspiração para os meses de primavera e verão e consumo de água pelas atividades agrícolas e de pecuária. Mesmo assim, foram considerados todas as estações do ano em virtude da estimativa ser anual e com a finalidade de verificar os efeitos no comportamento hidrológico das mudanças do uso e cobertura da terra na área de estudo do SAIG/SG. Outro fator limitador é que a recarga em milímetros por área requer a quantificação pelo tamanho total da região de estudo, e não especificamente do SAIG/SG.

No Groundwater Toolbox, o RORA foi configurado com a área total de 394,21 mi², a vazão em ft³/s, o índice de recessão em 63,39 dias/log e o tempo mínimo em que o escoamento superficial ainda

contribui para a vazão total registrada em 4 dias, conforme Equação 4. 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 com o fator multiplicador no valor de 25,4. Ao final, o valor anual foi dividido pelo fator de conversão 2,59 para a transformação da unidade de milímetros por milhas quadradas para milímetros por quilômetros quadrados.

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 obtida pela média aritmética dos percentuais anuais de recarga média da precipitação total. Uma limitação é a falta de uma estação pluviométrica dentro da área de estudo que englobe todo o período de análise e que não esteja localizada no exutório, ponto no qual o vale torna-se aberto e as condições climáticas podem ser de alguma forma diferentes do interior da região de pesquisa.

3.5. ESTIMATIVA DA VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA AS CATEGORIAS DE USO E COBERTURA DA TERRA (1957-2017)

A análise da velocidade média do escoamento superficial é um método indireto para avaliar a correlação com a variação do escoamento de base no decorrer do tempo. Esse método foi utilizado em Hoffmann (2014) e Hoffmann & Nanni (2017) para identificar o comportamento do escoamento superficial para modificações do uso e cobertura da terra na Bacia do Rio Biguaçu/SC e será aqui empregado para confrontar com os resultados da estimativa do escoamento de base.

Inicialmente, as camadas vetoriais das duas cenas de satélite do ano de 1976 foram mescladas em uma única camada vetorial. Depois, os arquivos vetoriais de uso e cobertura da terra da área de estudo de 1957, 1976, 1997 e 2017 tiveram o valor de suas classes do IBGE (2013) substituída pelo valor das quatro categorias de uso e cobertura da terra na tabela de atributos com a função CASE WHEN da calculadora de campo do QGIS: 1 para florestas, 5 pastos, 7 para áreas cultivadas e 9 para pavimentos. Esses valores foram utilizados nos procedimentos

realizados adiante para estimativa do escoamento superficial. Em seguida, os arquivos vetoriais foram convertidos em arquivos raster no QGIS para haver a compatibilidade no cálculo com outra camada raster, a de declividade reclassificada.

A declividade utilizou o modelo digital de elevação do projeto *Shuttle Radar Topography Mission*, com resolução espacial de 30 metros, acurácia horizontal absoluta de 20 metros e vertical de 16 metros, em formato GEOTIFF, disponibilizado na Mapoteca Topográfica Digital de Santa Catarina (EPAGRI, 2017). O modelo foi recortado com a camada vetorial da área de estudo e utilizado para a geração das camadas de declividade e sombreamento no presente trabalho. A declividade foi gerada no QGIS através da barra de menus em *Raster/Análise do terreno/Declividade*, na qual foram determinados para a sua representação na Figura 29 os intervalos de declive e característica geomorfológica de Ramalho Filho & Beek (1995) (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação da declividade.

Intervalo de declive (%)	Característica do relevo
0-3	Plano
3- 8	Suave ondulado
8-13	Moderadamente ondulado
13- 20	Ondulado
20- 45	Forte ondulado
45-100	Montanhoso

Fonte: Adaptado de Ramalho Filho & Beek (1995, p. 31).

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 nos intervalos até 11% e incluíram os valores mínimos de velocidade do escoamento superficial para declividade acima de 12% (Tabela 2).

Tabela 2. Velocidades médias de escoamento superficial (em m/s) em função da declividade (%).

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).

Os dados admitidos na Tabela 2 são geralmente utilizados em obras de engenharia como forma de estimar a vazão máxima do escoamento superficial nos espaços à montante do dimensionamento hidráulico e resultam de estudos empíricos. Dessa maneira, a velocidade média do escoamento superficial, agrupada em quatro categorias de uso e cobertura da terra (florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos), é uma das variáveis do método cinemático do *Soil Conservation Service* (SCS) aplicadas à equação do tempo de concentração (tc) de uma bacia hidrográfica (Equação 13). O tempo de concentração é a soma dos tempos do escoamento superficial e o seu valor depende do comprimento do talvegue (L), em quilômetros, e da velocidade média do escoamento (V), em m/s, para cada tipo de superfície de acordo com a declividade (KIBLER, 1982 *apud* Porto *et al.*, 2000).

$$tc = \frac{1000}{60} \cdot \sum \left(\frac{L}{V} \right) \quad (\text{Equação 13})$$

A calculadora raster do QGIS é uma funcionalidade que não permite o uso de números decimais. Assim como no uso e cobertura da terra, foram definidos valores convencionados também para o raster de declividade, em que os intervalos da Tabela 2 foram substituídos por 2 (0-3%), 4 (4-7%), 6 (8-11%) e 8 (maior que 12%). Essa substituição dos valores do pixel de declividade ocorreu com o uso do comando `r.reclass` da caixa de ferramentas do QGIS. A multiplicação dos valores

convencionados de declividade e uso e cobertura da terra resultaram em valores individuais (Tabela 3) e correspondentes a cada valor da velocidade média do escoamento superficial da Tabela 2.

Tabela 3. Valores convencionados atribuídos aos pixels do raster de uso e cobertura da terra (1957-2017) e declividade para multiplicação na calculadora raster do QGIS.

Valor atribuído aos pixels do uso e cobertura da terra		Valor atribuído aos pixels de declividade			
		2	4	6	8
Florestas	1	2	4	6	8
Pastos	5	10	20	30	40
Áreas cultivadas	7	14	28	42	56
Pavimentos	9	18	36	54	72

Fonte: Elaborado por Arthur Schmidt Nanni.

Na calculadora raster do QGIS, os arquivos raster reclassificados de declividade e uso e cobertura da terra tiveram os seus valores convencionados multiplicados pixel a pixel, para cada ano (1957, 1976, 1997 e 2017), gerando quatro camadas raster com valores variando de 2 a 72, como demonstrado na Tabela 3. Essa camada raster foi convertida em vetor e teve calculada a área, em km², para cada valor individualizado, cujo somatório foi realizado pelo complemento *GroupStats*.

Em uma planilha do LibreOffice Calc, o somatório das áreas em cada ano foi menor que o tamanho da área de estudo, de 1021,1 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 & 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 (dos valores de 2 a 72 das categorias florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos para cada intervalo de declividade) pela velocidade média do escoamento superficial correspondente (VmES) na Tabela 2, cujo

somatório foi dividido pela extensão da área total de estudo (1021,1 km²) (Equação 14).

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

(Equação 14)

Em um gráfico de colunas, foi comparada a vazão média do escoamento de base, estimado pela separação do hidrograma, com os valores da velocidade média do escoamento superficial, no intuito de comparar o comportamento de ambos para cada ano mapeado. Parte-se da ideia de que no caso das velocidades médias do escoamento superficial diminuïrem, significa que o escoamento de base deve ter aumentado, assim como a recarga subterrânea, e vice-versa, permitindo confirmar os resultados obtidos com a separação do hidrograma pelo filtro de Eckhardt e a recarga subterrânea com o método RORA.

3.6. OCORRÊNCIA DA INTERAÇÃO AQUÍFERO-RIO: DISTRIBUIÇÃO DAS NASCENTES

A ocorrência da interação aquífero-rio na área de estudo foi explicada com o perfil topográfico da estrutura geológica e o mapa de localização das nascentes. O perfil topográfico da estrutura geológica teve como fonte de dados para a altitude o modelo digital de elevação do projeto SRTM, na resolução de 30 metros (EPAGRI, 2017). No QGIS, o perfil topográfico foi definido pelo complemento *Profile Tool* e os pontos cotados, para a delimitação das unidades geológicas, teve como referência o Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina, na escala de 1:500.000 (WILDNER *et al.*, 2014). O arquivo gerado no QGIS, em formato SVG, foi exportado para o pós-processamento no *software* livre de edição Inkscape, no qual foi gerada a figura no formato PNG. O contato entre derrames basálticos e os fluxos de águas, de recarga e decarga subterrânea, consideraram também observações realizadas em atividade de campo.

Por sua vez, o mapa das nascentes utilizou a camada vetorial de nascentes, produzida ao padrão da Agência Nacional de Águas (ANA), com restituição hidrográfica a partir de modelo digital de elevação, com resolução espacial de 39 centímetros, produzido pelo levantamento aerofotogramétrico 2010-2012 do Estado de Santa Catarina, realizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS) (SANTA CATARINA, 2017). A camada de nascentes foi recortada pelas unidades geológicas vetorizadas do Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina e considerou a escala original deste mapa, em 1:500.000 (WILDNER *et al.*, 2014). Todas as camadas foram sobrepostas pelo sombreamento, gerado pelo modelo digital de elevação, com resolução espacial de 30 metros (EPAGRI, 2017). A adoção desses produtos cartográficos se deve ao fato de serem estes os materiais mais precisos para a região. Em procedimento final, as nascentes foram contabilizadas na tabela de atributos do arquivo vetorial gerado no QGIS.

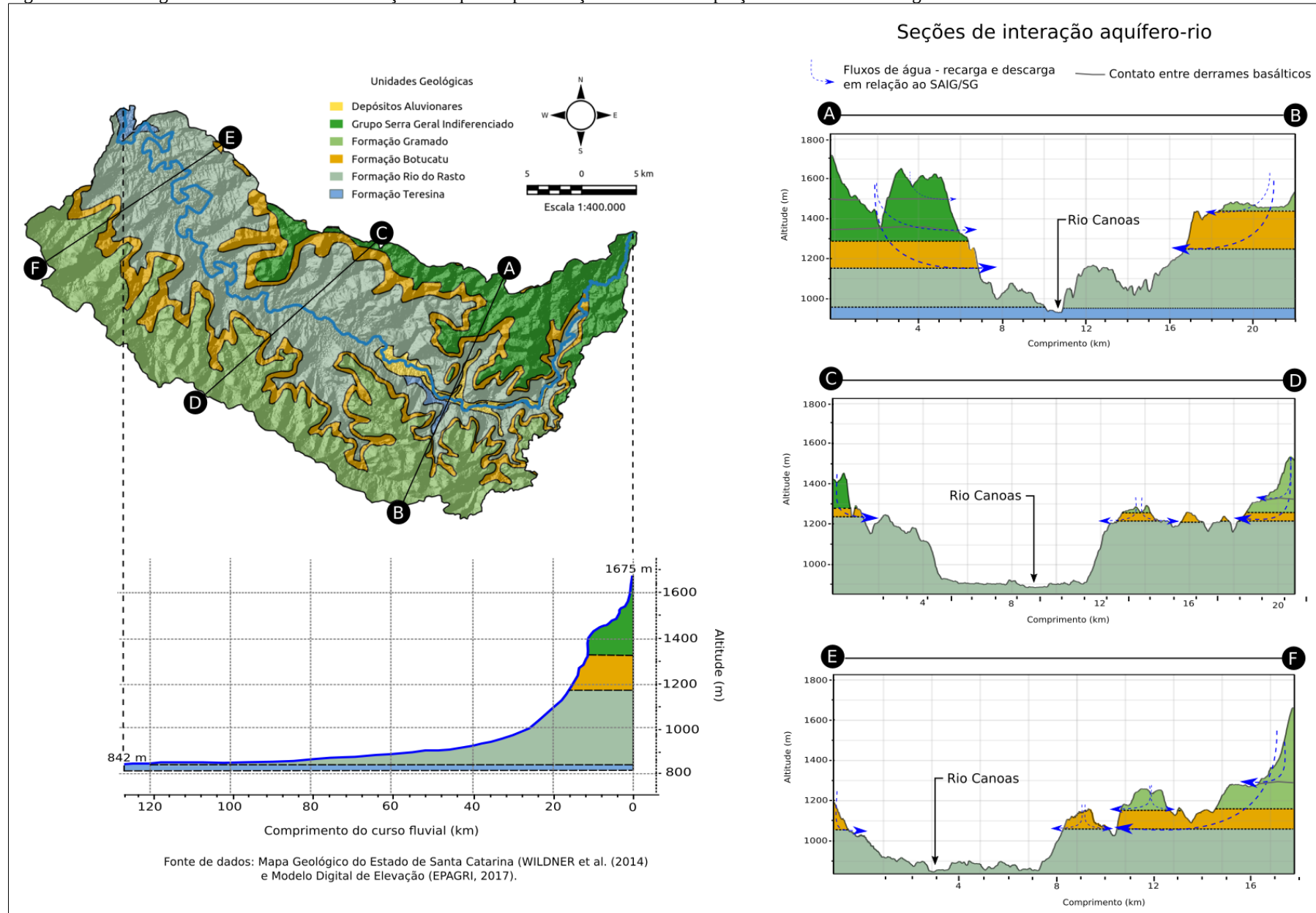
4. RESULTADOS

4.1. OCORRÊNCIA DA INTERAÇÃO AQUÍFERO-RIO NA ÁREA DE ESTUDO

Encontram-se a seguir as ilustrações, na Figura 27, sobre a forma de ocorrência da interação aquífero-rio para a área de estudo, com o perfil longitudinal ao longo do curso d'água principal e os perfis transversais da porção alta da bacia hidrográfica. As áreas de recarga são predominantemente aquelas em que estão presentes as formações do SASG (Grupo Serra Geral Indiferenciado e Formação Gramado). Uma vez infiltradas e percoladas as águas no SASG, estas passam a recarregar o SAG. Os perfis evidenciam que as unidades geológicas e hidroestratigráficas referentes ao SAIG/SG estão acima da cota altimétrica do Rio Canoas. Nas encostas da área, essas unidades são encontradas em altitudes superiores a 1.100 metros (valor aproximado pela média dos perfis apresentados), enquanto que o Rio Canoas, no trecho estudado, está situado em cotas inferiores a 1000 metros. Como observado em campo, a maior parte das nascentes são encontradas no contato entre o SAIG/SG e a Formação Rio do Rasto. Dessa forma, o SAIG/SG, que possui recarga direta por precipitação, somente contribui com as vazões dos tributários do Rio Canoas a partir da sua descarga.

De um modo geral, durante a percolação das águas, por poros e fraturas, as águas ficam retidas junto ao contato com a formação Rio do Rasto, de menor capacidade de armazenamento e pouco permeável, o que provoca o seu transporte até algum dos pontos de surgência em superfície nas vertentes. Destaca-se também a retenção e o deslocamento das águas até a superfície junto ao contato geológico entre derrames basálticos do Grupo Serra Geral Indiferenciado e da Formação Gramado e nos seus respectivos interderrames. Desse modo, o processo de descarga de águas subterrâneas provenientes do SAIG/SG supre cada um dos cursos fluviais que drenam a bacia hidrográfica e constitui a principal fonte do escoamento superficial durante os períodos de recessão da precipitação.

Figura 27. Perfil longitudinal e ocorrência da interação rio-aquífero para a seção em análise da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas/SC.



Fonte: Elaborado por Geovano Pedro Hoffmann e Arthur Schmidt Nanni.

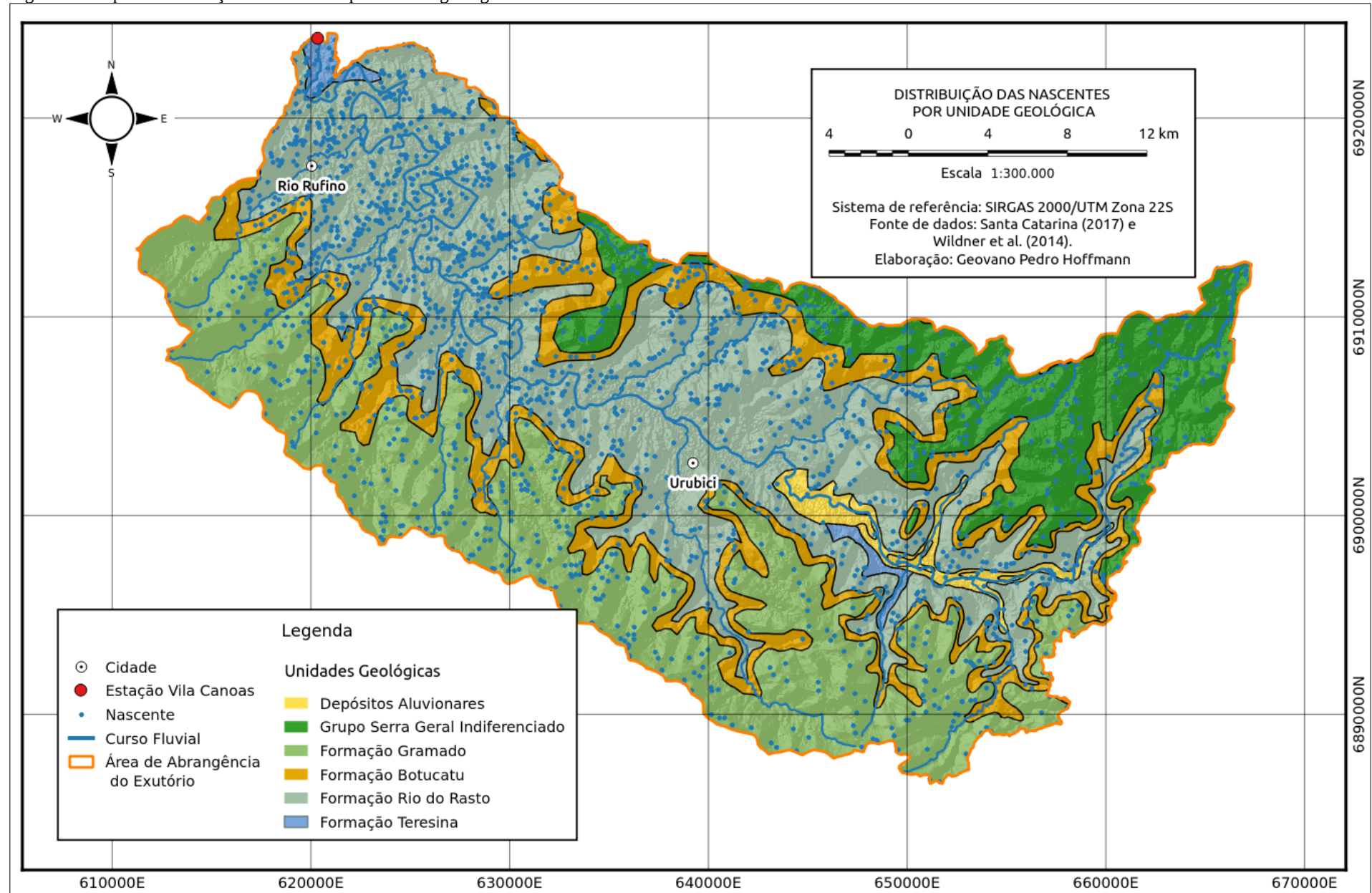
A quantificação das nascentes por unidade geológica (Quadro 11) evidencia que as águas que infiltram por recarga pelo Grupo Serra Geral Indiferenciado e Formação Gramado, tem passagem pela Formação Botucatu, como demonstrado pelo menor número de nascentes, próximas do contato com a unidade geológica sotoposta (Figura 28), a Formação Rio do Rasto, a qual constitui uma barreira aos fluxos descendentes de recarga subterrânea. Essa situação faz com que o número de nascentes seja maior nesta última unidade, em adição às características geomorfológicas do SAIG/SG na área de estudo, em escarpas, de modo que o nível freático não permite a saída de água através da Formação Botucatu. É preciso chamar atenção para o fato de que a Formação Rio do Rasto é maior em área do que as demais unidades geológicas e que a quantificação das nascentes pode não corresponder integralmente à realidade em função dos produtos cartográficos utilizados.

Quadro 11. Quantidade de nascentes por unidade geológica da região de estudo.

Unidade geológica	Quantidade de nascentes
Grupo Serra Geral Indiferenciado e Formação Gramado	688
Formação Botucatu	309
Formação Rio do Rasto	1160
Formação Teresina	33
Depósitos Aluvionares	21

Fonte: Elaboração própria.

Figura 28. Mapa da distribuição das nascentes por unidade geológica na área de estudo.

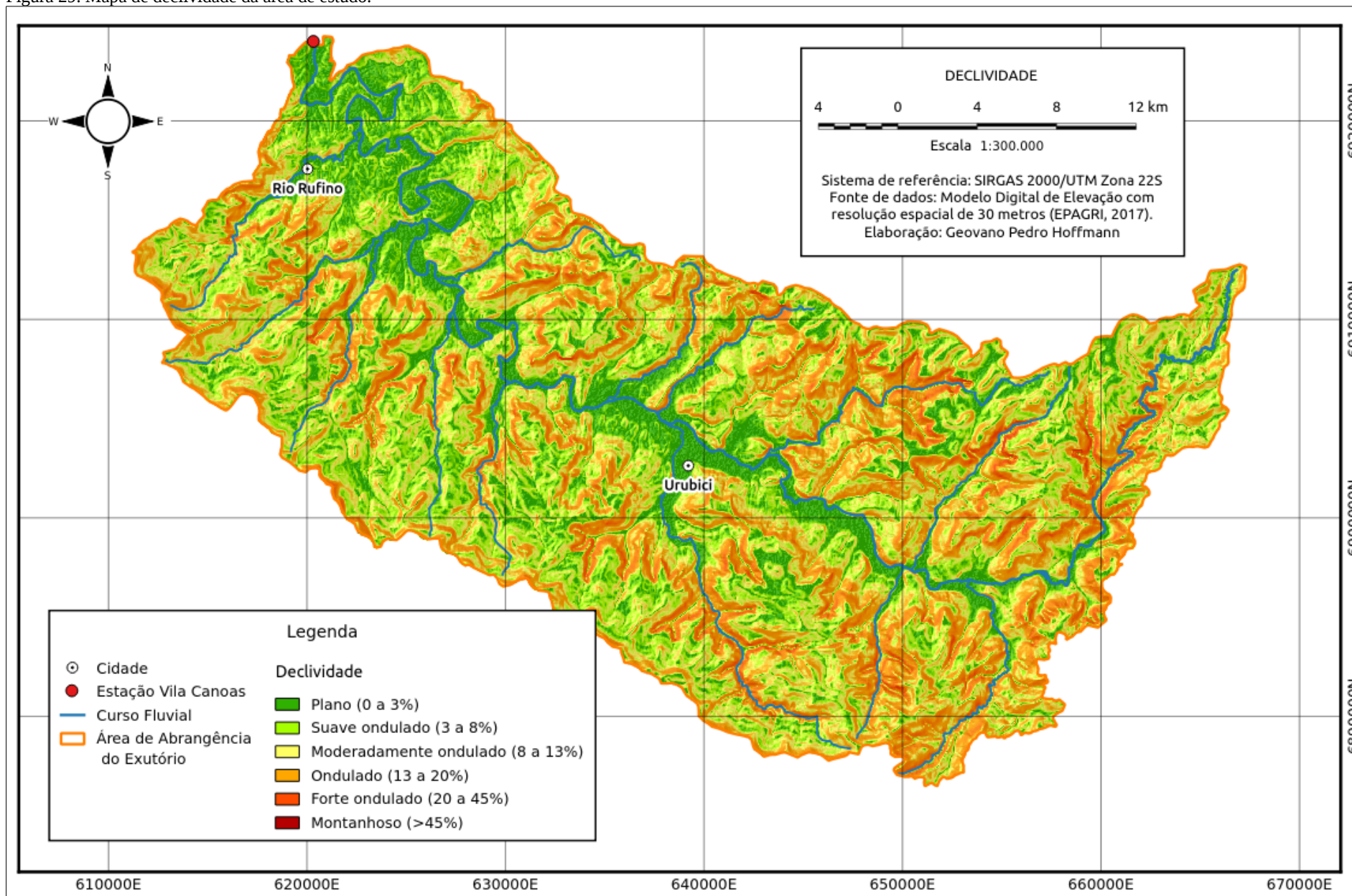


Fonte: Elaboração própria.

Não foram considerados na análise em questão situações como basculamentos e falhamentos tectônicos locais ou regionais da Bacia Geológica do Paraná, visto que a quantificação do fluxo de base por meio de dados de vazão da estação hidrometeorológica Vila Canoas partiu de dados do volume de águas escoado superficialmente apenas na área de drenagem da seção em estudo da porção alta da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas. Do mesmo modo, não foram avaliados a influência dos solos e das planícies de inundação, que mesmo podendo apresentar significativa contribuição durante os períodos de recessão de chuvas para as vazões, fazem parte da circulação de águas de curto a médio prazo no ambiente natural, enquanto que o objetivo da pesquisa tem como enfoque verificar a possibilidade da modificação do uso e cobertura da terra impactar o dinamismo da descarga de águas subterrâneas, de maior tempo de residência na área de estudo, no período dos últimos 60 anos.

A declividade no fundo de vale (Figura 29) representa um relevo plano (0 a 3%) a suave plano (3 a 8%), enquanto que nas elevações da área de estudo o relevo é moderadamente ondulado nas encostas (8 a 13%) a ondulado (13 a 20%). Nesses intervalos de declividade, encontram-se a Formação Teresina e a Depósitos Aluvionares, enquanto que a Formação Rio do Rasto apresenta-se em áreas desde o relevo plano até ondulado (Figura 28). Nas proximidades do divisor de águas, a declividade é variável e ocorre de plano a ondulado, porém, tem-se o domínio de um relevo plano a moderadamente ondulado, o que favorece a recarga subterrânea na região a partir do Grupo Serra Geral Indiferenciado e Formação Gramado. As áreas abruptas entre os topos de morros e o fundo de vale representam relevo forte ondulado (20 a 45%) a montanhoso (45 a 100%), com extensões em que há a descontinuidade geológica do SAIG/SG, na qual a Formação Botucatu aflora e onde o processo fluvial erosivo é atuante. Ao longo da descontinuidade geológica do SAIG/SG, há a descarga de águas subterrâneas em direção à planície da região, o que é mostrado pela maior quantidade de nascentes (Figura 28).

Figura 29. Mapa de declividade da área de estudo.



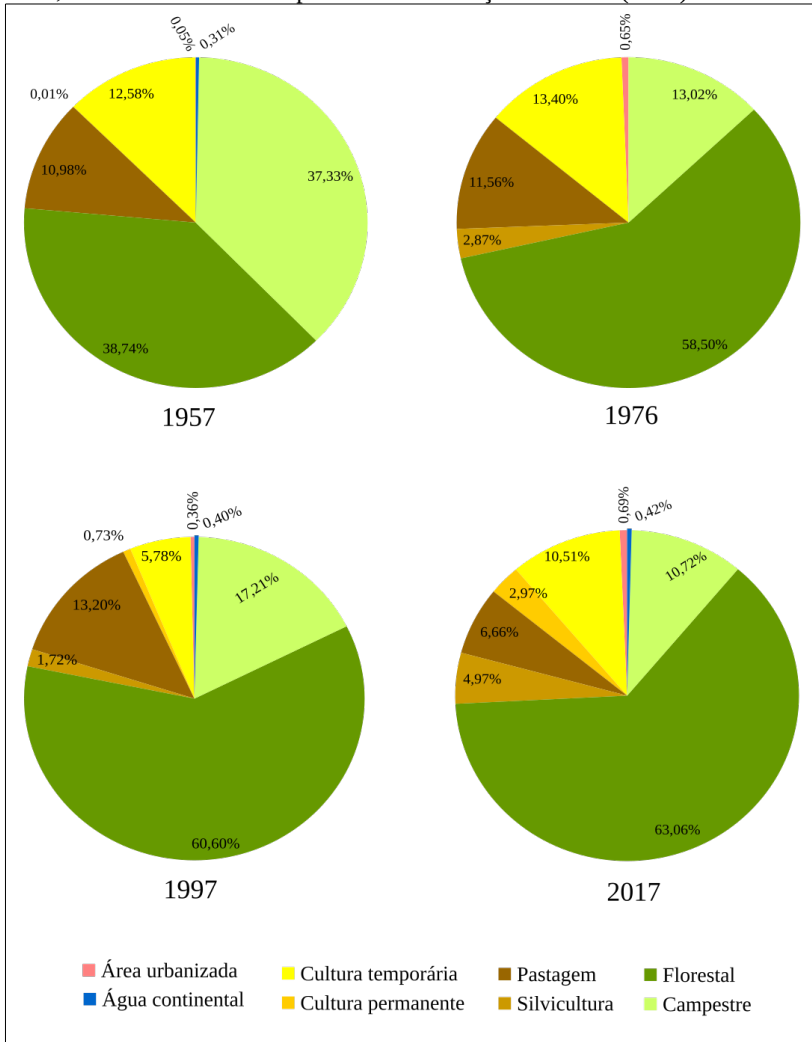
Fonte: Elaboração própria.

4.2. DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA (1957-2017)

As modificações do uso e cobertura da terra na região de pesquisa consideraram o período de funcionamento da estação hidrometeorológica Vila Canoas/SC, de 1957 ao período de desenvolvimento deste trabalho, a fim de confrontar os resultados com os dados de recarga e descarga de águas subterrâneas do SAIG/SG.

A organização espacial da dinâmica do uso e cobertura da terra, de 1957 a 2017, é diferenciada na região de estudo para as elevações (compreendidas também como encostas) e o fundo de vale (ou planície), especialmente pela influência das características físico-naturais da área, como a boa disponibilidade hídrica, principalmente diante de estiagens; o relevo que protege de ventos e evita o ressecamento de cultivos em meio aos planaltos dos campos gerais; solos férteis na planície aluvial; e pela estrutura agrária estabelecida. Segundo Machado (2016), nas grandes e médias propriedades, instaladas desde a ocupação, há alguns séculos, tradicionalmente era praticada a pecuária extensiva nas áreas dos campos naturais, correspondente às elevações da área de estudo, enquanto que a pequena propriedade se dava ao longo da planície do Rio Canoas, onde a agricultura era e ainda é a principal atividade econômica.

Figura 30. Evolução do uso e cobertura da terra na área de estudo, entre 1957 e 2017, com valores obtidos a partir da classificação do IBGE (2013).



Fonte: Elaboração própria.

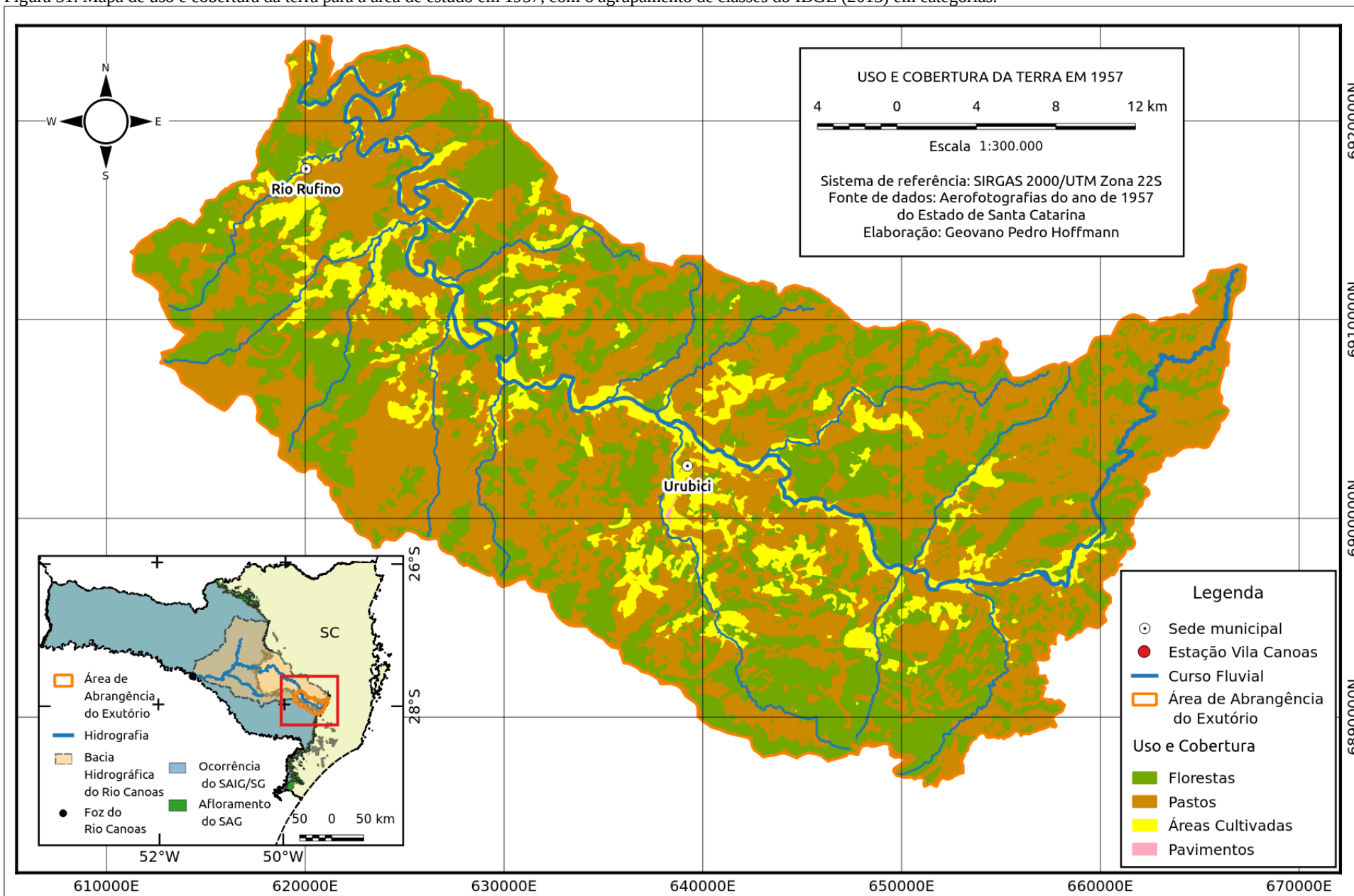
Por estas razões, a região de pesquisa é um caso particular dentro do contexto da formação socioespacial do planalto serrano de Santa Catarina. As modificações do uso e cobertura da terra no meio rural manifestaram os processos socioeconômicos e técnicos de diferentes escalas geográficas, em menor ou maior grau, para o período em questão. Na Figura 30 estão apresentados os gráficos dos tipos de uso e cobertura da terra, classificados em conformidade com o IBGE (2013) para os intervalos de aproximadamente 20 anos (1957, 1976, 1997 e 2017), cuja análise é realizada a seguir. Os mapas elaborados referentes a classificação do IBGE (2013) encontram-se nos apêndices A, B, C e D ao final deste trabalho.

4.2.1. Uso e cobertura da terra em 1957

De acordo com o gráfico do ano de 1957 (Figura 30), grande parte da bacia hidrográfica estava coberta por florestas (38,74%), com vegetação em estágio de clímax ou em regeneração, e áreas campestres (37,33%), incluindo pastagens “abandonadas” temporariamente e campo nativo. Os demais usos identificados estavam distribuídos em culturas temporárias (12,58%), pastagem (10,98%), área urbanizada (0,1%), água continental (0,31 %) e cultura permanente (0,05%).

Na representação do uso e cobertura da terra do ano de 1957, agrupado em quatro categorias (florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos), observa-se na Figura 31 que as áreas florestadas (38,8 % da área total) estavam situadas em locais de difícil acesso, em razão da elevada declividade (Figura 29) provocada pela descontinuidade geomorfológica entre as unidades geológicas Formação Botucatu, Formação Rio do Rasto, Formação Gramado e Grupo Serra Geral Indiferenciado, assim como não estavam sujeitas à técnica agrícola de rotação de culturas.

Figura 31. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1957, com o agrupamento de classes do IBGE (2013) em categorias.



Fonte: Elaboração própria.

Na década 1950, em Santa Catarina, a extração da madeira nativa da Floresta Ombrófila Mista mostrava indícios de decadência, com a redução das exportações e supressão dessa vegetação nas regiões Oeste, Meio-Oeste e Planalto Norte. Dessa maneira, o ciclo econômico madeireiro no Estado, que chegou a representar 70% de suas exportações no mercado nacional até o fim da década de 1960, passou a ser intensamente explorada no planalto sul catarinense, cujo beneficiamento era realizado em diversas serrarias, de proprietários gaúchos, e que utilizavam como mão-de-obra migrantes caboclos na condição de assalariados. A demanda proporcionada pelo crescimento dos centros urbanos do país, impulsionada pela construção civil, a exemplo de Brasília nessa época, permitiu à região, como reduto florestal, tornar-se a maior fornecedora de madeira no começo da segunda metade do século XX no Estado, na tentativa de superar a estagnação do tropeirismo e da pecuária (GOULART FILHO, 2007). Assim, em 1957, boa parte da vegetação original da Floresta Ombrófila Mista na área de estudo já havia sido extraída, o que possibilitou o avanço de pastagens e áreas campestres, estas últimas também utilizadas para a pecuária.

De acordo com Buratto *et al.*, (2013) *apud* Hanashiro (2015), durante o ciclo madeireiro na área de pesquisa, de 1950 a 1970, as serrarias totalizavam 34 unidades no município de Urubici e fez com que a população total aumentasse de 4.054 habitantes, em 1950, para 10.505 habitantes, em 1960. No mapa da Figura 31, a classe de pavimentos, constituída por áreas urbanizadas, apresentava tamanho reduzido na área de estudo (0,1% do total). A sede de Urubici era a mais expressiva em extensão, todavia, em 1960, a população rural era de 7.073 habitantes, ainda maior que a população urbana, de 3.342 habitantes. Já Rio Rufino, distrito de Urubici, apresentava 294 habitantes na área urbana e 1.744 habitantes no meio rural (IBGE, 1968). Urubici foi elevada à categoria de município no ano de 1957, desmembrado do município de São Joaquim (IBGE, 2017a), o que coincide com o seu rápido crescimento populacional ao longo dessa década.

A pecuária foi explorada como atividade econômica de

importância regional no Estado de Santa Catarina e, juntamente com os Estados do Rio Grande do Sul e Paraná, foi usada como economia complementar ao mercado interno brasileiro, tendo sido implantada no planalto norte e serrano no século XVIII (BRANDT, 2012). Assim, na Figura 31 esta atividade se encontra associada às categorias de pastos, na qual estão incluídas as classes pastagem e campestre, e que cobrem a maior parte do vale do Rio Canoas (48,4% da área total). O campo nativo está presente na bacia hidrográfica nos topos das elevações sobre as unidades geológicas Grupo Serra Geral Indiferenciado, Formação Gramado e Formação Rio do Rasto. Outras áreas campestres, em torno das florestas remanescentes e áreas cultivadas, estabelecidas nas vertentes da região de estudo, assim como na porção à jusante do vale, foram utilizadas para a pecuária extensiva¹³ das grandes propriedades. Conforme Peixer (1996) *apud* Goulart Filho (2007), os grandes proprietários de terras na região do Planalto Sul catarinense viam na extração de madeira, além de uma atividade rentável, destinada ao capital urbano-industrial, a expansão para as áreas de pastagem, tanto que o ciclo econômico pecuário continuou juntamente com o ciclo da madeira¹⁴.

Além da exploração florestal, outro reflexo da ampliação do crescimento demográfico e urbano nacional no planalto serrano, após a

13 Nas fotografias aéreas do ano de 1957 foi possível observar evidências de incêndios nas vertentes onde estavam situadas as áreas campestres e de pastagens. De acordo com Brandt (2012), as pastagens eram queimadas sazonalmente, no fim do inverno, para a renovação da vegetação e engorda do gado.

14 Em passagem, entre 1942 e 1943, pela Fazenda do Cedro, uma das maiores do Planalto Sul e que se estendia sobre a área de estudo, até então isolada de rede de comunicações viárias, Victor Antônio Peluso Júnior (1991) relata que o objetivo das fazendas era a criação extensiva de gado nas áreas de campo nativo, voltadas ao comércio com o litoral catarinense para o consumo de carne e couro, com a intermediação dos tropeiros. As terras do fundo do vale do rio Canoas, sob a propriedade da Fazenda do Cedro, eram utilizadas por arrendatários, parte oriunda das colônias italianas do litoral sul catarinense e parte formada por ex-agregados de fazendas, para a atividade agrícola, enquanto que a floresta de pinheiros de suas vertentes eram exploradas por madeiros, todos mantendo a sua relação com a fazenda.

década de 1940 (CORRÊA & GERARDI, 2002), foi a horticultura integrada ao circuito interno comercial do país. Em 1953, com as condições propícias de mercado, japoneses, com suas origens no Estado de São Paulo, iniciaram a atividade de comercialização de Urubici com Porto Alegre e a capital paulista, ampliando a atividade para outros mercados nas décadas seguintes. Outros agricultores familiares, com a sua prática agrícola local, viram no cultivo de hortaliças uma das únicas formas para se integrar a rede comercial nacional e romper com o seu isolamento espacial (ISRAEL, 1991). Ademais, a estrutura fundiária em pequena propriedade na planície do Rio Canoas; a fertilidade do solo nessa região; e a ocupação por descendentes de imigrantes de outras formações socioespaciais, principalmente vales litorâneos, como italianos e alemães, além de portugueses, afrodescendentes e caboclos, os quais dominavam as técnicas agrícolas necessárias para o cultivo em condições ambientais semelhantes de suas origens (MACHADO, 2016), foram fatores que viabilizaram a situação agrícola encontrada para o ano de 1957, apesar da distância de Urubici com algum centro urbano desenvolvido. Além disso, havia a falta de vias de comunicação terrestres eficientes, como relatado por Peluso Júnior (1991), tal como a ligação com a Capital do Estado catarinense, via BR-282, cuja pavimentação se deu apenas em meados da década de 1970 (GOULART FILHO, 2005).

Antes da modernização do espaço agrário, utilizavam-se técnicas agrícolas tradicionais no vale do Canoas (ISRAEL, 1991). A coivara ou agricultura itinerante era uma delas e consistia na queima de uma área florestada e o seu uso para cultivos temporários até o esgotamento da fertilidade natural, seguindo com o abandono da área e o desflorestamento de outra, de forma a estabelecer a vegetação em estágio sucessional e repor novamente a fertilidade para o posterior uso com lavoura, ou seja, incorporando a paisagem florestal na atividade produtiva da agricultura familiar (SIMINSKI *et al.*, 2011), prática comum neste período quando havia pouca influência da Revolução Verde. A coivara também explica o fato de parte das áreas cultivadas (12,7% da região de pesquisa) estarem localizadas, além da planície

aluvial cortada pelo Rio Canoas¹⁵, nas elevações da seção da bacia hidrográfica em estudo. O uso de práticas agrícolas tradicionais, aliadas à baixa fertilidade natural nas vertentes, como apontado por Caruso Júnior (1991), principalmente com solos cujo material de origem é proveniente das Formações Botucatu e Rio do Rasto, exigiam maiores extensões de terra, o que foi aproveitado no momento de derrubada da Floresta Ombrófila Mista durante o ciclo madeireiro, assim como ocorreu com a pecuária (FLORIANI & NETO, 2011).

4.2.2. Uso e cobertura da terra em 1976

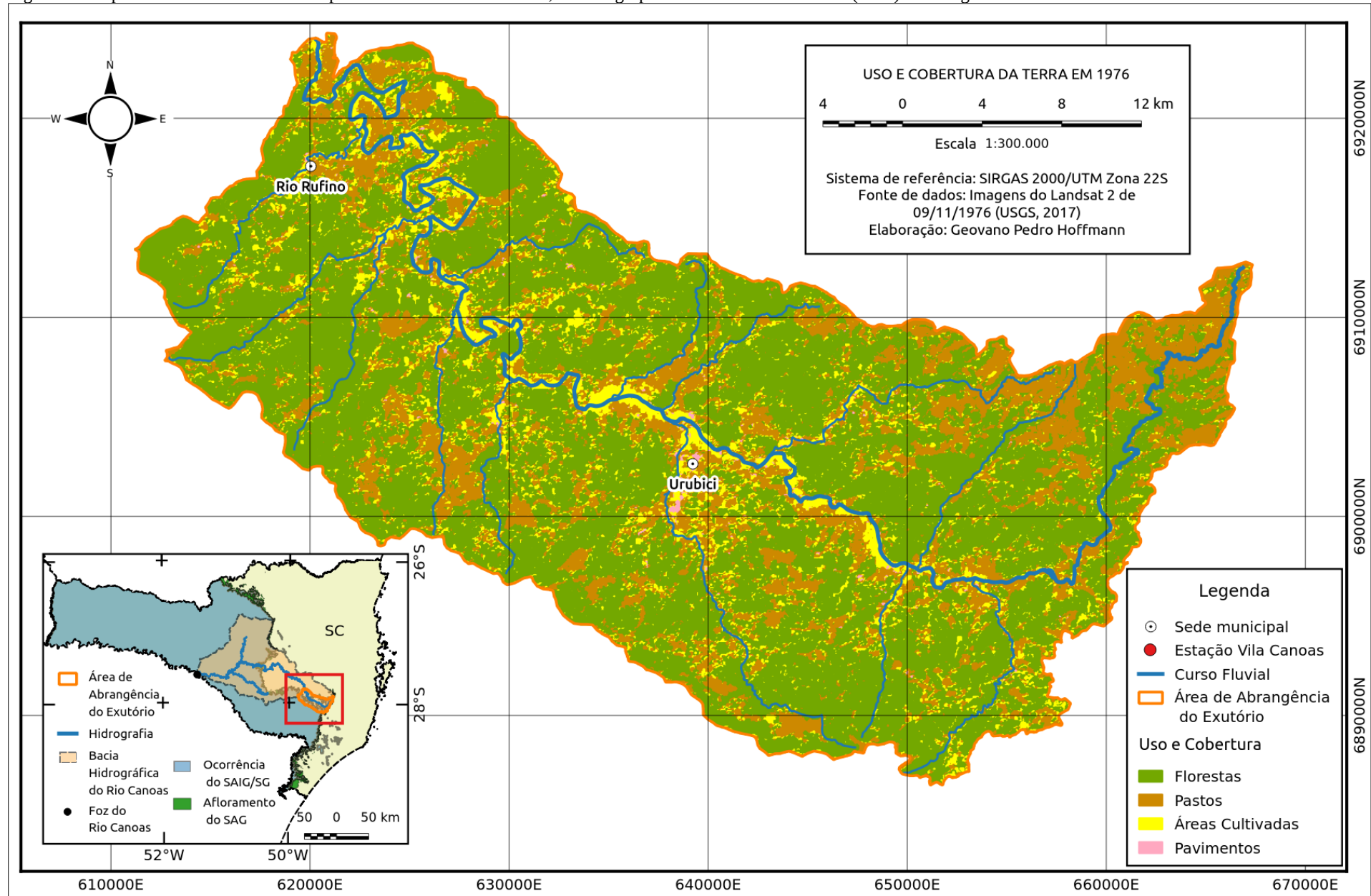
O gráfico do uso e cobertura da terra do ano de 1976 (Figura 30) indica, em relação ao ano de 1957, o aumento da classe florestal para 58,5% da região de estudo, principalmente nas elevações onde anteriormente constavam usos associados à classe campestre, única que diminuiu de tamanho, para 13,02%. Notam-se o aumento das classes pastagem (11,56%), cultura temporária (13,4%), área urbanizada (0,65%) e a inclusão da atividade de silvicultura (2,87%) no vale.

Com a supressão da Floresta Ombrófila Mista nos anos finais da década de 1960, acompanhada pela falta de reflorestamento e de restrições ambientais com a criação do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IDBF), a indústria de extração de madeira foi encerrada no Planalto serrano (GOULART FILHO, 2007). No mapa de uso e cobertura da terra de 1976, observa-se que a área de florestas que inclui as classes florestal e silvicultura, aumentou para 61,5% da área de pesquisa, no espaço cedido nos morros pelas atividades, atribuídas em 1957, à pastos (campestre, pastagem) e áreas cultivadas (cultura temporária e permanente). Essa mudança nas vertentes provocou a regeneração da vegetação, encontrando-se predominantemente em estágio sucessional. A silvicultura passou a ser incluída como nova atividade, correspondendo a 2,9% da área total do vale (Figura 32), introduzindo o pinus como espécie florestal exótica

15 Victor Antônio Peluso Júnior (1991) também relata que o Vale do Canoas era coberto pela floresta de araucárias e que nas suas confluências havia a ocorrência de planícies aluviais com solos férteis, ao contrário de suas imediações, que não eram indicadas para lavouras.

(FLORIANI & NETO, 2011).

Figura 32. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1976, com o agrupamento de classes do IBGE (2013) em categorias.



Fonte: Elaboração própria.

A modernização do campo, a partir da década de 1970, provocou profundas transformações na agricultura nacional. O processo foi baseado nos princípios da Revolução Verde, com a difusão de insumos químicos e mecânicos, que foram levados aos produtores rurais, tanto para aqueles situados em grandes quanto em pequenas propriedades, através do apoio do Estado. Dentre as políticas públicas voltadas para o espaço agrário, havia o mecanismo de financiamento agropecuário com o Sistema Nacional de Crédito Rural, que permitia a aquisição dos pacotes tecnológicos desenvolvidos pelo setor industrial. Assim, a tecnificação da produção agropecuária passou a ser integrada à cadeia produtiva do capital urbano industrial, articulada aos sistemas de financiamento e comercialização. Em Urubici, houve a modificação da agricultura familiar em pequena propriedade, na qual começaram a ser desenvolvidas atividades especializadas no intuito de atender os interesses mercadológicos, tais como o fumo, a olericultura, a maçã e o leite (CORRÊA & GERARDI, 2002).

Israel (1991) analisou os dados dos censos agropecuários do IBGE e verificou que o uso da força mecânica em Urubici aumentou de 0,86%, em 1960, para 45,72% de todos os estabelecimentos, sendo que o período em que mais houve a sua disseminação foi entre 1970 e 1975, passando de 106 para 578 estabelecimentos rurais. A força mecânica mais utilizada era a de tratores, havendo, em consequência, a redução da tração animal, porém, até a década de 1990, as duas formas ainda coexistiam. Para o mesmo período, de 1960 a 1985, a aplicação de adubos químicos aumentou de 23,96% para 75,59% das propriedades e o calcário era utilizado em 28,61% delas entre 1975-1985. Ressalta também que os cultivos para fins de mercado, como as hortaliças, obrigavam o uso de insumos industriais, o que só era possível com a política de crédito rural, capaz de conduzir os agricultores descapitalizados no custeamento das despesas de sua produção e a sua inserção no mercado consumidor nacional por meio da rede de comércio. Outras culturas comerciais também possuíam níveis de modernização, como era o caso do fumo e da maçã (esta com menor participação, com cerca de 5,37% da produção, em 1985). Outras culturas, por outro lado, eram utilizadas para a subsistência, como o feijão e o milho. Também na década de 1970 ocorre a ampliação e

diversificação do mercado consumidor através das Centrais Estaduais de Abastecimento (CEASA), como em Santa Catarina e na região Sudeste, pelas quais havia o escoamento de mercadorias.

À vista disso, a atividade agrícola tornou-se a economia preponderante e ocupou 13,5% da região de pesquisa (Figura 32). O seu padrão espacial foi modificado, reduzindo a sua presença nas elevações, em pequenas porções e mais distribuídas, ainda entremeadas pela presença de floresta em regeneração e junto às pastagens ainda existentes, combinação associada à técnica de coivara, isto é, ainda com a utilização de técnicas agrícolas tradicionais de uso do solo desde o fim do ciclo da madeira. Na planície, áreas começaram a ser cultivadas à jusante da área de estudo, onde atualmente encontra-se o município de Rio Rufino e pequena parte do município de Bom Retiro e, também, onde é facilitada a mecanização de lavouras, enquanto que ocorreu pequena redução no setor à montante.

O leite foi mais um dos produtos comerciais sugeridos pela modernização agrária para esta região, dado que a renda obtida era gerada ao longo de todo o ano e mantinha-se nos períodos entressafra. De um modo geral, o gado de corte, de pouco suporte técnico e baixa produtividade, ainda era mantido, de maneira extensiva, nas pastagens das elevações do vale do Rio Canoas¹⁶, na década de 1970, e a pecuária bovina leiteira estava localizada nas pequenas propriedades familiares no fundo do vale (ISRAEL, 1991).

No mapa da Figura 32, é possível observar que no setor à montante da planície do Rio Canoas, os pastos passaram a ocupar o

16 Dados do censo agropecuário de 1960 evidenciam que, para o município de Urubici, 6,46% das propriedades rurais (45 estabelecimentos com mais de 500 hectares) detinham cerca de 54,91% da área total do município (60.351 hectares), o que denotava elevada concentração fundiária. No censo agropecuário de 1975, no entanto, essa concentração tornou-se reduzida, havendo 3,6% propriedades (37 estabelecimentos agropecuários com mais de 500 hectares), com cerca de 33,99% da área total do município (34.592 hectares), ocorrendo o partilhamento hereditário em propriedades menores (ISRAEL, 1991).

espaço das áreas cultivadas de 1957. Entretanto, considerando o panorama geral da região de estudo, os pastos foram reduzidos para 24,6% da área total, valor condicionado principalmente pela redução da classe campestre nas vertentes, visto que a área de pastagem aumentou em relação ao período mapeado anteriormente, o que pode indicar que é mais uma das consequências do fim do ciclo madeireiro nessa região e das transformações do campo, com a ampliação da atividade semiextensiva para o fundo de vale.

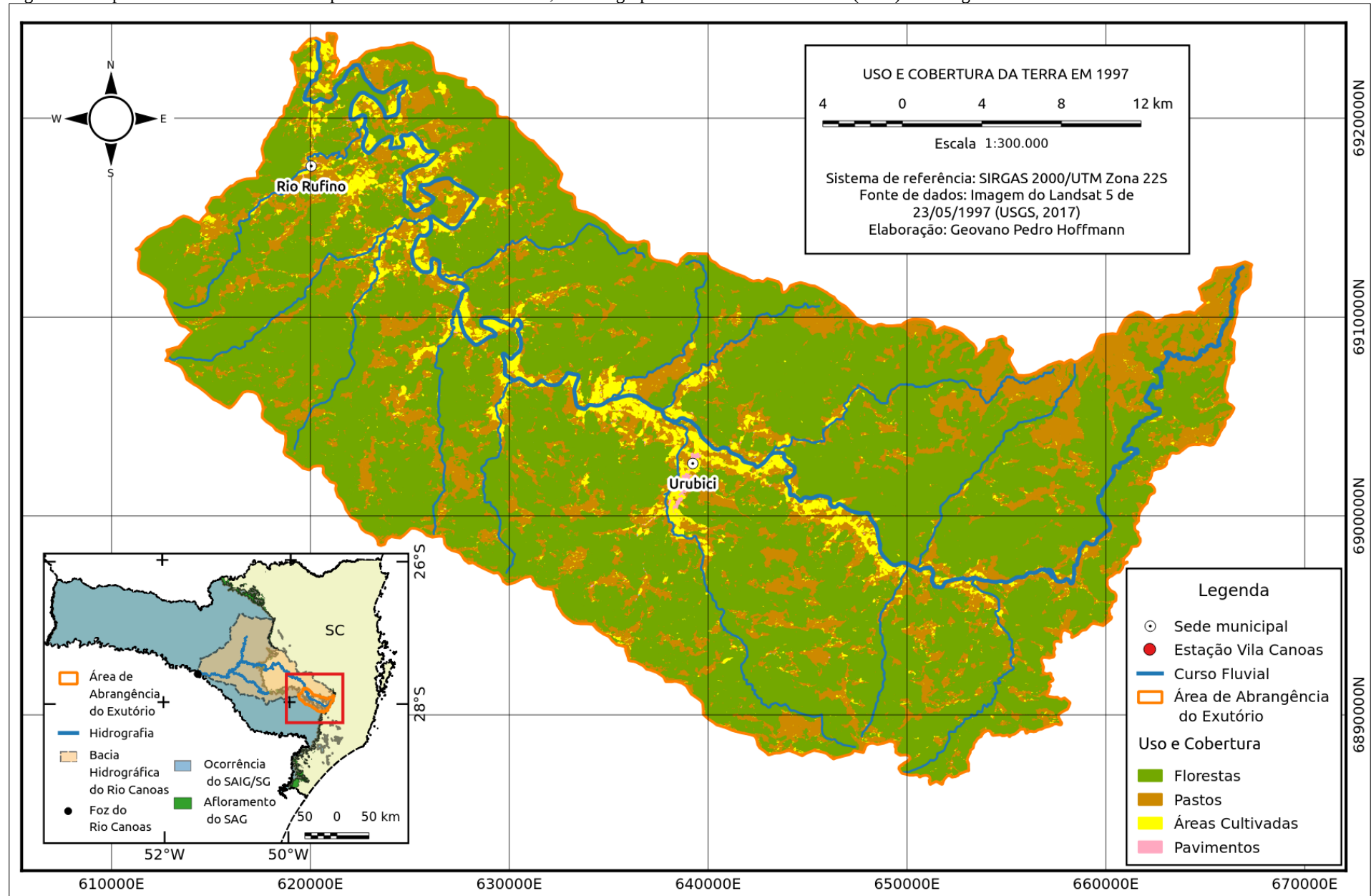
Enquanto em Rio Rufino a população rural (976 habitantes) e urbana (225) diminuiu, a população urbana (4.948 habitantes) e rural (6.112 habitantes) aumentou em Urubici (IBGE, 1982), ampliando a área de pavimentos para 0,3%. Os dados sugerem que os serviços urbanos em Urubici apresentaram um leve crescimento como resposta às novas modificações impostas ao campo, assim como em Rio Rufino, ainda um distrito e, possivelmente, mais afetado pelo fim do ciclo madeireiro e da falta de outras atividades econômicas, concentradas nas proximidades da cidade de Urubici.

4.2.3. Uso e cobertura da terra em 1997

O gráfico do ano de 1997 (Figura 30) mostra que as classes florestal (60,6%) e silvicultura (1,72%) tiveram pouca redução da sua área em comparação com 1976. As áreas de cultivo diminuíram significativamente, especialmente cultura temporária (5,78%). As classes pastagem (13,2%), campestre (17,21%) e área urbanizada (0,36%), apresentaram pequeno crescimento nas décadas seguintes.

No agrupamento em categorias de uso e cobertura da terra, as áreas cultivadas diminuíram pela metade (Figura 33), atingindo a menor proporção nos anos mapeados, com 6,6% da região de pesquisa, momento em que as atividades envolvendo lavouras deixaram de estar presentes nas elevações da bacia hidrográfica e passaram a ser praticadas unicamente no fundo de vale, principalmente na porção à jusante, onde encontrava-se o recém-instalado município de Rio Rufino, que tradicionalmente, desde 1957, apresentava o uso predominante de pastagens na planície do sistema hidrográfico do Rio Canoas.

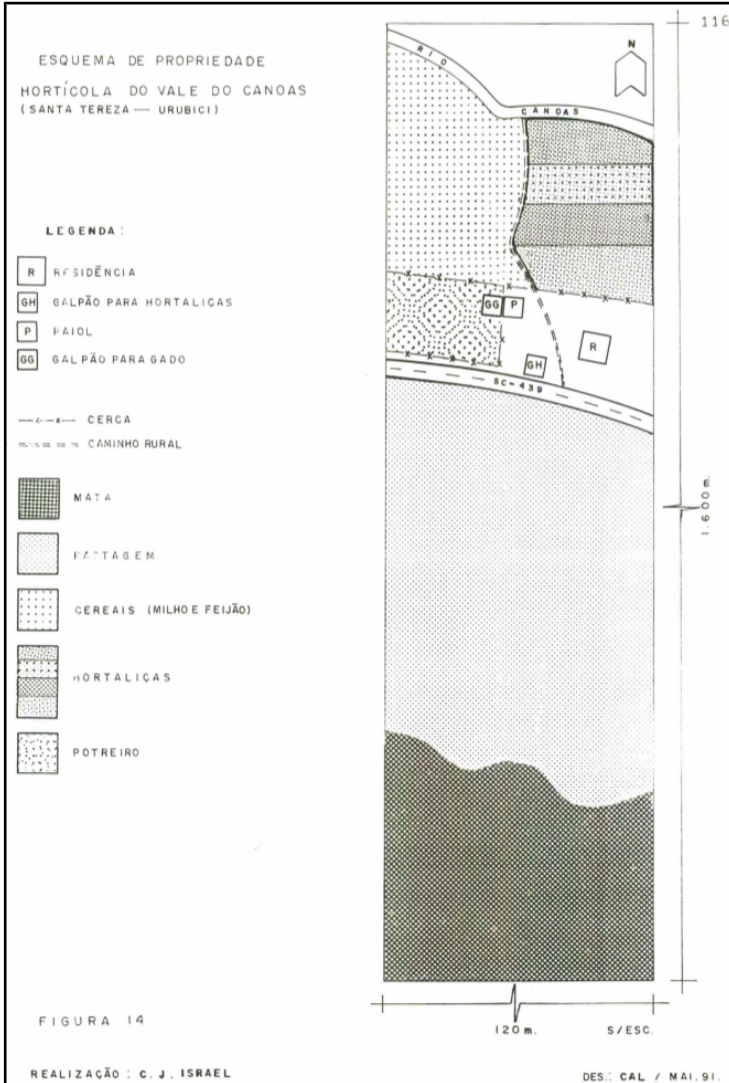
Figura 33. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1997, com o agrupamento de classes do IBGE (2013) em categorias.



Fonte: Elaboração própria.

Conforme Israel (1991), no início da década de 1990 os cultivos temporários estavam restritos à planície do Rio Canoas, em que a mecanização agrícola e os seus insumos ainda eram mais eficientes. Também relata que, em certas áreas, havia anteriormente a prática da lavoura e que, na época do seu estudo, passaram a ser utilizadas para pastagens ou crescimento da vegetação em estágio de sucessão (Figura 34).

Figura 34. Modelo de organização espacial de uso e cobertura da terra das pequenas propriedades situadas no fundo do vale do Rio Canoas, no início da década de 1990, situadas na área de estudo.



Fonte: Israel (1991, p. 116).

Nos censos agropecuários do IBGE, de 1960 a 1985, Israel (1991) observou a redução das áreas cultivadas em 30,84% e atribuiu à degradação dos solos nas vertentes pelos cultivos de subsistência, como o milho, que apresentou perda de 32,55% para o mesmo período, e o trigo, bem como ao incremento dos cultivos comerciais, como hortaliças e fumo, que exigem pouca extensão das propriedades. Outro fator a ser considerado nas modificações das áreas ocupadas por lavouras, desde a década de 1970, era a dependência pela expectativa dos agricultores na rede comercial em relação aos preços e à procura da safra antecedente. No caso de prejuízos, os produtores tendiam a diminuir a área de cultivos nos seus estabelecimentos. Além disso, realizava-se a rotação de culturas de verão, com hortaliças e milho, e de inverno, com o plantio de pastagens nestas mesmas áreas para a produção leiteira do gado bovino, salientando que em outras propriedades o solo era deixado em descanso, com conservação para a safra que viria a seguir.

Também contribuiu para a redução das áreas de cultivo na região de pesquisa o enfraquecimento do mercado consumidor e de incentivos estatais em tempos de recessão econômica. A partir dos anos 80, o Estado brasileiro foi abandonando os investimentos no planejamento nacional diante da crise econômica que se estabelecia, o que diminuiu significativamente a sua atuação (GOULART FILHO, 2007). No meio rural, Corrêa & Gerardi (2002, p. 111) atentam para os desdobramentos dessa conjuntura na década de 1990, momento em que continuava:

[...] a reorganização da economia mundial, expressa na onda neoliberal, associada à crise fiscal do Estado, enquanto agente viabilizador das políticas públicas para a agricultura.

No processo, conformou-se um ambiente de reestruturação tecnológica e de competição entre as empresas privadas, tanto no âmbito nacional como no internacional, com reflexos em todos os elos das diferentes cadeias produtivas, alcançando a agricultura familiar. Os juros altos, a elevada carga tributária, a inexistência de uma

política agrícola de reconversão, a baixa competitividade de seus produtos no mercado, passou a comprometer a reprodução daquele segmento, historicamente marginalizado pelas políticas públicas.

A redução da categoria pastos na planície da área de estudo (Figura 33), no comparativo com o ano de 1976, foi compensada com o crescimento do uso da terra das classes pastagem e campestre nas elevações, principalmente nas vertentes do município de Rio Rufino, o que representou 30,5% da região de estudo em 1997. Segundo Israel (1991), na configuração das propriedades rurais, as pastagens estavam presentes na porção intermediária das propriedades, junto ao Rio Canoas (Figura 34).

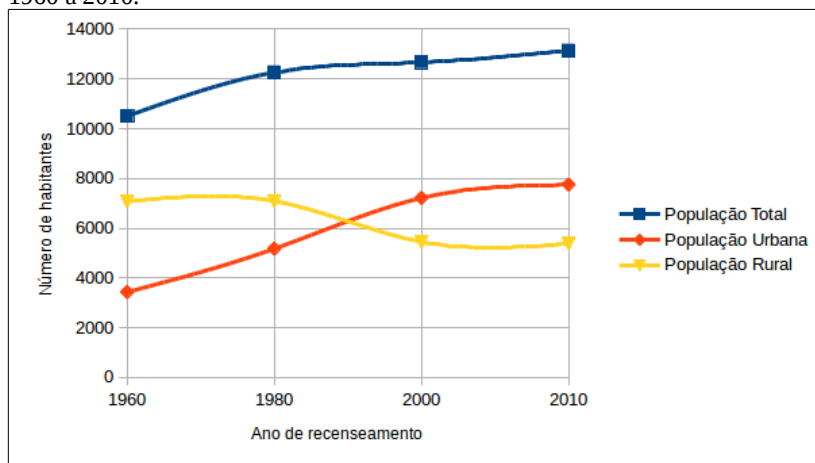
Como reflexo da decadência econômica da extração de madeira na década de 1970 e de restrições da legislação ambiental brasileira¹⁷, ocorre o crescimento da vegetação em regeneração desde o período analisado anteriormente. Nas elevações da área de estudo (Figura 33), as florestas passaram a ocupar locais que em 1976 havia áreas cultivadas, no entanto, ampliaram pouco o seu tamanho, aproximadamente para 62,4%, permanecendo sem ocorrência no fundo de vale, ao menos desde 1957, onde estão presentes as áreas cultivadas e pastos.

Na transição de 1976 para 1997, o cenário populacional tornou-se invertido pela primeira vez (Figura 35), com a população urbana (6.661 habitantes) maior que a população rural (3.591 habitantes) em Urubici (IBGE, 2017b). Rio Rufino, até então distrito de Urubici, foi

17 O Código Florestal de 1965 (BRASIL, 1965) deu início à proteção das florestas, prevendo o impedimento do corte da vegetação nativa com a definição das áreas de preservação permanente, tal como era o caso da Mata Atlântica, na qual está incluída a Floresta Ombrófila Mista, porém, o corte irregular da vegetação nativa, por diversas razões, ainda ocorreu. A proibição definitiva se deu com a criação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), no final da década de 1980 (BRASIL, 1989), além do Decreto 750, de 1993 (BRASIL, 1993), que proibiu o corte e supressão da floresta de Mata Atlântica, o que incentivou a exploração da silvicultura com pinus e eucalipto na área de estudo (MACHADO, 2016).

desmembrado e elevado à categoria de município, entretanto, a população rural (1.861 habitantes) continuou maior que a população urbana (553 habitantes) (IBGE, 2017a).

Figura 35. Evolução da população urbana, rural e total para a área de estudo de 1960 a 2010.



Fonte: IBGE (1968), IBGE (1982), IBGE (2017b) e IBGE (2017c).

Inferese como causas da mudança populacional na área de estudo, no intervalo de 1980 a 2000, a mecanização agrícola, iniciada na década de 1970, que exigia menos mão de obra no campo; a falta de terras em pequena propriedade no fundo de vale para o partilhamento hereditário das famílias (ISRAEL, 1991); a inexistência de políticas públicas voltadas para a permanência da população rural no campo; a situação econômica do país que afetava a produção agropecuária; além do processo de urbanização que já ocorria no país há algumas décadas e possibilitava o desenvolvimento do setor de serviços, como foi o caso, segundo Hanashiro (2015), da introdução do turismo. Os pavimentos aumentaram, ainda que pouco, somando 0,5% da área total da bacia (Figura 33), com o lento crescimento das cidades de Urubici e Rio Rufino.

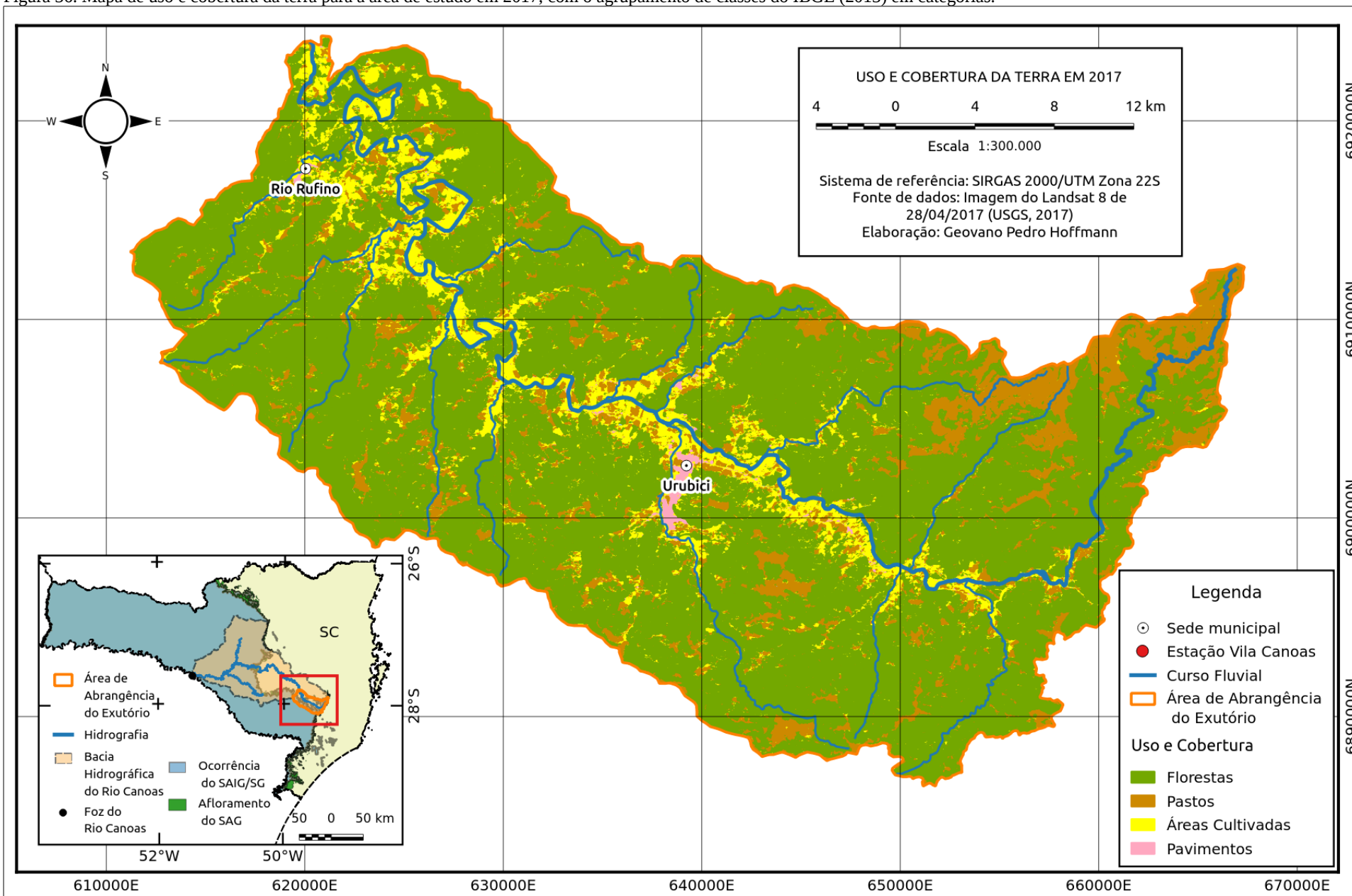
4.2.4. Uso e cobertura da terra em 2017

Em 2017, segundo o gráfico da Figura 30, com a classificação do IBGE (2013), a cobertura florestal aumentou para 63,06% e a silvicultura para 4,97%. Pastagens diminuíram quase pela metade da área, passando para 6,7%, e as áreas campestres diminuíram para 10,72%. As classes cultura temporária e cultura permanente aumentaram, respectivamente, para 10,51% e 2,97%, bem como a área urbanizada que representa 0,69% da área total da bacia.

Considerando as quatro categorias de uso e cobertura da terra (Figura 36), a de pastos teve a maior redução no comparativo com o ano de 1997, com quase metade (17,5%) do que era anteriormente, mas ainda assim é maior que as áreas cultivadas. A participação de pastagens é maior no fundo de vale, sendo menor nas elevações, enquanto que os topos de morro continuam com campo nativo¹⁸. A pecuária extensiva, com gado de corte, demonstra que nos dias de hoje não é mais uma atividade rentável como já foi em 1957 para a área de estudo, diferentemente do que ocorre com as áreas cultivadas e atividades de turismo e lazer. Outro aspecto é que os pastos continuam junto às pequenas propriedades na planície do Rio Canoas, voltados para o uso do gado na produção leiteira.

18 Gomes (2009) coloca que, no momento atual, existem interferências humanas que modificam os campos naturais, como desflorestamento, pecuária extensiva e queimadas, assim como a presença dos chamados campos antrópicos, provocados pelo desflorestamento, e campos naturais em sucessão. Acrescenta também que incêndios reduzem o avanço de florestas, mantêm a condição campestre e as transições abruptas com as florestas.

Figura 36. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 2017, com o agrupamento de classes do IBGE (2013) em categorias.



Fonte: Elaboração própria.

As florestas na época atual são de interesse ao turismo rural, no sentido de promover o contato da população residente em médios e grandes centros urbanos com o ambiente em conservação, ou seja, disposto como patrimônio natural mercantilizado através de atividades de lazer e turísticas (CORRÊA & CORRÊA, 2006). Usos e coberturas nas vertentes da região, como áreas cultivadas e pastos, ainda continuam inviáveis, pelas razões já citadas na análise da situação da década de 1990, como condicionantes naturais (solos e declividade) e socioeconômicos (insumos técnicos não adaptados às características das elevações e restrições ao corte da Floresta Ombrófila Mista). A porção sudeste da região de estudo também é protegida pelo Parque Nacional de São Joaquim, criado por decreto em 1961, e teve ampliada a sua abrangência no Vale do Canoas no intuito de preservar a vegetação remanescente de araucárias, realizar a educação ambiental e a visitação (ICMBIO, 2017). O papel das florestas também tem o significado de promover a permanência das águas subsuperficiais na bacia hidrográfica por maior tempo, além da recarga subterrânea, garantindo a disponibilidade para o abastecimento urbano, dessedentação de animais e irrigação das áreas cultivadas do fundo de vale.

Dentro disso, a categoria florestas aumentou para 68,1% no ano de 2017 (Figura 36), em função também do aumento da atividade de silvicultura nas elevações, em locais até então com a cobertura florestal em clímax, ou em regeneração, ou que eram utilizados para pastagem em 1997. Ainda não há a sua ocorrência nos fundos de vale, desde os anos finais da década de 1950.

As áreas cultivadas foram ampliadas para 13,8%, ocupando quase toda a planície da área de estudo, sendo entremeadas com poucas áreas de pastos situadas em pequenas propriedades. A categoria também está presente novamente, em pequenas porções, nas elevações e próximas da planície. O retorno dos cultivos para as elevações pode ter ocorrido em função da procura por mais áreas de lavoura, uma vez que a produção agrícola tornou-se maior, assim como a demanda pelo mercado consumidor, a partir do crescimento contínuo dos grandes e médios centros urbanos, especialmente no Sul e Sudeste, acompanhando o crescimento econômico do país nos últimos anos e ao programa de

crédito rural para a agricultura familiar, iniciado em 1999 (MATTEI, 2007).

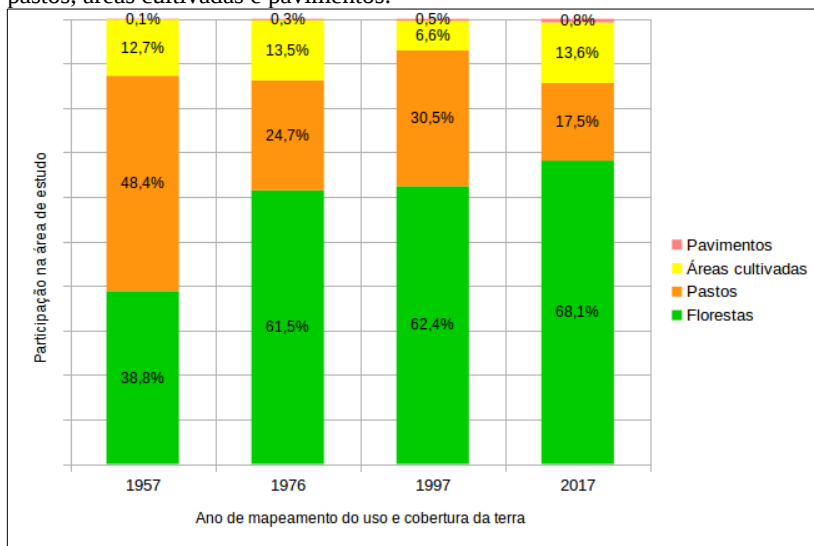
Dentre os novos cultivos especializados, na participação do circuito produtivo, além daqueles já implantados no passado e que permanecem na produção agrícola, consta a introdução do vime em Rio Rufino e Urubici (RECH, 2006). Nas vertentes, os cultivos passaram a ter o manejo do solo com o investimento em insumos químicos que permitem a rápida reposição da fertilidade, substituindo a técnica de coivara. No entanto, para irrigação, as lavouras das vertentes têm menos acesso a cursos d'água abundantes que possam permitir a sua dispersão. Além disso, como já mencionado, as vertentes apresentam escarpas de elevada declividade em diferentes trechos (Figura 29), o que ainda representa um obstáculo à prática ligada à agricultura convencional.

A população rural manteve-se estável na região (3.633 habitantes em Urubici e 1.748 habitantes em Rio Rufino), enquanto que a população urbana, apesar do crescimento (7.066 habitantes em Urubici e 2.436 habitantes em Rio Rufino) (IBGE, 2017c), apresenta leve queda no intervalo entre 2000 e 2010 (Figura 35), movimento registrado desde o censo demográfico de 1980 ao se observar os dados de população total, que em 2010 chegou a 13.135 habitantes, a maior do período em análise. Nota-se a expansão horizontal das cidades (Figura 36), especialmente a de Urubici, de modo que os pavimentos representam 0,8% da área da região de estudo.

4.2.5. Síntese das modificações do uso e cobertura da terra

A análise do panorama geral das modificações das quatro categorias de uso e cobertura da terra (florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos) para o período de 1957 a 2017 permite a identificação de semelhanças e diferenças para os quatro cenários mapeados (Figura 37).

Figura 37. Síntese das modificações com agrupamento da classificação do uso e cobertura da terra do IBGE (2013), de 1957 a 2017, nas categorias florestas, pastos, áreas cultivadas e pavimentos.



Fonte: Elaboração própria.

Nas elevações, onde encontra-se o SAIG/SG, havia o predomínio da categoria pastos, seguida das categorias florestas e áreas cultivadas, no ano de 1957. Em 1976, houve a redução da participação das categorias pastagem e áreas cultivadas em detrimento do avanço das florestas, as quais passaram a cobrir grande parte das vertentes, processo que se intensificou até o ano de 2017, quando houve novamente o retorno de áreas cultivadas em pequenas porções.

Por outro lado, na planície aluvial do vale estavam concentrados em 1957 as categorias pastos e áreas cultivadas, sem a presença de florestas e, de forma incipiente, a categoria de pavimentos. No entanto, em 1976, os pastos foram cedendo espaço às áreas cultivadas e passou a haver o crescimento da categoria pavimentos. Em 1997, houve novamente o aumento da categoria pastos e redução das áreas

cultivadas, situação que se inverteu no ano de 2017. Verifica-se que o crescimento da classe pavimentos é contínua e não há, na escala de mapeamento adotada para a classificação de uso e cobertura da terra, em 1:50.000, a identificação da categoria florestas no fundo de vale para todo o período de estudo.

As mudanças socioeconômicas influenciaram a dinâmica do uso e cobertura da terra, de modo que o ano de 1957 é o que apresenta, quantitativamente, em relação à presença da categoria de florestas, maior degradação ambiental, com apenas 38,8% de área (Figura 37). A partir de 1976, as florestas passaram a ganhar área, atingindo, em 2017, 68,1% de cobertura, condição ambiental mais próxima do ideal (de uma área totalmente coberta por florestas), em termos de extensão em área na região de pesquisa para as últimas seis décadas.

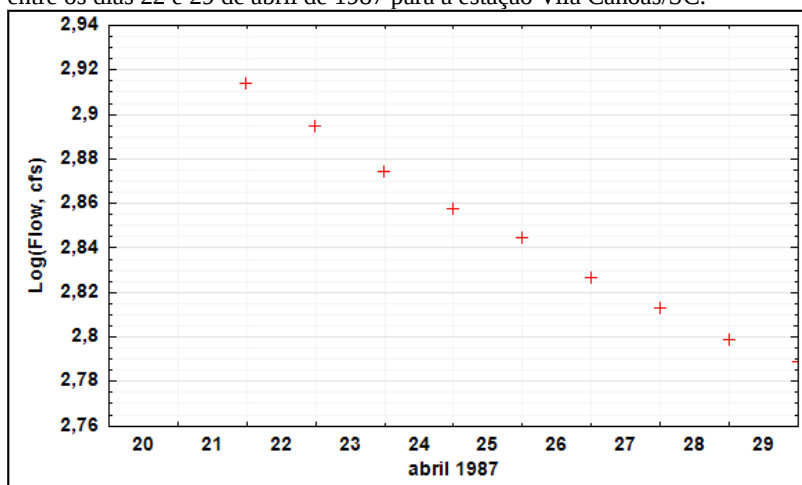
4.3. ANÁLISE DA ESTIMATIVA DE RECARGA E DESCARGA DE ÁGUAS

Para a estimativa da recarga e descarga de águas subterrâneas do SAIG/SG na área de estudo foram obtidos os parâmetros índice de recessão (k), coeficiente de recessão (a) e índice máximo do escoamento de base ($BF_{máx}$), os quais são apresentados a seguir.

Para o cálculo do índice de recessão (k), foi definido um período mínimo de 15 dias de recessão, tomando como critério a recomendação de Rutledge (1998) de considerar entre 10 e 20¹⁹ dias, para todas as estações de cada ano, de 01/06/1957 a 31/05/2017, foram identificados 116 períodos de recessão. Destes, foram selecionados 29 intervalos de recessão representativos, valor dentro do limite máximo sugerido por Rutledge (1998), com base na linearidade para o gráfico da vazão (ft^3/s) pelo tempo (dias), em escala semilogarítmica, para os dados hidrológicos da área de estudo (como no exemplo da Figura 38).

19 Conforme Rutledge (1998) a quantidade de recessões depende do tamanho da série histórica de dados, visto que se o número mínimo de dias for muito alto, poucos períodos de recessão serão identificados em detrimento de outros que serão descartados na análise. Para uma série de 15 a 40 anos de dados, por exemplo, o intervalo mínimo de 10 a 20 dias é considerado suficiente.

Figura 38. Exemplo de padrão linear para um período de recessão ocorrido entre os dias 22 e 29 de abril de 1987 para a estação Vila Canoas/SC.



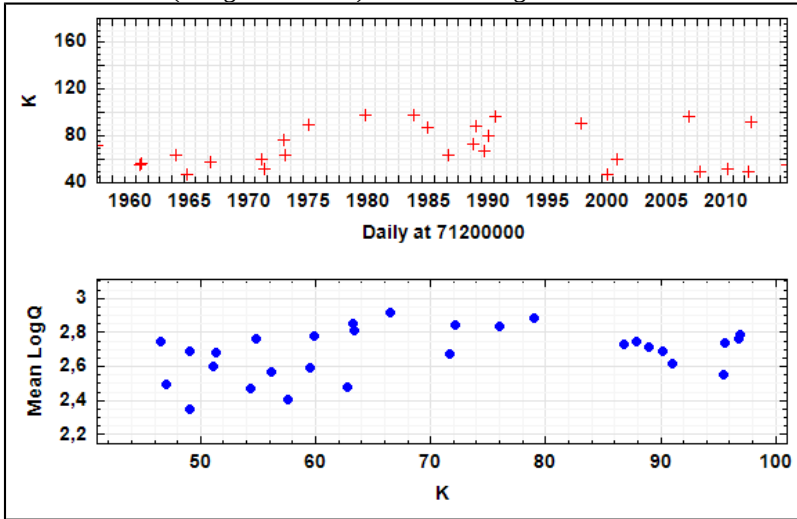
Fonte: Elaboração própria.

No caso da estação Vila Canoas/SC, foi utilizado o valor de 394,21 mi^2 (1021 km^2) no cálculo da Equação 4 e o limite da variação do valor de log resultou em 3,3 dias, isto é, o tempo mínimo em que o escoamento superficial ainda contribui para a vazão total. 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 foram descartados, especialmente para períodos de recessão muito longos e períodos de recessão muito curtos, o que fez a duração para a linearidade ou a sua aproximação para os segmentos selecionados variar entre 5 e 15 dias contínuos.

Todos os períodos de recessão identificados na série histórica de vazão (1957-2017) e os seus respectivos valores k , estimados pela Equação 2, encontram-se na Figura 39. Nela, observa-se no gráfico da série histórica de dados da área de estudos que os valores de k variam de

46 a 96 dias/logQ, enquanto que no gráfico em escala logarítmica, os valores de k variam de 2,34 a 2,91, o que é explicado pela característica de não-linearidade absoluta, como apontado por Rutledge (1998).

Figura 39. Gráficos com índices de recessão individuais (k), expressos em dias, plotados em função da data da série histórica de vazão (1957-2017) da estação Vila Canoas/SC (código 71200000) e em escala logarítmica de vazão.

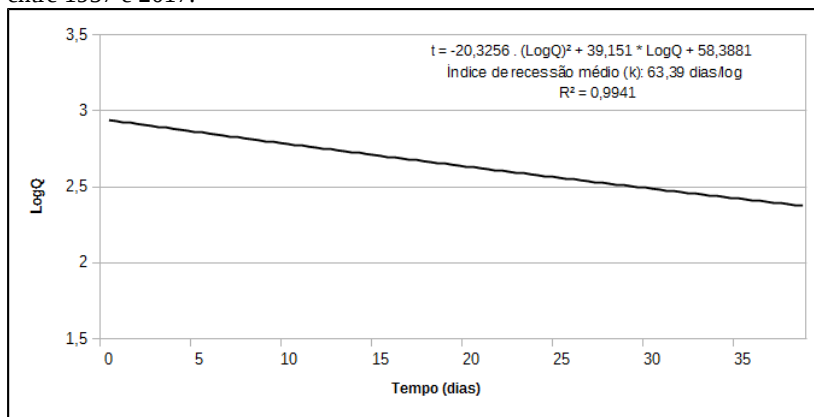


Fonte: Elaboração própria.

Ao final, o modelo RECESS permitiu, através da Equação 3, a construção da curva mestra de recessão com base no valor individual do índice de recessão k , em escala logarítmica, para os 29 períodos de recessão selecionados (Figura 40). Na equação apresentada, são encontrados os valores dos coeficientes A , B e C , fornecidos automaticamente pelo RECESS. O coeficiente de determinação (R^2), de 0,9941, demonstra que o modelo de regressão exponencial explica em 99,41% das vezes os valores da amostra de recessões selecionadas da Figura 39, isto é, representados com uma linha de tendência de sutil curvatura no gráfico. O valor do índice de recessão médio encontrado para esses períodos foi de 63,39 dias/logQ, utilizado como parâmetro no

método do deslocamento da curva de recessão no RORA.

Figura 40. Gráfico de vazão, em escala semilogarítmica, em função do tempo, em dias, com linha de tendência exponencial da curva mestra de recessão para os índices de recessão (k) dos períodos selecionados da estação Vila Canoas/SC entre 1957 e 2017.



Fonte: Elaboração própria.

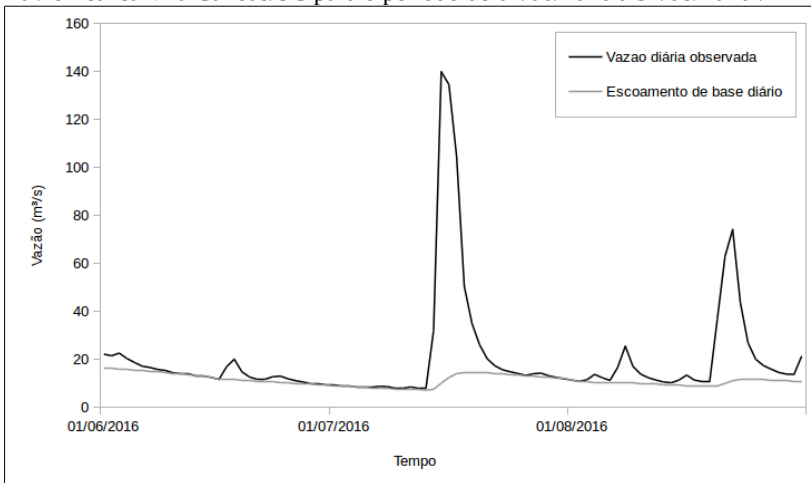
O valor estimado pelo coeficiente de recessão (a) no Groundwater Toolbox para a série de dados foi de $0,977 \text{ dia}^{-1}$ para os períodos de recessão avaliados da série histórica de dados da estação Vila Canoas/SC (1957-2017). O valor de k convertido em coeficiente de recessão encontrado foi de $0,984 \text{ dia}^{-1}$, o que permite confirmar a aproximação satisfatória ao resultado gerado pelo método de Eckhardt (2008), em conformidade com os dados de vazão disponíveis para a estação da área de estudo, em situação semelhante demonstrada na Figura 25.

Como os dois métodos utilizaram 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 $0,980 \text{ dia}^{-1}$. Esse dado foi utilizado mais a frente para o cálculo

do índice máximo do escoamento de base ($BFImáx$), para o filtro de Eckhardt e no método do deslocamento da curva de recessão no RORA. Considerando o coeficiente de recessão como de $0,980 \text{ dia}^{-1}$, o $BFImáx$ resultou no valor de 0,510 pelo método de Collischonn & Fan (2013).

Um exemplo do resultado da separação do hidrograma com os dados de vazão de 1957 a 2017 está ilustrado na Figura 41, em que é mostrado o gráfico com a vazão diária observada na estação fluviométrica Vila Canoas/SC e o escoamento de base diário estimado pelo filtro de Eckhardt (2005), no período de 01/06/2016 a 31/08/2016, empregado no Groundwater Toolbox.

Figura 41. Separação do hidrograma com dados de vazão da estação fluviométrica Vila Canoas/SC para o período de 01/06/2016 a 31/08/2016 .



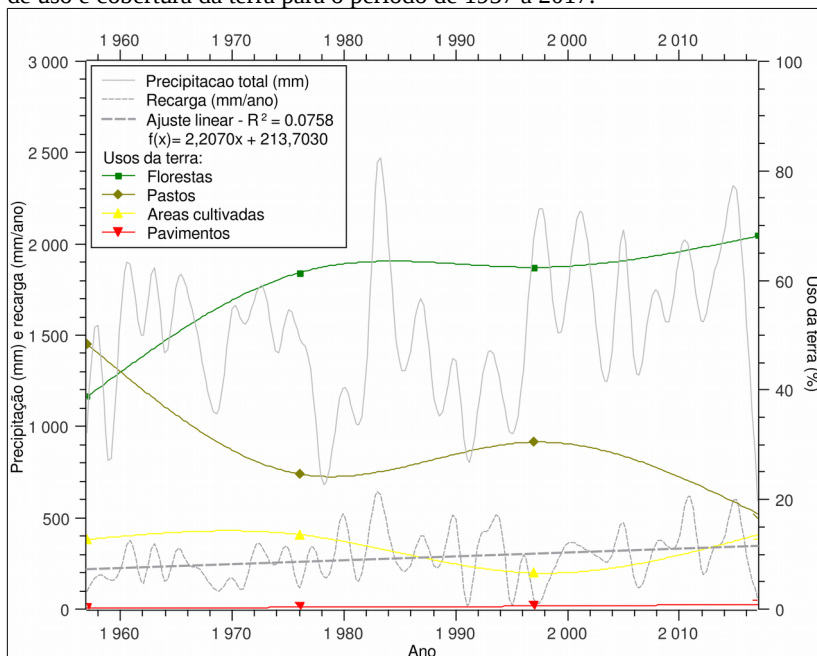
Fonte: Elaboração própria.

4.3.1. Recarga de águas subterrâneas do SAIG/SG frente à dinâmica de uso e cobertura da terra

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 42.

Figura 42. Gráfico da precipitação total anual, recarga subterrânea e categorias de uso e cobertura da terra para o período de 1957 a 2017.

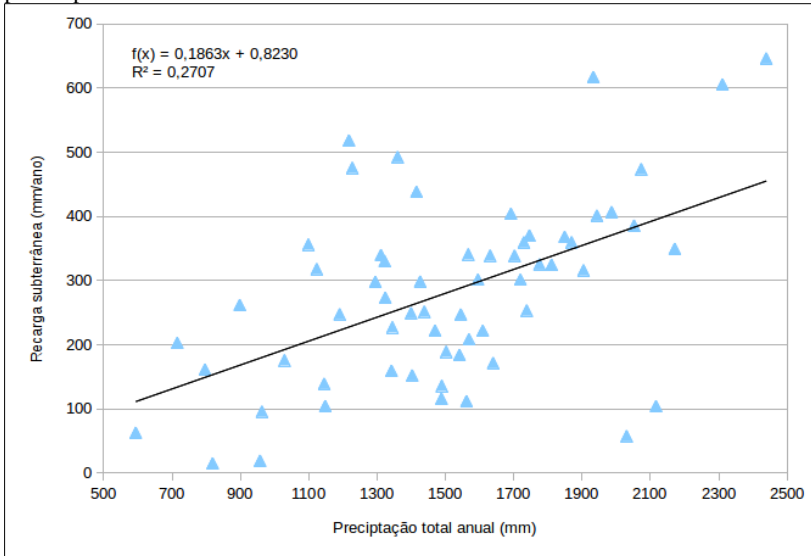


Fonte: Elaboração própria.

Essa correspondência linear é verificada no gráfico da precipitação pela recarga (Figura 43), o que sugere duas hipóteses. Uma delas é que a descarga de águas subterrâneas pode estar ocorrendo dentro do período de um ano em que também ocorre a recarga. Isso pode ser possível caso as velocidades de percolação nas rochas sejam altas, tanto nas fraturas do Grupo Serra Geral Indiferenciado e Formação Gramado, quanto pela porosidade da Formação Botucatu. Outra hipótese levantada é que pode estar atrelado ao fato de que quanto maiores e mais

persistentes forem as chuvas, maiores serão também a infiltração e a recarga de águas, aumentando, por sua vez, a carga hidráulica no SAIG/SG, o que pode, conseqüentemente, aumentar os volumes de água que afloram nas nascentes em períodos de recessão.

Figura 43. Correlação entre a precipitação total anual e a recarga subterrânea para o período de 1957 a 2017.



Fonte: Elaboração própria.

Outro ponto a ser destacado é que os dados de recarga, estimados a partir da separação do hidrograma, não apresentam resposta hidrológica imediata na descarga de águas subterrâneas. Isso ocorre em virtude do tempo de residência das águas no sistema hidrogeológico, como é o caso do SAIG/SG, que inicia com a sua infiltração em cada tipo de cobertura do solo em superfície e que termina com o armazenamento e a sua saída, na forma de nascentes. Apesar de sua importância, a avaliação do tempo de residência das águas subterrâneas do SAIG/SG não foi pretensão da presente pesquisa.

No primeiro cenário 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 4) foi de 217,34 mm/ano e a sua porcentagem da precipitação total anual foi de 14,52%. No comparativo aos demais cenários da Tabela 4, nota-se que o valor médio da recarga subterrânea entre 1957 e 1976 foi o menor dos últimos 60 anos (Figura 42), mesmo com a maior precipitação total média (1497,35mm) em relação ao cenário 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 (Figura 31) e 1976 (Figura 32), reduziram a capacidade de infiltração ao substituírem as florestas em combinação à atividade madeireira.

Tabela 4. Valores médios de precipitação total, recarga anual média a partir do método do deslocamento da curva de recessão e participação da recarga média a partir da precipitação total para os períodos de análise de 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 própria.

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 4) foi de 299,72 mm/ano e a sua porcentagem da precipitação total anual foi de 22,42%. Em relação ao cenário 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 42), 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 33).

Da mesma maneira, pode-se inferir que a precipitação tem também a sua importância na recarga, em determinados momentos, mais do que o tipo de uso e cobertura da terra. 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 a de usos e coberturas da terra com áreas cultivadas e pastos. O cenário de 1976 a 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, no qual o vale é aberto e com condições climáticas que podem ser diferentes do interior da região em questão, é um fator que pode interferir na interpretação pelo comparativo com os dados de estimativa da recarga.

O cenário de 1997 a 2017 (Tabela 4) apresentou valores de recarga subterrânea que variaram de 57,47 mm/ano a 616,86 mm/ano. A recarga anual média foi a maior de toda a série histórica de dados, de 306,76 mm/ano, e a participação da recarga média a partir da precipitação total foi menor em comparação com o cenário de 1976-1997, com 17,45%, dado o aumento da precipitação total média (1728,27mm). O pequeno aumento da recarga anual média em relação ao período de 1976-1997 é explicado pelo aumento das áreas florestais sobre a categoria de pastos, existentes em 1997 (Figura 42) nas elevações em que se encontra o SAIG/SG (Figura 33), os quais tornaram-se menos expressivos em extensão nessas áreas no ano de 2017 (Figura 36).

A linha de ajuste linear para a recarga subterrânea anual (Figura

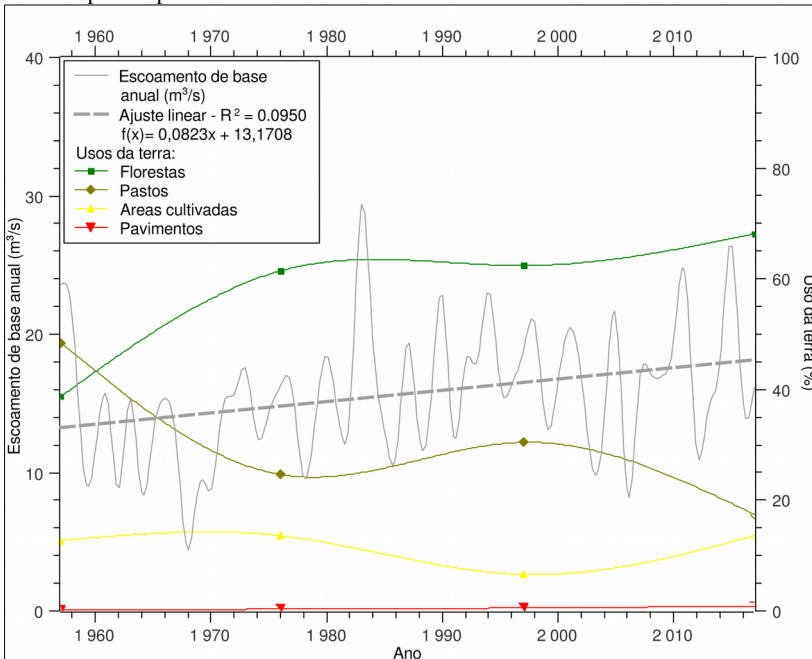
42) mostra uma tendência de aumento para o período de 1957 a 2017. A elevação contínua da precipitação aliada à expansão das florestas em áreas em que ocorria a atividade com pastos e áreas cultivadas são fatores que justificam os dados encontrados com o método do deslocamento da curva de recessão no RORA. À vista disso, a resposta hidrológica da tendência geral de aumento de recarga anual é percebida na descarga de águas subterrâneas, o que é explicado no tópico seguinte.

4.3.2. Descarga de águas subterrâneas do SAIG/SG frente à dinâmica de uso e cobertura da terra

A estimativa da taxa de descarga de águas subterrâneas foi obtida com os valores do escoamento subterrâneo médio, no período de 20 anos de mudança de uso da terra, comparados com a taxa de recarga de águas subterrâneas, aqui chamada de recarga média a partir da precipitação total anual. Dessa forma, foi possível verificar se houve ou não a aceleração do armazenamento de águas no sistema hidrológico/hidrogeológico para a área de estudo a partir da média aritmética dos valores de escoamento de base obtidos pela separação do hidrograma.

A Figura 44 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 de vazão subterrânea elevados, para as condições ambientais naquele momento 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. Sob uma única área de drenagem, as variáveis que explicam 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 44. Gráfico do escoamento de base anual e categorias de uso e cobertura da terra para o período de 1957 a 2017.



Fonte: Elaboração própria.

Há um padrão de diminuição do *BFI*_{máx} anual de 1957 até o início da década de 1970, com valores de 0,336 a 0,494 até 1976 (Figura 45). A estimativa do escoamento de base anual reflete essa variação, com o valores entre 4,4 m^3/s a 23,6 m^3/s (Figura 44) e com valor médio de 13,41 m^3/s (Tabela 5). Desde 1957, ocorria a exploração florestal nessa região, como mostrado no mapa de uso e cobertura da terra do referido ano, havendo ainda a participação da categoria florestas em 38,8% da extensão da área total, mas com pastos em 48,4% e áreas cultivadas em 12,4% (Figura 31). A extração de madeira perdurou até o começo da década de 1970, quando então tornou-se uma atividade economicamente inviável pelo seu esgotamento, provocando a redução da recarga subterrânea. Os dados médios de descarga de águas

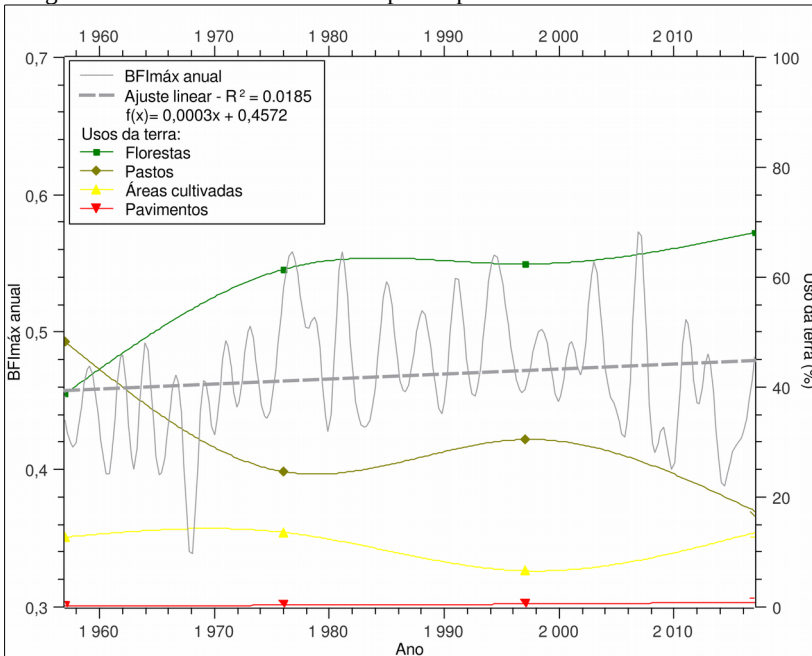
subterrâneas nesse período são os menores de toda a série histórica de dados, semelhante ao período de 2001-2009. Tendo em vista que houve maior precipitação total média durante esse espaço de tempo, em relação ao cenário seguinte, de 1976 a 1997, quando ocorreu a diminuição da precipitação total média e aumento da recarga subterrânea (Tabela 4), infere-se o predomínio de pastagens como causas para essa situação.

Tabela 5. Valores médios do escoamento 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 (m³/s)
1957-1976	13,41
1976-1997	16,76
1997-2017	17,0

Fonte: Elaboração própria.

Figura 45. Gráfico do índice máximo do escoamento de base (*BFImáx*) e categorias de uso e cobertura da terra para o período de 1957 a 2017.



Fonte: Elaboração própria.

Entre 1976 e 1997, o *BFImáx* oscilou aproximadamente de 0,430 a 0,556 (Figura 45). Por sua vez, o escoamento 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 (Figura 44). 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 5). As áreas que foram abandonadas pela atividade madeireira deram a lugar à vegetação em estágio sucessional, com 61,5% da área total, em 1976 (Figura 32), e 62,4%, em 1997 (Figura 33). Da mesma maneira, essa situação foi proporcionada também pela restrição das áreas cultivadas no fundo do vale (com 13,5%, em 1976, e 6,6%, em 1997) e pastos (com 24,7%, em 1976, e 30,5%, em 1997), o que denota melhor infiltração e aumento da recarga subterrânea (Tabela

4), como demonstrado nas elevações da região nos mapas de uso e cobertura da terra de 1976, com a categoria florestas em 61,5% da área total, e 1997, com 62,4% da área total.

De 1997 a 2017, o padrão do *BFI*_{máx} apresentou aumento de valores altos, de até 0,576, intercalados com valores cada vez menores, atingindo 0,395 (Figura 45). No entanto, o escoamento subterrâneo apresentou diminuição durante o período 2001-2009, variando entre 8,32 m³/s e 21,5 m³/s, enquanto que houve o retorno do aumento dos anos com maiores e menores valores de vazão a partir de 2010, com amplitude de 11,61 m³/s a 26,57 m³/s (Figura 44). Para todo o cenário, o escoamento de base anual médio foi de 17,0 m³/s (Tabela 5), 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, com a categoria florestas em 68,1%, e, principalmente no fundo de vale, pastos em 17,5% e áreas cultivadas em 13,6% (Figura 36), permitiu o maior incremento da recarga subterrânea para todo o período de 1957-2017 (Tabela 4) e, em consequência, da descarga de águas para os cursos fluviais.

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 44) sugere que a tendência é de aumento da descarga de águas subterrâneas nos cursos fluviais da região de pesquisa para o período das últimas seis décadas, assegurado pelos valores de cada cenário de 1957 a 2017 da Tabela 5. O ajuste linear do *BFI*_{máx} anual (Figura 45) também demonstra a tendência de aumento, de aproximadamente 0,46 em 1957, para 0,48, em 2017. Isso indica que a expansão das florestas nas vertentes onde constavam atividades humanas que facilitavam a conversão da precipitação em escoamento superficial, como pastagem e agricultura, permitiu o aumento da capacidade de infiltração e armazenamento, havendo como resposta hidrológica o aumento da descarga de águas subterrâneas.

4.3.3. Velocidade média do escoamento superficial frente à dinâmica de uso e cobertura da terra

A estimativa da velocidade média do escoamento superficial permite confirmar, indiretamente, o comportamento da descarga de águas subterrâneas a partir da recarga. Maiores velocidades médias do escoamento superficial indicam menor capacidade de infiltração e são condicionados pelos tipos de cobertura, para cada uso da terra, e declividade, correspondendo, portanto, à relação entre velocidade média do escoamento superficial e recarga subterrânea. Os dados de escoamento superficial gerados pela separação do hidrograma não foram utilizados para comparação, pois foram gerados pelo mesmo método para recarga e descarga de águas subterrâneas e, assim, não permitiria confrontar com os resultados encontrados. A seguir são apresentados os dados calculados da estimativa do escoamento superficial para cada cenário de uso e cobertura da terra pela Equação 14 (Tabela 6).

Tabela 6. Valores utilizados para a estimativa da velocidade média do escoamento superficial para os anos de 1957, 1976, 1997 e 2017.

1957	Declividade (%)	Velocidade média do escoamento superficial (m/s)	Área compensada (km ²)	Área (%)	Velocidade média do escoamento superficial médio calculada (m/s)
Florestas	0 – 3	0,25	14,62	1,43	0,004
	4 – 7	0,65	43,66	4,28	0,028
	8 – 11	0,9	77,60	7,60	0,068
	> 12	1	261,07	25,57	0,256
Pastos	0 – 3	0,4	60,43	5,92	0,024
	4 – 7	0,95	105,19	10,30	0,098
	8 – 11	1,2	113,81	11,15	0,134
	> 12	1,3	214,23	20,98	0,273
Áreas cultivadas	0 – 3	0,45	45,91	4,50	0,020
	4 – 7	1,15	15,41	1,51	0,017
	8 – 11	1,55	13,70	1,34	0,021
	> 12	1,7	54,01	5,29	0,090
Pavimentos	0 – 3	0,3	0,72	0,07	0,000
	4 – 7	3,3	0,28	0,03	0,001
	8 – 11	4,6	0,24	0,02	0,001
	> 12	5,2	0,23	0,02	0,001
Somatório			1021,1	100,0	1,04

Tabela 6 (continuação) Valores utilizados para a estimativa da velocidade média do escoamento superficial para os anos de 1957, 1976, 1997 e 2017.

1976	Declividade (%)	Velocidade média do escoamento superficial (m/s)	Área compensada (km ²)	Área (%)	Velocidade média do escoamento superficial médio calculada (m/s)
Florestas	0 – 3	0,25	25,98	2,54	0,006
	4 – 7	0,65	72,95	7,14	0,046
	8 – 11	0,9	124,95	12,24	0,110
	> 12	1	404,80	39,64	0,396
Pastos	0 – 3	0,4	59,01	5,78	0,023
	4 – 7	0,95	65,79	6,44	0,061
	8 – 11	1,2	53,63	5,25	0,063
	> 12	1,3	71,73	7,02	0,091
Áreas cultivadas	0 – 3	0,45	34,59	3,39	0,015
	4 – 7	1,15	24,79	2,43	0,028
	8 – 11	1,55	25,87	2,53	0,039
	> 12	1,7	51,44	5,04	0,086
Pavimentos	0 – 3	0,3	3,35	0,33	0,001
	4 – 7	3,3	0,86	0,08	0,003
	8 – 11	4,6	0,41	0,04	0,002
	> 12	5,2	0,95	0,09	0,005
Somatório			1021,1	100,0	0,98

Tabela 6 (continuação) Valores utilizados para a estimativa da velocidade média do escoamento superficial para os anos de 1957, 1976, 1997 e 2017.

1997	Declividade (%)	Velocidade média do escoamento superficial (m/s)	Área compensada (km ²)	Área (%)	Velocidade média do escoamento superficial médio calculada (m/s)
Florestas	0 – 3	0,25	21,13	2,07	0,005
	4 – 7	0,65	66,08	6,47	0,042
	8 – 11	0,9	122,54	12,00	0,108
	> 12	1	430,42	42,15	0,422
Pastos	0 – 3	0,4	67,21	6,58	0,026
	4 – 7	0,95	83,96	8,22	0,078
	8 – 11	1,2	74,23	7,27	0,087
	> 12	1,3	86,25	8,45	0,110
Áreas cultivadas	0 – 3	0,45	31,53	3,09	0,014
	4 – 7	1,15	13,74	1,35	0,015
	8 – 11	1,55	8,12	0,80	0,012
	> 12	1,7	12,34	1,21	0,021
Pavimentos	0 – 3	0,3	2,01	0,20	0,001
	4 – 7	3,3	0,75	0,07	0,002
	8 – 11	4,6	0,39	0,04	0,002
	> 12	5,2	0,39	0,04	0,002
Somatório			1021,1	100,0	0,95

Tabela 6 (continuação) Valores utilizados para a estimativa da velocidade média do escoamento superficial para os anos de 1957, 1976, 1997 e 2017.

2017	Declividade (%)	Velocidade média do escoamento superficial (m/s)	Área compensada (km ²)	Área (%)	Velocidade média do escoamento superficial médio calculada (m/s)
Florestas	0 – 3	0,25	31,45	3,08	0,008
	4 – 7	0,65	81,05	7,94	0,052
	8 – 11	0,9	138,37	13,55	0,122
	> 12	1	447,87	43,86	0,439
Pastos	0 – 3	0,4	38,09	3,73	0,015
	4 – 7	0,95	47,28	4,63	0,044
	8 – 11	1,2	42,68	4,18	0,050
	> 12	1,3	49,68	4,87	0,063
Áreas cultivadas	0 – 3	0,45	48,74	4,77	0,021
	4 – 7	1,15	34,50	3,38	0,039
	8 – 11	1,55	23,33	2,28	0,035
	> 12	1,7	31,11	3,05	0,052
Pavimentos	0 – 3	0,3	3,96	0,39	0,001
	4 – 7	3,3	1,63	0,16	0,005
	8 – 11	4,6	0,79	0,08	0,004
	> 12	5,2	0,59	0,06	0,003
Somatório			1021,1	100,0	0,95

Fonte: Elaboração própria.

No ano de 1957 (Tabela 6), 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). A maior contribuição, em termos de velocidade média do escoamento, ocorreu

nas elevações da região de pesquisa, nas quais as vertentes apresentam declividade diferenciada. Na declividade de 8 a 11%, os pastos detinham 11,95% da área de estudo, com 1,2 m/s de velocidade média do escoamento superficial, e 20,98% da área total para a velocidade média de 1,3 m/s em declividades superiores a 12%. As áreas cultivadas, em menor proporção, estendiam-se em 1,34% da região com declividade entre 8 e 11%, com velocidade média de 1,55 m/s, assim como 5,29% da área de estudo em declividades superiores a 12% e que geravam velocidades médias de 1,7 m/s. As florestas, na declividade entre 8 e 11%, com velocidade média de 0,9 m/s, cobriam uma área de 7,6%. No entanto, as florestas apresentavam maior contribuição nas áreas com declividade superior a 12%, com valor de 1 m/s, porém, o menor entre as categorias de uso e cobertura da terra para esse intervalo de declividade, e que representava 25,57% da área de estudo, em locais cuja vegetação ainda era pouco explorada.

Por sua vez, em 1976 (Tabela 6), a expansão das florestas contribuiu ao escoamento superficial, na declividade entre 8 e 11%, com a velocidade média de 0,9 m/s, em 12,24% da região de pesquisa, passando para 12,0%, em 1997, e 13,55%, em 2017. Nas declividades superiores a 12%, com a velocidade média predominante de 1m/s, as florestas representavam 39,64% da área de estudo em 1976 e aumentaram para 42,15% em 1997 e 43,86% em 2017.

As áreas cultivadas, na declividade entre 8 e 11%, apresentavam a velocidade média do escoamento superficial estável em 1976, no comparativo ao ano anterior, com 2,53% da área de estudo, redução em 1997, com 0,8%, e com aumento em 2017, para 2,28% (Tabela 6). Nas declividades superiores a 12%, a velocidade de 1,7 m/s pouco mudou em relação a 1957, abrangendo 5,04% da região de pesquisa em 1976, reduzindo para 1,21% em 1997 e retornando com aumento em 2017.

Os pastos, com auge de sua distribuição em 1957 nas elevações, passou a contribuir menos no decorrer dos cenários seguintes com as suas maiores velocidades médias ao escoamento superficial. Na declividade entre 8 e 11%, com velocidade média de 1,2 m/s, representava 5,25% da área total em 1976, 7,27% em 1997 e 4,18% em

2017 (Tabela 6). Nas declividades superiores a 12%, em que a velocidade média é de 1,3 m/s, a área de contribuição variou de 7,02%, em 1976, para 8,45%, em 1997, e 4,87% em 2017.

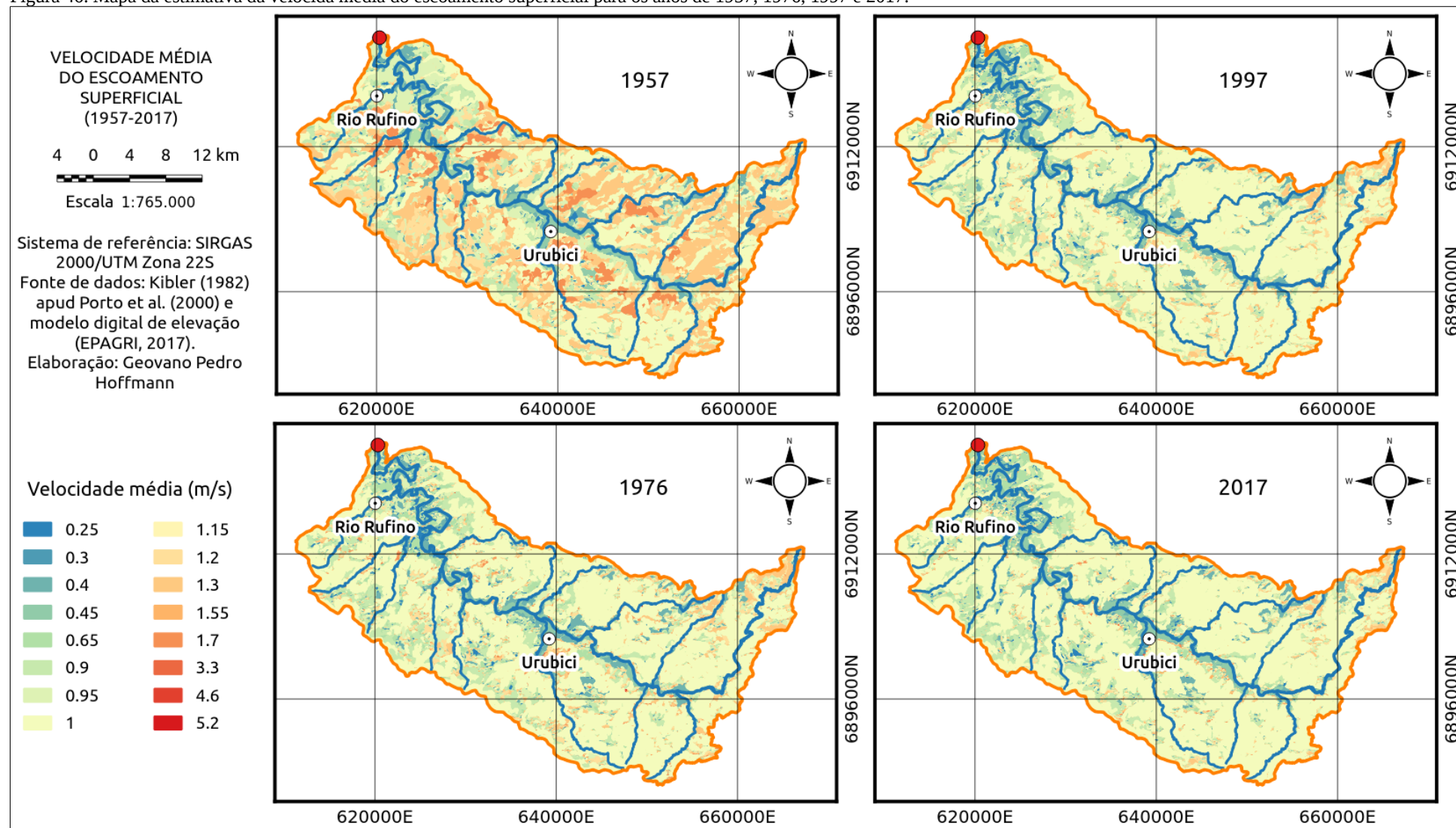
A velocidade média de escoamento superficial da área de estudo foi reduzida para 0,98 m/s, em 1976, diminuindo para 0,95 m/s, em 1997, e mantendo-se estacionária em 2017, com 0,95 m/s (Tabela 6). Entre 1976 e 1997, ocorreu o crescimento em área da categoria florestas nas elevações, onde até então havia 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, mesmo com o maior crescimento das florestas e redução de pastos nas vertentes acima de 8% de declividade, 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 dos últimos 60 anos.

A categoria pavimentos teve pouca participação como contribuição ao escoamento superficial durante o período de 1957 a 2017. Apesar de apresentar as maiores velocidades médias de escoamento superficial, o pequeno crescimento sobre a planície aluvial desse tipo de uso e cobertura da terra não foi expressivo para a região de pesquisa. Áreas com pouca declividade, de até 8%, para as quatro categorias de uso e cobertura da terra também não mostraram contribuição significativa em área através da velocidade média do escoamento superficial.

Na Figura 46 é possível notar na representação das velocidades médias do escoamento superficial que o ano de 1957 possui maiores valores de velocidade, ou seja, a chuva que precipitou na área de estudo contribuiu mais para o escoamento superficial nesse cenário do que nos demais anos (1976, 1997 e 2017). Isso sugere que as categorias áreas cultivadas e pastos, situadas nas elevações do vale, onde a declividade é maior, 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 das 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 na presente pesquisa.

Figura 46. Mapa da estimativa da velocidade média do escoamento superficial para os anos de 1957, 1976, 1997 e 2017.



Fonte: Elaboração própria.

Em síntese, os dados de recarga e descarga de águas subterrâneas, além das velocidades médias do escoamento superficial, comprovam que a etapa do escoamento subterrâneo, no contexto do ciclo hidrológico das últimas seis décadas, era acelerado no período 1957-1976 e foi sendo reduzido progressivamente de 1976 a 2017 na região analisada. A expansão da área de florestas sobre o SAIG/SG permitiu que a área de estudo retornasse com aproximação ao 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.

Nesse sentido, os dados indicam a existência de efeitos da modificação do uso e cobertura da terra, pela interferência de ações antropogênicas, no aumento do fluxo d'água subterrâneo e, conseqüentemente, na redução do escoamento superficial nos períodos em regime de fluxo de base na região de pesquisa. Isso evidencia também o melhoramento da condição ambiental da área de estudo, porém, ainda não ideal, o que exigiria uma área máxima de cobertura florestal e próxima da situação anterior ao processo de ocupação que gerou degradações ambientais, incluindo a das águas subterrâneas e superficiais. Dessa maneira, como forma de considerar as atividades humanas através do uso e conservação do ambiente, a partir dos resultados obtidos da área de estudo, torna-se necessária a discussão da gestão integrada de águas para a região de descarga do SAIG/SG.

4.4. MONITORAMENTO DO USO E COBERTURA DA TERRA COMO MECANISMO DA GESTÃO INTEGRADA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS NA REGIÃO DO SAIG/SG

O estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Rio Canoas, na corrente pesquisa, mostra o que acontece com a interação aquífero-rio na área de abrangência do SAIG/SG, tendo em vista que é o único local no Estado de Santa Catarina que permite ser realizada essa avaliação, com as unidades hidroestratigráficas que compõem o SAIG/SG dispostas a possibilitar, tanto a recarga quanto a descarga do sistema.

Com relação às demais bacias hidrográficas na região do SAIG/SG, é sabido que as águas subterrâneas mantêm as vazões dos rios que fluem sobre as rochas do Grupo Serra Geral Indiferenciado, nas ocasiões de recessão e que, em direção à Oeste do sistema aquífero integrado, em que as misturas de águas são mais intensas entre ambas as unidades hidroestratigráficas, chegando a haver a surgência natural de águas da Formação Botucatu (BLANK, 2017).

Os resultados da dissertação apresentam uma avaliação positiva do melhoramento das condições ambientais, de recarga e descarga de águas. Isso significa que o uso e cobertura da terra está bem gerido na área de estudo da presente pesquisa e que esse melhoramento pode ser levado como proposta, em nível de escala, à área do SAIG/SG. O presente estudo mostra que as mudanças do uso da terra para coberturas que inibam o escoamento superficial fazem com que a recarga seja maior e haja o estímulo à infiltração, com o aumento de vazões durante os períodos de estiagem²⁰, uma vez que o SAIG/SG mantêm os cursos d'água durante os períodos de recessão.

No atual modelo de desenvolvimento da sociedade, que é fortemente dependente da água, assentado na dimensão exclusivamente econômica, o setor produtivo não admite interrupções em seu circuito, o que exige subsídios para o armazenamento de águas. Dentro dessa perspectiva, a singularidade da área de estudo na presente pesquisa mostrou que o uso e cobertura da terra com florestas é um importante mecanismo de armazenamento de água. Não é possível ainda afirmar como funciona a interação aquífero-rio na área do SAIG/SG, o qual deve ser realizado através de pesquisas sobre nível estático das águas

20 Conforme (FREITAS, SANTO & OLIVEIRA, 2017, p. 9), o termo estiagem têm diferentes significados, sendo o mais preciso a de estiagem meteorológica, proposta pela Secretaria Nacional de Defesa Civil do Ministério da Integração Nacional (SEDEC/MI), que se refere ao “atraso do início da época de chuva por mais de quinze dias e/ou as médias de precipitação mensais dos meses chuvosos inferiores a 60% das médias”. Por outro lado, ressaltam que também pode ser compreendido como “desastre supostamente causado por estiagem climática (o que pode contribuir para uma sistemática e desadequada ‘naturalização’ dos desastres)”.

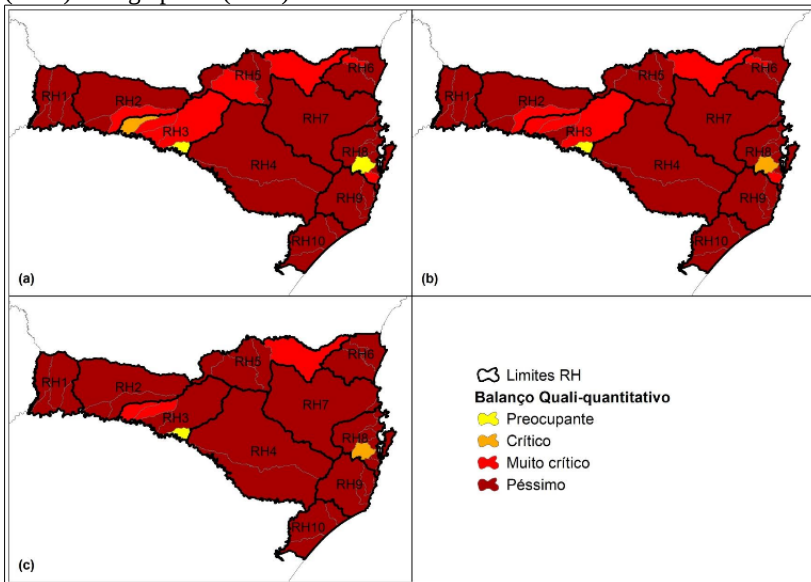
subterrâneas e que considere as fraturas e blocos geomorfológicos/hidrogeológicos. Dados de outros aquíferos, como o Bauru, unidade hidrogeológica acima do SAIG/SG, no município de São José do Rio Preto, no Estado de São Paulo, revelam que ao longo dos últimos anos o nível dos poços vêm sendo constantemente rebaixados, em até 7 metros, com exploração de águas maior que a recarga subterrânea (LOURENCETTI, PRATES & OLIVEIRA, 2012). Nos aquíferos Bauru e Serra Geral, no município de Araguari, em Minas Gerais, o rebaixamento médio atinge, respectivamente, 24 e 36 metros (VELÁSQUEZ *et al.*, 2008), o que provavelmente já deve estar acontecendo com o SAIG/SG em Santa Catarina. Assim, é necessário considerar estratégias de reconfiguração do uso e cobertura da terra, apropriadas à conservação do SAIG/SG, que possam estimular a recarga/descarga das águas subterrâneas e reduzir o seu consumo diretamente do sistema hidrogeológico.

A região do SAIG/SG apresenta atualmente um comportamento de distribuição de uso e cobertura da terra muito diferente daquele encontrado na área de estudo aqui pesquisada, que possui a agricultura apenas no fundo de vale e florestas e campos nas áreas de recarga de águas subterrâneas. Nas outras áreas do SAIG/SG, o intenso desflorestamento provocado pelo processo histórico de ocupação para as práticas agrícolas com monoculturas (soja, milho, etc), pecuárias, de monocultivos com espécies florestais, como pinus e eucalipto, o crescimento de cidades e a drenagem de áreas úmidas, reduziu a infiltração e elevou o escoamento superficial, levando à redução da retenção da água subterrânea no solo e ao agravamento dos eventos de estiagem e de cheias, com assoreamento dos rios (ROCHA *et al.*, 2017).

Além de reduzir a recarga do SAIG/SG ao longo do tempo, em virtude da mudança de uso da terra, a tendência no Estado é de que ocorra o aumento da demanda hídrica, para todas as regiões hidrográficas, diferentemente da área de estudo. A vazão utilizada para a diluição de cargas orgânicas nos rios, a irrigação de culturas agrícolas e o aumento da população, com o processo de urbanização, comprometem as águas, subterrâneas e superficiais, em termos de quantidade e qualidade. Esses fatores enquadram a maioria das regiões hidrográficas

(Figura 47) situadas sobre o SAIG/SG (RH1 – Extremo Oeste, RH2 – Meio Oeste, RH3 – Vale do Rio do Peixe, RH4 – Planalto de Lages e RH5 – Planalto de Canoinhas) em situação crítica e péssima nos cenários de curto (2019), médio (2023) e longo prazo (2027) (CERTI, 2017). Esse fato é ainda mais preocupante durante os eventos de estiagem, quando os rios são mantidos exclusivamente pelo regime de fluxo de base, e então são sentidos os efeitos da baixa de recarga das águas subterrâneas nas bacias hidrográficas.

Figura 47. Balanço hídrico quali-quantitativo, por bacias hidrográficas e regiões contíguas de Santa Catarina, com vazão de referência Q_{98} a curto (2019), médio (2023) e longo prazo (2027).



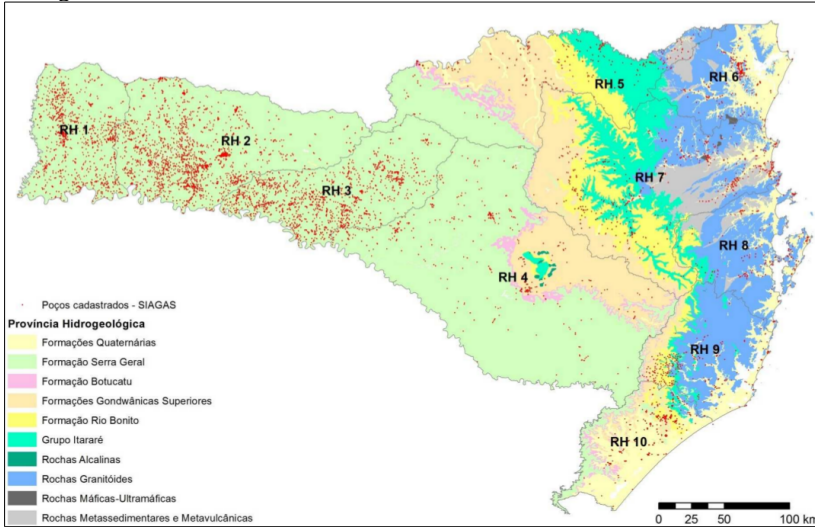
Fonte: CERTI (2017, p. 25).

Também no restante da área do SAIG/SG a extração do volume de águas subterrâneas tornou-se maior, dado o impacto provocado pela expansão das cidades e do agronegócio, além da contaminação das águas superficiais. Um indício para essa afirmação é a quantidade de

poços tubulares registrados em Santa Catarina, que passou de 3.419, em 2006, com dados do Plano Estadual de Recursos Hídricos, para 7.165, em 2011, com dados de cadastro no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) (SILVA & KIRCHHEIM, 2011), sendo verificado que no SIAGAS atualmente (até outubro/2017) há cerca de 7.524 registros. O mapa dos poços tubulares no Estado (Figura 48) mostra a sua concentração nas regiões hidrográficas RH1, RH2 e RH3, no Oeste e Meio-Oeste de Santa Catarina, que se encontram justamente na área de abrangência do SAIG/SG. Levando em consideração a clandestinidade de poços tubulares, Silva & Kirchheim (2011) acreditam que o número é dez vezes maior do que aqueles registrados no SIAGAS. O aumento da quantidade de poços, ou seja, da extração de águas subterrâneas do SAIG/SG, conforme Silva & Kirchheim (2011. p. 2) se deve:

(i) a deterioração progressiva da qualidade dos recursos hídricos superficiais e crescentes custos de captação e tratamento; (ii) vulnerabilidade das reservas superficiais aos períodos de estiagem em alguns pontos do país; (iii) avanços tecnológicos das bombas elétricas (submersas ou de eixo prolongado) que possibilitam a extração segura de grandes vazões a grandes profundidades; (iv) avanços na tecnologia de perfuração roto-pneumática e na diminuição dos investimentos necessários para adquirir e operar sondas; (v) expansão da oferta de energia elétrica; (vi) progressivo barateamento, redução dos prazos e riscos econômicos da construção dos poços; (vii) ausência em geral de impactos ambientais associados às extrações de água subterrânea e, finalmente (viii) estímulo à clandestinidade da extração sem o mínimo registro por parte dos órgãos de gestão.

Figura 48. Mapa de poços tubulares cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) por província hidrogeológica e região hidrográfica de Santa Catarina.



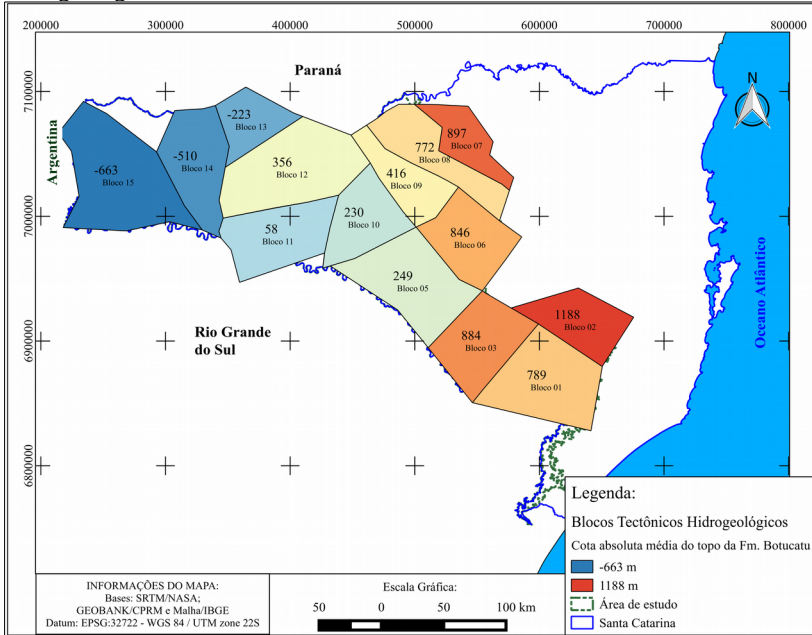
Fonte: Silva & Kirchheim (2011).

Apesar das vazões no Oeste catarinense indicarem boa disponibilidade hídrica, há períodos de desequilíbrios temporários (VALDATI, LINHEIRA & KABILIO, 2017). A falta de chuvas causada por bloqueios atmosféricos, de influência da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Pacífico, e que perdura por períodos prolongados em todos as estações do ano, têm impactos nos rios da região (MONTEIRO & SILVA, 2017), o que os leva, por vezes, a secar. Atrelado ao uso da terra predominante, de profundas alterações do quadro natural (FREITAS & KAETSU, 2017), e que dificulta a entrada de águas no sistema hidrogeológico, as bacias hidrográficas passaram da condição de perenes, de um tempo passado, quando até então a região do SAIG/SG apresentava a cobertura florestal original, para intermitentes.

No contexto da região do SAIG/SG em Santa Catarina, também não é comum a Formação Botucatu aflorar em superfície, assim como a

ocorrência de sua descarga de águas subterrâneas, tal como ocorre na área de estudo da presente pesquisa. A concentração de poços tubulares no Oeste e Meio-Oeste catarinense coincide com a redução, de leste para oeste, da cota absoluta média do topo da Formação Botucatu (DESCOVI FILHO, 2015), como representado na Figura 4 e Figura 49. Foster *et al.* (2009) mencionam que quando o topo do SAG torna-se maior que 400 metros de profundidade, as águas subterrâneas do SAG encontram-se em uma zona confinada profunda, que não permite a recarga subterrânea e cujo tempo de residência das águas é maior que 10.000 anos, isto é, diante do tempo de vida humana, a água subterrânea confinada é um elemento não-renovável. Dessa maneira, profundidades maiores que estas são economicamente inviáveis para exploração, fazendo com que os poços tubulares registrados capturem águas diretamente do SASG que, segundo Freitas & Caye (2003) e Scheibe & Hirata (2008), são mais acessíveis, possibilitando o maior aproveitamento em relação ao SAG e o tornam mais utilizado na região Sul do país.

Figura 49. Cota absoluta média do topo da Formação Botucatu para os blocos hidrogeológicos do SAIG/SG em Santa Catarina.



Fonte: Descovi Filho (2015, p. 148).

A exploração de águas subterrâneas do SAG é preocupante, pois é a próxima e a última fronteira de água doce na região. Enquanto isso, as águas que percolam o SASG são bombeadas antes mesmo de surgirem como nascentes nas bacias hidrográficas da área do SAIG/SG, fazendo-as secar, contribuindo para a situação de estiagens e de estresse hídrico²¹ em superfície, interferindo negativamente na vazão ecológica dos rios. A população das cidades e as atividades agropecuárias dependem das águas superficiais em regime de fluxo de base, e, no caso em que elas não são mais mantidas pela conversão da precipitação em fluxo

21 Segundo Ribeiro (2008, p. 62-72), o estresse hídrico se refere à “pressão exercida pela falta de água” e é quantificada pela “relação entre o total de água utilizado anualmente e a diferença entre a pluviosidade e a evaporação (a água renovada) que ocorre em uma unidade territorial”.

subterrâneo, requerem estratégias para minimizar o problema de má gestão. Nesse cenário, a gestão de águas superficiais e do uso da terra é mais viável, em um médio e longo prazo, para a reposição do volume de águas nesse sistema aquífero integrado, buscando reestabelecer o equilíbrio dinâmico para a situação mais próxima da original, o que tenderia a aumentar a quantidade de águas no sistema hidrogeológico/hidrográfico.

As áreas protegidas, a exemplo de unidades de conservação e áreas de preservação permanente (vegetação ripária), é uma das estratégias de estímulo à recarga/descarga de águas subterrâneas. Esses locais costumam ser usados para o abastecimento público e, por isso, têm instrumentos próprios, implementados pelo poder público, para que o fornecimento não seja prejudicado por interferências de atividades humanas. Unidades de conservação destinadas à recarga de águas, como as áreas de proteção de mananciais, já estão estabelecidas em alguns Estados, como São Paulo e Minas Gerais (VASCONCELOS *et al.*, 2013). As áreas protegidas têm a sua importância por fornecer os serviços ambientais associados às águas, não somente para as cidades, como também para as atividades agropecuárias, dando o suporte à integridade do ambiente na regulação dos fluxos subterrâneos e superficiais em quantidade e qualidade (STARZYNSKI & SIMÕES, 2015). As áreas protegidas representam medidas não-estruturais que, além de promover a recarga do SAIG/SG, possibilitariam o uso de águas com baixo custo, em comparativo com a demanda por águas subterrâneas, através de poços tubulares, e de tratamento da qualidade com as águas superficiais.

Levando-se em consideração a necessidade de regularização das

unidades rurais por meio do Cadastro Ambiental Rural (CAR)²² e a necessidade do processo ser apresentado de maneira georreferenciada (geoprocessamento), seria relevante promover/exigir a adoção de áreas protegidas em altos topográficos (zonas de recarga de águas subterrâneas) como sendo os 20% de reserva legal, definida para o bioma Floresta Atlântica (BRASIL, 2012). No caso de adoção de altos topográficos para reservas legais, haveria um ganho tanto ambiental quanto econômico, uma vez que o proprietário de terras precisa destinar 20% do tamanho de sua propriedade para proteção e as áreas altas serem, também, as que secam mais rapidamente, o que provocaria maiores perdas de produtividade em situações de estiagem. Além disso, a regeneração natural dessas áreas, promoveria uma diminuição do escoamento superficial mantendo as águas disponíveis por mais tempo para as culturas que estarão sendo desenvolvidas à jusante e melhoraria a condição dos ecossistemas.

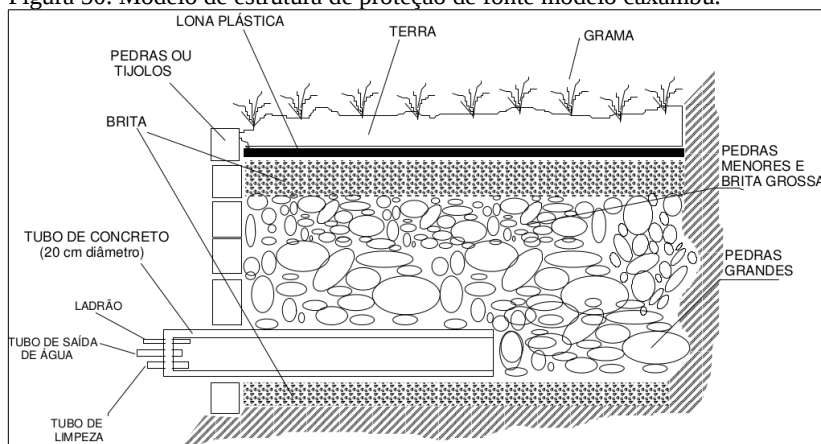
Como forma de incentivo financeiro às áreas protegidas, poderia haver a implantação de programas de proteção às águas, a exemplo do que é praticado no município de Extrema-MG. Considerada a primeira iniciativa municipal no país, os proprietários rurais receberam um auxílio financeiro, via Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), em parceria com o “Programa Produtor de Água”, para manter as áreas de nascentes preservadas (JARDIM, 2010). O Programa Produtor de Água é um projeto desenvolvido pela Agência Nacional de Águas (ANA), que fornece apoio, orientação e certificação de projetos de adesão voluntária com proprietários rurais para o manejo de suas propriedades e conservação das águas nas bacias hidrográficas. Seguindo uma tendência mundial, o Programa Produtor de Água realiza o pagamento

22 O Cadastro Ambiental Rural (CAR) é um registro público que tem a “finalidade de integrar as informações ambientais das propriedades e posses rurais, compondo base de dados para controle, monitoramento, planejamento ambiental e econômico e combate ao desmatamento”(BRASIL, 2012). O novo código florestal (BRASIL, 2012) coloca como exigências para elaboração de planta e memorial descritivo de cada propriedade rural “a localização dos remanescentes de vegetação nativa, das Áreas de Preservação Permanente, das Áreas de Uso Restrito, das áreas consolidadas e, caso existente, também da localização da Reserva Legal”.

por serviços ambientais, com o princípio do provedor-recebedor, através do instrumento de cobrança pelo uso da água, e conta com acompanhamento técnico (SANTOS, MELO & CARVALHO, 2013).

Outro destaque na gestão integrada de águas para a região do SAIG/SG é o uso de tecnologias sociais para a gestão de águas que requerem perspectivas de uso da terra, com implicações na conjuntura da paisagem local/regional. Na região Oeste catarinense é largamente difundido o uso de proteção de fontes modelo caxambu nos estabelecimentos rurais. O protetor de fonte caxambu consiste em uma estrutura (Figura 50) de baixo custo, instalada junto a uma nascente. No intuito de proteger e garantir as condições de disponibilidade em quantidade e qualidade das nascentes, que afloram pela surgência de águas do lençol freático profundo, a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), com apoio do poder público estadual, pela Secretaria dos Negócios do Oeste, e as administrações municipais, realiza atividades de extensão para divulgar o sistema caxambu para a gestão de águas (EPAGRI, TSGA, 2015).

Figura 50. Modelo de estrutura de proteção de fonte modelo caxambu.



Fonte: Freitas (2002, p. 68).

O manejo de uma área de nascente, como exemplificado pelo sistema do tipo caxambu, exige o isolamento de sua área de contribuição. A área de preservação permanente em torno das nascentes, dependendo de sua extensão no contexto de uma sub-bacia, pode ter efeitos na vazão, visto que a infiltração ocorre em toda a área de uma bacia hidrográfica. Considerando os diferentes tipos de cobertura do solo, a florestal é a mais indicada, com comprovação em estudos de disponibilidade hídrica. O arranjo das atividades e a infraestrutura do sistema produtivo em uma propriedade depende, dessa maneira, da disposição da nascente em uma propriedade (CALHEIROS *et al.*, 2009).

A tecnologia social mencionada necessita, portanto, da interface com um tipo de uso e cobertura da terra que permita a recarga de águas nas vertentes e o seu melhor aproveitamento durante a captação, o que só é possível com o desenvolvimento de florestas. A regeneração de florestas nas áreas à montante dos sistemas de captação de água do tipo “caxambu”, pode abastecer as populações que não são alcançadas pelo sistema centralizado de abastecimento, evitando a continuidade de uso de poços e de novas perfurações no SAIG/SG. Isso também é justificado pela qualidade das águas subterrâneas exploradas dos aquíferos que nem sempre são próprias para o consumo humano pela sua não adequação aos padrões de potabilidade, como excessos de flúor (NANNI, 2008) e enxofre presentes nos sulfatos (BLANK, 2017). Por outro lado, as águas de fontes supridas pelo escoamento subsuperficial, ou seja, junto aos solos, quando não comprometidas, são enquadradas muito próximas da potabilidade, podendo até mesmo serem consumidas sem o tratamento convencional que prevê a cloração para eliminação de patógenos fecais. Daí a necessidade da modificação do uso e cobertura da terra nas áreas mais elevadas, em que ocorre a recarga dos aquíferos, tanto subsuperficiais como os profundos.

A gestão integrada também pode ser incorporada com a proposta de produção de alimentos em sistema agroflorestal, nas áreas de topo e de encosta das bacias hidrográficas, em que há a recarga de águas pelos aquíferos na área do SAIG/SG. Um exemplo desse tipo de experiência é o que ocorre em São Lourenço do Oeste/SC com o Programa Municipal da Mata Nativa através do Projeto “Vida”, parceria entre

prefeitura municipal e escritório municipal da EPAGRI. Com prejuízos econômicos constantes, especialmente na produção leiteira, os agricultores foram incentivados a revegetar áreas de topo de morro. O decreto n. 3.526, de 21 de setembro de 2007 (SÃO LOURENÇO DO OESTE, 2007) coloca que o Programa prevê a recuperação florestal nativa em áreas exploradas por atividades agrícolas ou pastoris que se encontram degradadas, em regiões ribeirinhas ou de encostas com declividade acentuada, destinando-se à “preservação de nascentes d’água, mananciais e córregos existentes”. Cada “vida” corresponde ao número de três árvores, uma do Pinheiro Brasileiro (*Araucaria angustifolia*) e mais duas espécies nativas da Mata Atlântica. No total, aos proprietários rurais parceiros, foram distribuídas 50.000 mudas de Pinheiro Brasileiro e 100.000 de outras espécies silvestres, para uma área mínima de 1 hectare em cada estabelecimento, o que compreenderia 330 “vidas”. Em troca, para cada produtor era repassado o valor anual de um real para cada “vida” plantada, como pagamento por serviço ambiental, no que foi denominado de benefício ecológico.

Em contato com o Escritório Municipal de São Lourenço do Oeste, foi informado que o Projeto continua em andamento e que o benefício ecológico não está mais sendo efetivado, porém, conta ainda com 28 agricultores (até outubro/2017). O Programa é realizado com sistema silvipastoril nas propriedades rurais, com árvores forrageiras, eucalipto e gado de leite em uma área única. Apesar de não haver uma quantificação acerca da disponibilidade hídrica ou produção leiteira pelos proprietários que aderiram ao Programa, passou a ser percebido que, após o reflorestamento das áreas de recarga, os riachos aumentaram a vazão para os períodos de seca, quando são mantidos pelo fluxo subterrâneo. Assim, o gado passou a ter mais água para beber, o que elevou a produção de leite, e possibilitou o reestabelecimento da irrigação, em função do retorno das águas ocasionado pela escolha do uso e cobertura do solo original com florestas.

O exemplo de São Lourenço do Oeste expõe o fato de que o incentivo realizado por políticas públicas descentralizadas dispõem de bons resultados para a melhoria da condição ambiental de bacias hidrográficas. Além de promover a sustentabilidade econômica no meio

rural com mínima degradação ao ambiente, por meio de manejo conservacionista, pode ser um possível modelo em sistema agroflorestal para a região do SAIG/SG em Santa Catarina. De maneira semelhante ao que ocorre em São Lourenço do Oeste, o mesmo pode ocorrer com grandes rios que possuem redução do escoamento superficial nos períodos de recessão de chuvas. A limitação da capacidade desses rios favorece a irrigação de águas subterrâneas com pivôs centrais, especialmente nas monoculturas em grandes propriedades, como trigo e soja. Dessa forma, com o aumento do volume de águas subterrâneas para os períodos de recessão de chuvas nas bacias hidrográficas dentro da área do SAIG/SG, poderia haver mais água disponível para irrigação a partir do bombeamento de águas superficiais outorgada junto aos rios, acompanhada de melhoria da situação econômica.

A gestão integrada de águas através de políticas públicas também deve ser concebida a partir de abordagens que relacionam o manejo de aquíferos, rios e vegetação sob o aspecto de conceitos hidrogeológicos (Quadro 12) (VASCONCELOS, 2017). As implicações em políticas públicas, propostas por Vasconcelos (2017), estão vinculadas a uma configuração espacial de uso e cobertura da terra que reforça a necessidade por áreas florestadas como garantia da disponibilidade hídrica subterrânea e superficial. Com efeito, estas implicações devem constar nos planos de recursos hídricos dos comitês de bacia hidrográfica na região do SAIG/SG e serem articuladas ao ordenamento territorial que considere as especificidades de cada município e bacia hidrográfica.

Quadro 12. Conhecimento hidrogeológico aplicado à políticas públicas.

Abordagem hidrogeológica	Implicações nas políticas públicas
Balanço hídrico	As águas subterrâneas podem ser geridas tomando-se em conta as entradas (infiltração das chuvas no solo) e saídas (descarga nos rios, uso por seres humanos e pela vegetação)
Recarga de aquíferos	A gestão do uso do solo e medidas estruturais podem ser implementadas para aumentar a infiltração das chuvas no solo e, conseqüentemente, aumentar a disponibilidade de águas subterrâneas
Efeito pistão	Conservar aquíferos e solos que contém maior teor de argila e matéria orgânica é mais importante para a manutenção das vazões dos rios durante a estação seca, enquanto aquíferos porosos sobrepostos por solos arenosos apresentam fluxo hídrico mais rápido e podem ser melhor gerenciados como reservatórios recarregáveis para uso da água subterrânea
Efeitos sazonais das mudanças de uso do solo	Controlar o desmatamento das florestas e áreas úmidas pode melhorar a manutenção dos fluxos dos rios durante a estação seca e auxiliar na regulação de enchentes durante a estação chuvosa
Vazão de segurança	Restringir o uso de águas subterrâneas para que se mantenha dentro do limite de infiltração da chuva preveniria a depleção das reservas de águas subterrâneas
Vazão sustentável	Os limites para o uso de águas subterrâneas devem levar em conta as influências sobre a vazão dos rios e sobre a vegetação ripária, bem como os seus impactos econômicos e sociais

Fonte: Vasconcelos (2017, p. 15).

Um dos pontos mais emblemáticos da gestão integrada de águas é a dependência das populações, especialmente das cidades, em relação às águas subterrâneas. A região do SAIG/SG tem participação em cerca de 35% do PIB de Santa Catarina, correspondente às regiões Extremo Oeste, Oeste, Meio Oeste e Serra (SEBRAE, 2014), alicerçado no setor de serviços e agroindustrial. Para manter a população na região do SAIG/SG com os seus serviços e negócios agropecuários, é preciso, além de outras perspectivas de desenvolvimento, que os aquíferos

sejam considerados reservas estratégicas. Esse novo significado é relevante para a conservação de suas águas, tendo em vista que os aquíferos, dentro do ciclo hidrológico, apresentam uma disparidade entre o tempo de permanência de suas águas no meio subterrâneo e o tempo do processo “civilizatório” do atual modelo hegemônico de sociedade, que é intensificado pelo quadro de mudanças climáticas previstas (SCHEIBE, NANNI & HENNING, 2013).

O descontrole no uso das águas subterrâneas, como apontado por Kirchhein & Silva (2011), pode levar ao colapso desse sistema de uso das águas pela redução do armazenamento dos aquíferos. Partindo da precaução como pressuposto, é melhor investir em estratégias de gestão integrada, mesmo que de médio a longo prazo, para evitar a ampliação dos conflitos de uso da água e se antecipar para um recurso que poderá ser esgotado em algum momento. Assim, o SAIG/SG precisará ter a sua gestão com diferentes mecanismos, dentre eles, o monitoramento do uso e cobertura da terra, os quais devem ser empregados na melhoria da condição ambiental hidrogeológica e das bacias hidrográficas.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo foi proposto sob a perspectiva da análise ambiental sistêmica, a fim de realizar uma abordagem integradora dos elementos e componentes dos ambientes naturais e socioeconômicos, assim como das águas subterrâneas e superficiais, que estão dispostas naturalmente, e para gestão, integradas na forma de sistema aquífero. Em linhas gerais, os resultados evidenciam que a recarga de águas no SAIG/SG, na área de estudo, ocorre a partir da precipitação, com a sua infiltração junto ao Grupo Serra Geral Indiferenciado e Formação Gramado. A quantidade proporcional de nascentes por unidade geológica aponta que o processo de percolação das águas acontece em passagem pela Formação Botucatu, unidade geológica com menor número de nascentes, e que a Formação Rio do Rasto atua como barreira aos fluxos descendentes de recarga, direcionando-os à superfície da bacia hidrográfica. Assim, as águas do SAIG/SG afloram em diferentes pontos das vertentes em que se encontra a Formação Rio do Rasto, unidade geológica com maior número de nascentes, os quais dão origem aos cursos d'água tributários do Rio Canoas, sendo esta a forma mais comum de ocorrência de interação aquífero-rio para essa região.

A influência de características físico-naturais na ocupação da área de estudo, como boa disponibilidade hídrica, solos férteis na planície e relevo escarpado e na forma de vale, assim como mudanças socioeconômicas, a exemplo da atividade madeireira em área até então considerada reduto florestal do Estado de Santa Catarina, difusão do pacote tecnológico da Revolução Verde, inserção da região no circuito produtivo e comercial do país, consequências de regulações mercadológicas nacionais e internacionais, implicaram em uma dinâmica de uso e cobertura da terra diferenciada para as elevações, também denominadas de encostas, onde encontra-se aflorante o SAIG/SG, e o fundo de vale. A organização espacial para o período analisado mostrou que, em 1957, as elevações apresentavam o predomínio da categorias pastos, e, em menor extensão, as categorias florestas e áreas cultivadas. A partir de 1976, as florestas passaram a ocupar o lugar das categorias pastos e áreas cultivadas, processo que se manteve até o ano de 2017, mesmo que, em pequenas porções das

encostas, houve a expansão das áreas cultivadas para além do fundo de vale. Enquanto isso, a planície aluvial do vale era ocupada, em 1957, pelas categorias pastos e áreas cultivadas. Ao mesmo tempo que as áreas cultivadas reduziram a sua participação nas encostas, em 1976, avançaram no fundo de vale sobre as áreas até então da categoria pastos, situação que foi invertida no ano de 1997. Em 2017, as áreas cultivadas aumentaram novamente em detrimento da categoria pastos, que diminuiu o seu tamanho no comparativo com o ano de 1997. Nos quatro anos mapeados, a categoria florestas não foi identificada no fundo de vale e a classe de pavimentos apresentou crescimento contínuo, porém, ainda incipiente em relação às demais categorias de uso e cobertura da terra.

No período das últimas seis décadas, pode-se dizer que o ciclo hidrológico, especificamente na sua etapa do escoamento, era acelerado no cenário 1957-1976, por conta da cobertura da terra, compartilhada entre pastos, florestas e áreas cultivadas, que incentivavam a conversão da precipitação em escoamento superficial, cujas velocidades eram mais elevadas do que nos cenários de 1976-1997 e 1997-2017. Nessa circunstância, o armazenamento subterrâneo era reduzido no primeiro cenário, o que foi também verificado na descarga de águas subterrâneas, com o comportamento das vazões do Rio Canoas, durante os períodos de contribuição do fluxo de base. No entanto, a tendência geral do comportamento do escoamento, de 1957 a 2017, indica o aumento da recarga subterrânea anual e a redução das velocidades médias do escoamento superficial, principalmente pela expansão das áreas de florestas nas encostas onde havia atividades com agricultura e pecuária, o que permitiu o aumento da capacidade de infiltração e armazenamento onde o SAIG/SG aflora, acompanhado do aumento da precipitação. Como resposta hidrológica, os dados da estimativa de descarga de águas subterrâneas demonstram que houve o seu aumento ao longo dos períodos de recessão de chuvas. Dessa forma, os resultados comprovaram a ocorrência de efeitos da modificação do uso e cobertura da terra, pela interferência de ações antropogênicas, no aumento do fluxo d'água subterrâneo em área de descarga de águas do SAIG/SG.

A redução da influência de perturbações provocadas pelas

atividades humanas, ao longo de um processo histórico, através da relação com o uso e cobertura da terra no sistema hidrogeológico/hidrográfico, permitiu que a área de estudo retornasse com aproximação ao seu estado inicial de equilíbrio dinâmico pela expansão da área de florestas sobre o SAIG/SG. Contudo, essa região é uma exceção dentro do Planalto Catarinense, e do restante da área do SAIG/SG em Santa Catarina, em termos de condição ambiental de bacia hidrográfica. Nesse sentido, foram propostas estratégias de reconfiguração do uso e cobertura da terra, apropriadas à conservação do SAIG/SG, que possam estimular a recarga/descarga das águas subterrâneas e reduzir o seu consumo diretamente do sistema hidrogeológico a partir do reestabelecimento do equilíbrio dinâmico ambiental.

Dentre as estratégias de reconfiguração de uso e cobertura da terra para a região do SAIG/SG, foram discutidas a necessidade de implantação de áreas protegidas, tal como unidades de conservação e áreas de preservação permanente em altos topográficos, buscando o fornecimento de serviços ambientais e a regulação de águas subterrâneas e superficiais; uso de tecnologias sociais para a gestão de águas que requerem perspectivas de mudança de uso da terra na conjuntura da paisagem local/regional, a exemplo do protetor de fonte caxambu; a gestão integrada incorporada à proposta de produção de alimentos em sistema agroflorestal, o que possibilitaria a sustentabilidade econômica no meio rural com mínima degradação ao ambiente; e a adoção de abordagens hidrogeológicas que tenham efeito prática nas políticas públicas, como balanço hídrico, recarga de aquíferos, efeito pistão, efeitos sazonais de uso da terra, vazão de segurança e vazão sustentável. Portanto, o uso e cobertura da terra como mecanismo da gestão integrada de águas subterrâneas e superficiais, que privilegie a presença de florestas juntamente com o uso e conservação do ambiente pelas atividades humanas, tem a sua importância por ser uma forma de prevenção a um recurso que poderá ser esgotado em algum momento no atual modelo de desenvolvimento hegemônico.

Portanto, assim como a expansão da infraestrutura urbana, as modificações no uso e cobertura da terra no meio rural, com pastagens e

lavouras, também impactam o comportamento hidrológico e hidrogeológico de bacias hidrográficas pelo simples fato de aumentar ou diminuir a área de florestas, principalmente as nativas, as quais constituem um dos agentes reguladores do balanço hídrico. A escala espacial de análise no meio rural, como foi o de bacia hidrográfica nesse estudo, é fundamental para essa compreensão e não pode deixar de contabilizar as interações que se desenrolam no decorrer do processo histórico de ocupação e apropriação do espaço e que resultam de transformações nas paisagens, próprias de âmbito local, mas que também têm influências de processos de escalas espaciais mais abrangentes, inclusive globais, tal como ocorridas no mundo, e no Brasil, a partir da segunda metade do século XX.

Além disso, a discussão acerca da gestão integrada de águas para a região do SAIG/SG mostrou que a manutenção dos mananciais não dependem de inovações tecnológicas complexas. O simples fato de ocupar as áreas de recarga subterrânea com florestas, permite a recuperação da estabilidade dos processos de interação aquífero-rio, o que é manifestado pelo volume nos cursos d'água por meio do mecanismo de uso e cobertura da terra. A redução da disponibilidade hídrica, subterrânea e superficial, precisa ser encarada como um problema ambiental que não é apenas resultante da dinâmica natural do ambiente, mas também da má gestão dos recursos hídricos, em visão setorializada, ou da falta dela. As informações aqui geradas são de relevância para traçar tendências de quadros de ocupação diferenciados e que possam auxiliar na gestão integrada de águas subterrâneas e superficiais. Espera-se, dessa forma, que o estímulo à recarga subterrânea e o melhor aproveitamento das águas superficiais permita que o SAIG/SG seja utilizado diretamente apenas como reserva estratégica.

Por fim, ressalta-se que os modelos matemáticos ou métodos não costumam incluir a variável uso e cobertura da terra, em virtude das águas subterrâneas levarem um longo tempo para realizar sua percolação nas rochas. Porém, os resultados da pesquisa indicam que pode haver a influência da modificação do uso da terra para um tempo de resposta de curto prazo, ou seja, a materialização de transformações

socioeconômicas decorrentes de mudanças históricas, como degradação ambiental, nos estudos de quantificação das águas subterrâneas pela separação do hidrograma, sendo essa a contribuição científica que esta pesquisa em Geografia se propôs a realizar.

Como limitações e dificuldades encontradas, são realizadas sugestões baseadas no processo de desenvolvimento desta pesquisa que podem ser aprimoradas:

- estudo de basculamentos (de influência da Bacia Sedimentar do Paraná e de blocos geomorfológicos-hidrogeológicos) e de representação geológica da área (lineamentos estruturais, detalhamento das unidades geológicas, etc.) e de solos;
- uso de datação isotópica para precisar o tempo de residência das águas subterrâneas no SAIG/SG e uso de outros métodos diretos;
- considerar interferências externas no comportamento das águas, como, por exemplo, a variabilidade da precipitação em função do relevo dentro da área de estudo;
- no caso de aplicação do método de separação do hidrograma, necessidade de instalação de estação fluviométrica junto a uma vertente do SAIG/SG a fim de obter um resultado mais preciso;
- estudos de qualidade da água e disponibilidade hídrica que agreguem informações da presente pesquisa e que possam contribuir para a gestão de águas no estudo integrado de quantidade/qualidade, especialmente nesta área em que a atividade agrícola é intensa no fundo de vale e que, inclusive, pode ter influências nas estimativas do escoamento de base, a exemplo do bombeamento de águas para irrigação;
- uso de outros métodos ou modelos matemáticos que possam ser utilizados para o comparativo com os resultados desse estudo,

uma vez os dados obtidos são uma aproximação do comportamento real das águas subterrâneas;

- realização de estudos mais aprofundados de separação do hidrograma, tal como o da alternância de estações ao longo do ano;
- necessidade de uma rede de poços tubulares abrangente e com dados atualizados, para aprimorar os dados obtidos e confrontá-los com as estimativas a partir da análise do nível de águas subterrâneas.

A área de estudo pelas suas peculiaridades históricas e geológicas (com o afloramento do SAIG/SG), além de apresentar série longa de dados de vazão, pode servir como bacia-piloto para futuros estudos em Santa Catarina pela Rede Guarani/Serra Geral. Também é passível de investigação a aplicação do estudo da interação aquífero-rio em outras bacias hidrográficas do Estado de Santa Catarina, representativas de domínios hidrogeológicos, como ferramenta de análise do comportamento das águas superficiais e subterrâneas, visto que é um desafio que se impõe na práxis dos comitês de bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

ABO, R. K.; MERKEL, B. J. Investigation of the potential surface–groundwater relationship using automated base–flow separation techniques and recession curve analysis in Al Zerba region of Aleppo, Syria. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 8, n. 12, p. 10543-10563, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Sistema de informações hidrológicas**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br>>. Acesso em: 04.jul.2016.

_____. **Sistema de informações hidrológicas Hidroweb**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 22.jun.2017.

ALBUQUERQUE, T. B. V. **Caracterização física e biológica da Zona Hiporreica na interação rio-aquífero no Rio Beberibe – Pernambuco**. Recife, 2015. 166 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2015.

ALMEIDA, R. B. G. de; SILVA, D. J. Análise de áreas mais propícias a recarga do Sistema Aquífero Guarani na região hidrográfica do Planalto de Lages (SC): subsídios para a gestão das águas subterrâneas. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Porto Alegre – RS. **Anais...** Porto Alegre – RS: ABRH, 2011, v.1, p. 1-20.

ARANTES, E. J. **Emprego de infiltrômetros na caracterização da interação entre rio e aquífero**. São Carlos, 2003, 103 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K.; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K.; VALERIO, A. F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. In: **Ambiência**. Guarapuava, v. 4, n. 1, p. 131-149, jan./abr., 2008.

BARBOSA JÚNIOR, A. R. Escoamento superficial. In: **Elementos de hidrologia aplicada**. 2007. Disponível em: <http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~antenorrodriques/16_escoamento%20superficial.pdf>. Acesso em: 04.jan.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. Techniques and Methods, Book 3, Chapter B10. U.S. Department of the Interior: USGS, 2014.

_____. **Two digital filters for hydrograph separation with the Groundwater Toolbox**. U.S. Department of the Interior: USGS, 2017. Disponível em: <<https://water.usgs.gov/ogw/gwtoolbox/>>. Acesso em: 10.set.2017.

BARRETO, C. E. A. G.; WENDLAND, E.; GOMES, L. H.; MARCUSSI, F. F. N. A interação rio-aquífero na Bacia do Ribeirão da Onça: aplicação de equações empíricas para estimativa do escoamento de base. **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2006, p. 1-20.

BLANK, M. M. **Caracterização hidroquímica e estrutural do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral nos municípios de Águas Frias e Quilombo, SC**. Florianópolis, 2017. 105p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina.

BRANDT, M. **Uma história ambiental dos campos do planalto de Santa Catarina**. Florianópolis, 2012. 332 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em História, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis, 2012.

BRASIL. **Lei n. 4.771, de 15 de setembro de 1965**. Dispõe sobre o

código florestal brasileiro. Disponível em:
<<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1960-1969/lei-4771-15-setembro-1965-369026-publicacaooriginal-1-pl.html>>. Acesso em: 23.jan.2018.

_____. **Lei n. 7.735, de 22 de fevereiro de 1989.** Dispõe sobre a criação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Disponível em:
<<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1989/lei-7735-22-fevereiro-1989-365694-normaatualizada-pl.html>>. Acesso em: 23.jan.2018.

_____. **Decreto n. 750, de 10 de fevereiro de 1993.** Dispõe sobre o corte, a exploração e a supressão de vegetação primária ou nos estágios avançado e médio de regeneração da Mata Atlântica. Disponível em:
<<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1993/decreto-750-10-fevereiro-1993-449133-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 23.jan.2018.

_____. **Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em:
<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em: 11.jul.2016.

_____. **Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Disponível em:
<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 31.out.2017.

BRODIE, R. S.; HOSTETLER, S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. In: **Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conference**, Auckland, Nova Zelândia, 2005.

BRONSTERT, A.; NIEHOFF, D.; BÜRGER, G. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 2, p. 509-529,

2002.

BROWN, A. E.; ZHANG, L.; MCMAHON, T. A.; WESTERN, A. W.; VERTESSY, R. A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. **Journal of Hydrology**, v. 310, n. 1, p. 28-61, 2005.

BRUNKE, M.; GONSER, T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. **Freshwater Biology**, v. 37, p. 1-33, 1997.

BURATTO, L. G.; BURATTO, J. A. B.; MENEZES, N.; OLIVEIRA, O. R. **Urubici e suas belezas naturais: uma história na Serra Catarinense**. 2. ed. Tubarão: Coan Indústria Gráfica, 2013. 464p.

BURGER, D. **Tópicos de manejo florestal ordenamento florestal: a produção florestal**. Curitiba: UFPR, 1976.

CALHEIROS, R. O.; TABAI, F. C. V.; BOSQUILIA, S. V.; CALAMARI, M. **Cadernos da Mata Ciliar**. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Departamento de Proteção da Biodiversidade. São Paulo: SMA, 2009. 36p.

CARLOTTO, T.; CHAFFE, P. L. B.; SILVA, R. V.; GRZYBOWSKI, J. M. V. Uma ferramenta computacional de análise de séries temporais de vazão e caracterização de bacias hidrográficas. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília - DF. **Anais...** Brasília - DF: ABRH, 2015. v. 1. p. 1-8.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. Escoamento superficial. In: **Hidrologia**. Rio de Janeiro/RJ: UFRRJ, 2006, p. 95-115.

CERTI. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina – PERH/SC: prognóstico das demandas hídricas de Santa Catarina. Cenário tendencial. Relatório Técnico Preliminar**. Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina.

Florianópolis, 2017. 41p.

CHANIE, T.; COLLICK, A. S.; ADGO, E.; LEHMANN, C. J.; STEENHUIS, T. S. Eco-hydrological impacts of *Eucalyptus* in the semi humid Ethiopian Highlands: the Lake Tana Plain. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 61, n. 1, p. 21-29b, 2013.

CHERPANSKY, M. M.; VSEVOLOZHSKY, V. A.; ZEKTSER, I. S. Interconnection of surface and groundwater. In: KHUBLARYAN, M. G. (Org.). **Types and properties of waters**: Volume 1 – Encyclopedia of life support systems. UNESCO/EOLSS: Rússia, 2009. 468p.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. O hidrograma unitário. In: **Introduzindo Hidrologia**. Apostila IPH/UFRGS, 2008, p. 110-128.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 18, p. 2614-2622, 2013.

CORRÊA, W. K.; GERARDI, L. H. O. **A produção familiar e os desafios do mercado**. Revista de Ciências Humanas, n.31, p. 109-131, abril/2002.

CORRÊA, W. K.; CORRÊA, R. K. Lazer e potencialidades turísticas no meio rural na região serrana catarinense: o exemplo do município de Urubici. In: II Encontro de Grupos de Pesquisa, 2006, Uberlândia - MG. **Anais...** Uberlândia-MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2006. v. 1. p. 1-17.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, n. 1, p. 206-217, 2003.

COSTA, M. L. M.; MEDEIROS, C. M.; BATISTA, M. L. C.; RIBEIRO, M. M. R. Análise da integração das águas superficiais e subterrâneas no

aparato legal de recursos hídricos do Brasil e do Estado da Paraíba. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008, Natal - RN. **Anais...** Natal - RN: ABRH, 2008, p. 1-11.

COUTO, J. L. V. **Enchentes Urbanas**. Imagem das vazões máximas em vários tipos de cobertura da terra. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/mma10.htm>>. Acesso em: 20.jan.2017.

CROOKS, S.; DAVIES, H. Assessment of land use change in the Thames catchment and its effect on the flood regime of the river. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 26, n. 7-8, p. 583-591, 2001.

CURTARELLI, M. P.; SILVA, D. J.; FERREIRA, C. M. Estudo do balanço hídrico na bacia do rio Canoas em Urubici, SC, Brasil: subsídio à proteção da zona de recarga direta do Sistema Aquífero Guarani. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 108-121, 2010.

DAMS, J.; WOLDEAMLAK, S. T.; BATELAAN, Okke. 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.

DEFRIES, R.; ESHLEMAN, K. N. Land-use change and hydrologic processes: A major focus for the future. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 11, p. 2183-2186, 2004.

DESCOVI FILHO, L. L. V. **Geomorfoestruturas e compartimentação tectônica do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral no Estado de Santa Catarina, Brasil**. Florianópolis, 2015. 224 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis, 2015.

DIAS, L. C. P. **Efeito da mudança na cobertura vegetal na**

evapotranspiração e vazão de microbacias na região do Alto Xingu. Viçosa, 2013. 103p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Viçosa, 2013.

DORA, A. S. **Quantificação de reservas renováveis de água subterrânea em bacias hidrográficas a partir de séries históricas de vazão: uma ferramenta para a gestão de bacias.** Porto Alegre, 2013. 84p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. **Hydrological processes**, v. 19, n. 2, p. 507-515, 2005.

_____. 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.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA/ CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AMBIENTAIS DE SANTA CATARINA (EPAGRI/CIRAM). **Mapas Digitais de Santa Catarina:** Mapoteca Topográfica Digital de Santa Catarina. cooperação técnica IBGE/EPAGRI. Disponível em:
<<http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>>. Acesso em: 13.mar.2017.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA/TECNOLOGIAS SOCIAIS PARA A GESTÃO DE ÁGUAS (EPAGRI/TSGA). **Proteção de fonte modelo caxambu.** Banner. Disponível em:
<<http://tsga.ufsc.br/index.php/biblioteca/materiais-pedagogicos/banners>>. Acesso em: 29.out.2017.

FERNANDES, A. J.; MALDANER, C.; WAHNFRIED, I.; FERREIRA, L. M. R.; PRESSINOTTI, M. M. N.; VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; HIRATA, R. Modelo conceitual preliminar de circulação de água

subterrânea no aquífero Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. **XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2006.

FERNANDES, A. M.; NOLASCO, M. B.; MORTATTI, J. Estimativa do escoamento superficial rápido e sua carga em suspensão com a aplicação do modelo de separação de hidrogramas com filtros numéricos: Bacia do Rio Sorocaba – SP. **Geociências**, São Paulo, UNESP, v. 29, n. 1, p. 49-57, 2010.

FEDERAL INTERAGENCY STREAM RESTORATION WORKING GROUP (FISRWG). **Stream corridor restoration: principles, processes, and practices**. FISRWG: Natural Resources Conservation Service (USDA), 1998. 637 p.

FLORIANI, G. S.; NETO, J. F. A trajetória do uso do solo por florestas na região dos campos de Lages. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 10, n.2, p 93-102, 2011.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; *et al.* Global consequences of land use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; SCHMIDT, G.; GARDUÑO, H. A Iniciativa do Programa Sistema Aquífero Guarani – Rumo à Gestão Prática da Água Subterrânea em um Contexto Transfronteiriço. In: FOSTER, S.; KEMPER, K. (Orgs.). **GWMATE – Banco Mundial**. Coleção de Perfis de Caso. 3ª ed., v. 9, 2009, pp. 1-28.

FREITAS, M. A. Hidrogeologia. In: FREITAS, M. A.; CAYE, B. R.; MACHADO, J. L. F (Orgs.). **Diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do Oeste do Estado de Santa Catarina** – Projeto Oeste de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM/SDM-SC/SDA-SC/EPAGRI. 2002. p. 54-69.

FREITAS, M. A.; CAYE, B. R. Poços tubulares no aquífero fraturado Serra Geral do Oeste de Santa Catarina. In: I Simpósio de Hidrogeologia

do Sudeste e XIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 2003, Petrópolis – RJ. **Anais...** Petrópolis – RJ: ABAS, 2003, v. 1, p. 313-319.

FREITAS, M. J. C. C.; SANTO, M. A. D.; OLIVEIRA, F. H. Introdução. In: FREITAS, M. J. C. C.; OLIVEIRA, F. H (Orgs.). **Estiagem no Oeste Catarinense: diagnóstico e resiliência**. Relatório Técnico Científico. Florianópolis, 2017. p. 24-33.

FREITAS, M. J. C. C.; KAETSU, P. T. Análise sistêmica complexa da estiagem e contribuições para o planejamento de intervenções. In: FREITAS, M. J. C. C.; OLIVEIRA, F. H (Orgs.). **Estiagem no Oeste Catarinense: diagnóstico e resiliência**. Relatório Técnico Científico. Florianópolis, 2017. p. 240-257.

GALANO, C.; CURTI, M.; MOTOMURA, O.; PORTO-GONÇALVES, C. W.; SILVA, M.; ÁNGEL, A.; ÁNGEL, F.; BORRERO, J. M.; CARRIZOSA, J. *et al.* Manifiesto por la vida por una ética para la sustentabilidad. **Ambiente & Sociedad**, v. 5, n, 10, 1º semestre/2002.

GARDNER, K. M. **The importance of surface water/groundwater interactions**. Issue paper. Seattle: Environmental Protection Agency Report, 1999. 22p.

GERMER, S.; NEILL, C.; KRUSCHE, A. V.; ELSENBEER, H. Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: undisturbed forest to pasture. **Journal of Hydrology**, v. 380, n. 3, p. 473-480, 2010.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175p.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F.; SPADOTTO, C. A. Classificação das áreas de recarga do Sistema Aquífero Guarani no Brasil em domínios pedomorfoagrocimáticos – subsídio aos estudos de avaliação de risco de contaminação das águas subterrâneas. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 18, p. 67-74, 2006.

GOMES, M. A. M. **Caracterização da vegetação de campos de altitude em unidades de paisagem na região do Campo dos Padres, Bom Retiro/Urubici, SC.** Florianópolis, 2009. 115 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal, Centro de Ciências Biológicas, Florianópolis, 2009.

GOULART FILHO, A. O planejamento estadual em Santa Catarina de 1955 a 2002. **Ensaios FEE**, v. 26, n. 1, p. 627-660, 2005.

_____. **Formação econômica de Santa Catarina.** 2 ed. rev. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007.

HALFORD, K. J.; MAYER, G. C. Problems associated with estimating groundwater discharge and recharge from stream-discharge records. **Ground Water**, v. 38, n.3, p. 331-342, 2000.

HANASHIRO, G. U. **Apropriação turística na arquitetura da cidade de Urubici – SC.** Florianópolis, 2015. 201p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Urbanismo, História e Arquitetura da Cidade, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2015.

HENNING, L. A. **Uma abordagem crítica do Projeto Rede Guarani/Serra Geral (RGSG), no Estado de Santa Catarina: espaços de dependência e espaços de compromisso.** Florianópolis, 2013. 178 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis, 2013.

HISCOCK, K. M.; BENSE, V. F. **Hidrogeology** – principles and practice. 2^a ed. Londres: Wiley Blackwell, 2014. 564p.

HOFFMANN, G. P. **O uso da terra e a influência sobre o volume das águas na Bacia do Rio Biguaçu – SC.** Florianópolis, 2014. 141 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Centro de Filosofia e

Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina.

HOFFMANN, G. P.; NANNI, A. S. A modificação dos usos da terra e seus efeitos no escoamento das águas: uma revisão. In: **Anais do XVI Simpósio de Geografia da UDESC – Água: Riscos Geoambientais**, Florianópolis/SC, v.1, p. 84-96, 2016.

_____. 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, jul. 2017.

HURKMANS, R. T. W. L.; TERINK, W.; UIJLENHOET, R.; MOORS, E. J.; TROCH, P. A.; VERBURG, P. H. Effects of land use changes on streamflow generation in the Rhine basin. **Water Resources Research**, v. 45, n. 6, p. 1-15, 2009.

IDOWU, O. A. Hydrological processes of interaction between surface water and groundwater – a review. **International Journal of Agricultural Sciences, Sciences, Environment and Technology**, v. 6, n. 2, p. 172-190, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico de 1960**. VII Recenseamento Geral do Brasil. Série Regional. Rio de Janeiro: volume I, tomo XV, 1ª parte, 1968.

_____. **Censo Demográfico de 1980**. IX Recenseamento Geral do Brasil. Dados Distritais, Santa Catarina. Rio de Janeiro: volume 1, tomo 3, número 19, 1982.

_____. **Vocabulário básico de recursos naturais e meio ambiente**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. 332 p.

_____. **Manual técnico de uso da terra**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 171p.

_____. **Base cartográfica contínua.** Apresenta arquivos da área de Geociências da instituição para download. 2013. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 14.fev. 2017.

_____. **Urubici.** Fornece informações acerca do desenvolvimento histórico e administrativo do município de Urubici. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/painel/historico.php?codmun=421890>>. Acesso em: 12.set.2017a.

_____. **Censo Demográfico 2000 - Resultados do universo.** Fornece dados demográficos de todos os municípios do país para o ano de 2000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/defaultt_ab_munic.shtm>. Acesso em: 12.set.2017b.

_____. **Censo 2010.** Fornece dados demográficos de todos os municípios do país para o ano de 2010. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php>>. Acesso em: 12.set.2017c.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). **Parque Nacional de São Joaquim.** Fornece informações sobre o Parque Nacional de São Joaquim. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/parnasaojoaquim/>>. Acesso em: 20.set.2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Divisão de Geração de Imagens.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/portugues/satelites.php#collapseLandsat>>. Acesso em: 20.jan.2017.

ISRAEL, C. J. **Aspectos da organização agrária e da produção familiar no município de Urubici:** o caso das hortaliças. Florianópolis, 1991. 189 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis, 1991.

JARDIM, M. H. **Pagamentos por serviços ambientais na gestão de recursos hídricos**: o caso do município de Extrema-MG. Brasília, 2010. 221p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília, 2010.

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

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

KRAUSE, S.; BRONSTERT, A.; ZEHE, E. Groundwater-surface water exchange fluxes in a Pleistocene lowland and the impacts on riparian zone water balance and nitrate conditions. **Water quality and sediment behavior of the future**: predictions for the 21st century, v. 314, 2007, p. 98-107.

LEDESMA, P. A. M. **Relação do escoamento de base com a fisiografia e a hidrogeologia em rio efluente**: Rio Gravataí/RS. Porto Alegre, 2016. 130p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEFF, Enrique. **Racionalidad ambiental**: la reapropiación social de la naturaleza. México: Siglo XXI, 2004.

LERNER, D. N. Surface water-groundwater interactions in the context of groundwater resources. In: XU, Y.; BEEKMAN, H. E. **Groundwater recharge estimation in Southern Africa**. UNESCO – International Hydrological Programme, p. 91-107, 2003.

LIM, L.; SASAKI, Y. Review of research trends in watershed-based land use analysis. **Journal of JSCE**, v. 4, n. 1, p. 227-242, 2016.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; FILHO, H. de F. L. (Orgs.). **Matas ciliares**:

conservação e recuperação. 2. ed. São Paulo: EDUSP/FAPESP, 2000. p. 33-44.

LIMA, C. H. R.; FRISCHKORN, H.; BURTE, J. Avaliação da interação rio-aquífero a partir de dados experimentais e de um modelo analítico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n.1, jan./mar., 2007, p. 217-230.

LIMA, W. P. **A silvicultura e a água**: ciência, dogmas, desafios. Rio de Janeiro: Instituto Bioatlântica, 2010. 64 p.

LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. **Hydrology for engineers**. 3ª ed. New York: McGraw-Hill, 1982. 508 p.

LIU, Z.; YAO, Z.; HUANG, H.; WU, S.; LIU, G. Land use and climate changes and their impacts on runoff in the Yarlung Zangbo river basin, China. **Land Degradation & Development**, v. 25, n. 3, p. 203-215, 2014.

LOCH, C. **A interpretação de imagens aéreas**: noções básicas e algumas aplicações nos campos profissionais. 5 ed. rev. atual. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2008. 103p.

LOURENCETTI, J.; PRATES, M. M.; OLIVEIRA, J. N. Rebaixamento do aquífero Bauru em São José do Rio Preto, SP. In: XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 2012, Bonito – MS. **Anais...** Bonito – MS: ABAS, 2012, v. 1, p. 1-5.

LUCAS, M. C.; WENDLAND, E. Estimativa de recarga subterrânea a partir de análise da curva de recessão do escoamento de base. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió - AL. **Anais...** Porto Alegre-RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011. v. 1. p. 1-15.

LUCAS, M. C.; GUANABARA, R. C.; WENDLAND, E. Estimativa de

recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. **Boletín Geológico y Minero**, v. 123, n. 3, p. 311-323, 2012.

MACHADO, J. L. F. **Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. São Leopoldo, 2005. 254 p. Tese (Doutorado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Geologia, São Leopoldo, 2005.

_____. **Mapa hidrogeológico do Estado de Santa Catarina – Escala 1:500.000**. Porto Alegre: CPRM, 2013.

MACHADO, H. C. **A territorialização turística no município de Urubici – SC**. Florianópolis, 2016. 188 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis, 2016.

MARSHALL, M. R.; FRANCIS, O. J.; FROGBROOK, Z. L.; JACKSON, B. M.; MCINTYRE, N.; REYNOLDS, B.; *et al.* The impact of upland land management on flooding: results from an improved pasture hillslope. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 3, p. 464-475, 2009.

MATTEI, L. Políticas de apoio ao desenvolvimento da agricultura familiar no Brasil: o caso recente do Pronaf. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 38, n.1, jan./mar. de 2007.

MATTIUZI, C. D. P.; KIRCHHEIM, R.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Estimativa de recarga subterrânea a partir da separação do escoamento de base na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí. **Águas Subterrâneas**, v. 29 n. 3, p. 285-300, jan./ 2015.

MATTOS, T. S. **Avaliação do impacto da substituição de pastagem por eucalipto na recarga de aquífero freático**. 2015. 141 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da recarga em área urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 3, p. 35-46, 2008.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de (Orgs). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. UNB: Brasília, 2012. 276 p.

MILLER, J. D.; KIM, H.; KJELDSEN, T. R.; PACKMAN, J.; GREBBY, S.; DEARDEN, R. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. **Journal of Hydrology**, v. 515, n. 1, p. 59-70, 2014.

MIRANDA, A. C. R.; PRUSKI, F. F.; MARTINEZ, M. A.; CECON, P. R. Métodos de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo: estudo de caso para a bacia do Rio das Velhas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 169-181, abr./jun. 2014.

MONTEIRO, J. P.; SILVA, J. M.; GUERREIRO, P.; MARTINS, J.; REIS, E. Modelação de relações entre as águas superficiais e subterrâneas nos aquíferos do Algarve Central. **Seminários sobre Águas Subterrâneas**. Lisboa: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, v. 1, p. 1-8, 2006.

MONTEIRO, M.; SILVA, P. V. Clima, estiagem climática e meses secos. In: FREITAS, M. J. C. C.; OLIVEIRA, F. H (Orgs.). **Estiagem no Oeste Catarinense: diagnóstico e resiliência**. Relatório Técnico Científico. Florianópolis, 2017. p. 44-82.

NANNI, A. S. **O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul**: origem e condicionamento geológico. Porto Alegre, 2008. 127p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

NERY, C. V. M.; FERNANDES, F. H. S.; MOREIRA, A. A.; BRAGA, F. L. Avaliação das técnicas de classificação MAXVER, MAXVER – ICM e Distância Mínima Euclidiana de acordo com Índice Kappa. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 2, p. 320-328, 2013.

NOGUEIRA, R. **Cartografia**: representação, comunicação e visualização de dados espaciais. 3. ed. rev. e. amp. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2009. 327p.

NOSETTO, M. D.; JOBBÁGY, E. G.; BRIZUELA, A. B.; JACKSON, R. B. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 154, p. 2-11, 2012.

O'BRIEN, R. J.; MISSTEAR, B. D.; GILL, L. W.; DEAKIN, J. L.; FLYNN, R. Developing an integrated hydrograph separation and lumped modelling approach to quantifying hydrological pathways in Irish river catchments. **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 259-270, 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-Agriambi**, v. 14, n. 11, p. 1186-1192, 2010.

ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS (OEA). **Aquífero Guarani**: Programa Estratégico de Ação. Edição bilíngue (português e espanhol). Relatório do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. 2009a. 424p.

_____. **Aquífero Guarani**: Síntese Hidrogeológica do Sistema Aquífero Guarani. Edição bilíngue (português e espanhol). Série Manuais e Documentos Técnicos do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani, v.5, 2009b. 105p.

PAES, C. O.; MEIRA NETO, A. A.; MANZIONE, R. L.; WENDLAND, E. Influência da compactação de solos agrícolas na recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG). In: XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2012, Bonito-MS.

Anais... São Paulo-SP: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, v. 1. p. 1-4, 2012.

PORTO, R.; ZAHHEL, 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, p. 805-847.

PEIXER, Z. I. **A Princesa da Serra: entre a cidade ideal, cidade memória, cidade vicenciada**. Revista da Memória. Lages, n.1, 1996.

PELUSO JÚNIOR, V. A. **Aspectos geográficos de Santa Catarina**. Florianópolis: FCC Fundações/Editora da UFSC, 1991.

PORTO, R. L. L.; ZAHED FILHO, K.; MARCELLINI, S. S. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1999.

PORTO-GONÇALVES, C.W. A geopolítica da água e a crise do conhecimento. In: TREVISOL; SCHEIBE. **Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe: Natureza e Sociedade**. Joaçaba: Ed. Unoesc, 2011, p. 17-53.

_____. **A globalização da natureza e a natureza da globalização**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006.

PUYOL, A. F. B.; VILLA, M. A. J. **Principios y fundamentos de la hidrología superficial**. Cidade do México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2006. 289p.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS 2.14 Geographic Information System User Guide**. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://docs.qgis.org/2.14/pt_BR/docs/user_manual>. Acesso em: 03.fev.2017.

RABELO, J. L.; WENDLAND, E. Estudo da interação rio-aquífero no Sistema Jacaré-Tietê por meio de um modelo numérico baseado em SIG. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2010, São Luiz - MA. **Anais...** São Paulo-SP: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2010. v. 1. p. 1-15.

RAITZ, C. S. **Análise do uso e ocupação do solo como suporte a preservação dos recursos hídricos**. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2012.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação de aptidão agrícola das terras**. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: EMPRAPA-CNPS, 1995. 65 p.

RECH, T. D. **Ramificação e produtividade do vimeiro em diferentes condições ambientais e de manejo no planalto sul catarinense**. Curitiba, 2006. 167 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, 2006.

RIBEIRO, W. C. **Geografia política da água**. São Paulo: Annablume, 2008. 162p.

RISSER, D. W.; GBUREK, W. J.; FOLMAR, G. J. **Comparison of methods for estimating ground-water recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the eastern United States**. Virginia:United States Geological Survey, Scientific Investigations Report, 2005. 37p.

ROCHA, I. O.; GUTERRES, C. D.; ALBINO, L.; KABILIO, M. L. Desenvolvimento regional e dinâmicas socioeconômicas. In: FREITAS, M. J. C. C.; OLIVEIRA, F. H (Orgs.). **Estiagem no Oeste Catarinense: diagnóstico e resiliência**. Relatório Técnico Científico. Florianópolis, 2017. p. 117-163.

RODRIGUES, M. T.; POLLO, R. A.; RODRIGUES, B. T.; MALHEIROS, J. M. CAMPOS, S. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado no uso da terra para avaliação entre classificadores a partir do Índice Kappa. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 23, n. 1, p. 60-70, fev./2014.

RODRÍGUEZ-SUÁREZ, J. A.; SOTO, B.; PEREZ, R.; DIAZ-FIERROS, F. Influence of *Eucalyptus globulus* plantation growth on water table levels and low flows in a small catchment. **Journal of Hydrology**, v. 396, n. 3, p. 321-326, 2011.

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.

_____. **Considerations for use of the RORA program to estimate ground-water recharge from streamflow records**. Virginia: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2000.

_____. **Program user guide for RECESS**. Virginia: United States Geological Survey (USGS), 2007a. 19p.

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

SAJIKUMAR, N.; REMYA, R. S. Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. **Journal of Environmental Management**, v. 161, p. 460-468, 2015.

SALEMI, L. F.; GROPPPO, J. D.; TREVISAN, R.; SEGHESI, G. B.; MORAES, J. M.; FERRAZ, S. F. B.; MARTINELLI, L. A. Consequências hidrológicas da mudança de uso da terra de floresta para pastagem na região da floresta tropical pluvial atlântica. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 127-140, 2012.

SANTA CATARINA. **SIGSC – Sistema de informações geográficas**. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS). Fornece produtos de geoprocessamento derivados do aerolevantamento do triênio 2010-2011-2012. Disponível em: <<http://sigsc.sds.sc.gov.br/>>. Acesso em: 30.mar.2017.

SANTOS, M. 1992: A redescoberta da natureza (Aula inaugural da Fac. Filos. Letras Cienc. Humanas da USP, Sao Paulo). **Estudos Avançados**, v.6, n.14, p. 95-106, 1992.

SANTOS, D. G.; MELO, V. G.; CARVALHO, F. H. Programa Produtor de Água. In: PAGIOLA, S.; GLEHN, H. C. V.; TAFFARELLO, D. (Orgs.). **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil**. São Paulo: SMA/CBRN, 2013. p. 233-250.

SÃO LOURENÇO DO OESTE. **Decreto n. 3.526, de 21 de setembro de 2007**. Regulamenta a Lei municipal n. 1.701, de 20 de setembro de 2007, que cria o “Programa Municipal de Recuperação da Mata Nativa”. Disponível em: <<http://www.saolourenco.sc.gov.br/decretos/2707>>. Acesso em: 29.out.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-RN. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2008.

SCHEIBE, L. F.; NANNI, A.S.; HENNING, L. A. Água, Energia e Sustentabilidade: Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral e a Ameaça do Gás de Xisto na Bacia do Paraná. In: **18º congresso Brasileiro de Direito Ambiental**, 2013, São Paulo. Licenciamento, Ética e Sustentabilidade. São Paulo: Instituto Direito por um Planeta Verde, 2013. v. 1. p. 203-218.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Coletânea de informações socioeconômicas de Santa Catarina**. Plano plurianual 2015-2018. Florianópolis:

SEBRAE, 2014. 131p.

SHUSTER, W. D.; BONTA, J.; THURSTON, H.; WARNEMUENDE, E.; SMITH, D. R. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: a review. **Urban Water Journal**, v. 2, n. 4, p. 263-275, 2005.

SILVA, R. M.; SILVA, L. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na Bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 2, p. 357-372, 2010.

SILVA, D. R. A.; KIRCHHEIM, R. R. Informações hidrogeológicas básicas do Estado de SC. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Porto Alegre – RS. **Anais...** Porto Alegre – RS: ABRH, 2011, v.1, p. 1-18.

SIMINSKI, A.; SANTOS, K. L.; FANTINI, A. C.; REIS, M. S. Recursos florestais nativos e a agricultura familiar em Santa Catarina – Brasil. **Bonplandia**, v. 20, n.2, p.371-389, 2011.

SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; BETTÚ, D. F.; HOLZ, M. Compartimentação estrutural da Bacia do Paraná: a questão dos lineamentos e sua influência na distribuição do Sistema Aquífero Guarani. **Geociências**, v. 26, p. 297-311, 2007.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n.1, p. 52-67, 2002.

SOUZA, M. L. **O desafio metropolitano**: um estudo sobre a problemática sócio-espacial nas metrópoles brasileiras. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. 368p.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; SOUZA, E. B.; SILVA JÚNIOR, R. O. S.; NASCIMENTO, W. R.; MENDONÇA, B. R. V.; GUIMARÃES, J. T. F.;

DALL'AGNOL, R.; SIQUEIRA, J. O. Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 167, p. 175-184, 2016.

STARZYNSKI, R.; SIMÕES, S. J. Avaliação quantitativa do uso dos recursos hídricos em unidade de conservação: estudo de caso do Parque Estadual Serra do Mar. **Sociedade & Natureza**, v. 27, n. 2, p. 327-340, mai./ago. 2015.

STERLING, S. M.; DUCHARNE, A.; POLCHER, J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 4, p. 385-390, 2013.

SURIYA, S.; MUDGAL, B. V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed—A case study. **Journal of Hydrology**, v. 412, n.1, p. 210-219, 2012.

TAMBOSI, L. R.; VIDAL, M. M.; FERRAZ, S. F. B.; METZGER, J. P. Funções eco-hidrológicas das florestas nativas e o Código Florestal. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 151-162, 2015.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. C.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. 624 p.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1, p. 61-68, 2000.

_____. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos**. In: FÓRUM BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, ANA, 2002. 150 p.

_____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2009. 943p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Earth Explorer**. Apresenta produtos derivados de imagens de satélite para todo o mundo. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 13.mai.2017.

_____. **Water Science Glossary of Terms**. Apresenta glossário de termos hidrogeológicos. Disponível em: <<https://water.usgs.gov/edu/dictionary.html>>. Acesso em: 17.dez.2017.

VALDATI, J.; LINHEIRA, G.; KABILIO, M. L. Recursos hídricos no oeste catarinense. In: FREITAS, M. J. C. C.; OLIVEIRA, F. H (Orgs.). **Estiagem no Oeste Catarinense: diagnóstico e resiliência**. Relatório Técnico Científico. Florianópolis, 2017. p. 83-116.

VAN DIJK, A. I. J. M.; KEENAN, R. J. Planted forests and water in perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1-2, p. 1-9, 2007.

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

_____. **Recarga de aquíferos: subsídios à gestão hídrica e ambiental – Bacia do Rio Paracatu - SF7**. Ouro Preto, 2014. 302 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Escola de Minas, Ouro Preto, 2014.

_____. O que mantém as águas fluindo em nossos rios? Repensando a hidrogeologia para aperfeiçoar as políticas públicas [Versão traduzida]. **Applied Water Science**, v. 7, n. 4, p. 1-15, 2017.

VEGNER, J. R.; PITMAN, W. V. Recharge and stream flow. In: XU, Y.; BEEKMAN, H. E. **Groundwater recharge estimation in Southern Africa**. UNESCO – International Hydrological Programme, p. 109-123, 2003.

VELÁSQUEZ, L. N. M.; BRANCO, O. E. A.; CARVALHO FILHO, C. A.; MINARDI, P. S. P.; COTA, S. D. S.; BOMTEMPO, V. L.; CAMARGOS, C. C.; RODRIGUES, P. C. H.; FIUMARI, S. L. Caracterização hidrogeológica dos aquíferos Bauru e Serra Geral e avaliação das reservas do aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas XVI Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 2008, Natal – RN. **Anais...** Natal – RN: ABAS, 2008, v. 1, p. 1-20.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; BESKOW, S.; NORTON, L. D. Impacts of land-use changes on the hydrology of the Grande River Basin Headwaters, Southeastern Brazil. **Water Resources Management**, v. 28, n. 13, p. 4537-4550, 2014.

VOGELMANN, E. S.; PREVEDELLO, J.; REICHERT, J. M. Origem dos compostos hidrofóbicos e seus efeitos em florestas de *Pinus* e *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 4, p. 1067-1079, 2015.

WENDLAND, E.; GOMES, L. H.; TRÖGER, U. Recharge contribution to the Guarani Aquifer System estimated from the water balance method in a representative watershed. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, n. 2, p. 595-609, 2015.

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. Subprograma de Cartografia Geológica Regional. Porto Alegre: CPRM, 2014.

WILSON, E. M. **Engineering Hydrology**. 4ª ed. London, Macmillan, 1990.

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.

WOESSNER, W. W. Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hidrogeologic thought. **Groundwater**, v. 38, n. 3, mai./jun. 2000, p. 423-429.

WOLDESENBET, T. A.; ELAGIB, N. A.; RIBBE, L.; HEINRICH, J. Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Science of The Total Environment**, v. 575, p. 724-741, 2017.

YE, X.; ZHANG, Q.; LIU, J.; LI, X.; XU, C. Y. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China. **Journal of Hydrology**, v. 494, p. 83-95, 2013.

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, p. 412-422, 2006.

ZHANG, Y.; GUAN, D.; JIN, C.; WANG, A.; WU, J.; YUAN, F. Impacts of climate change and land use change on runoff of forest catchment in northeast China. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 2, p. 186-196, 2014.

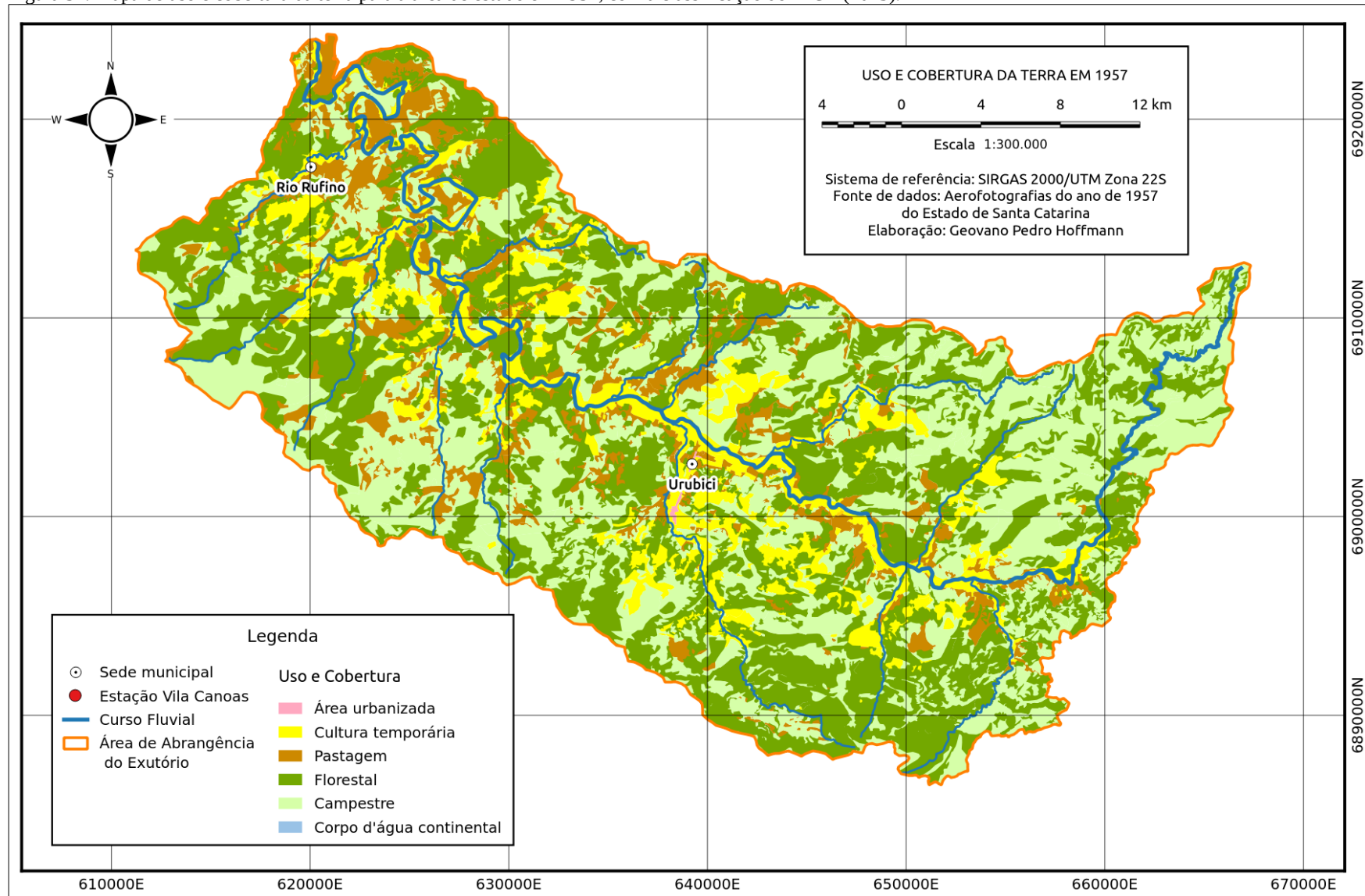
ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H.; MORAES, J. M. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. **Forest Ecology and Management**, v. 222, n. 1, p. 29-38, 2006.

APÊNDICE A

Todos os dados utilizados para elaboração e discussão dos resultados da área de estudo desta pesquisa (séries históricas de vazão e precipitação, uso e cobertura da terra, população e estimativas do escoamento de base e da velocidade média do escoamento superficial) estão organizados em planilhas, as quais estão disponíveis a partir do seguinte link: <https://drive.google.com/file/d/1ZMkhcd5LJstXM0a-AFeOCxhqVLSJz-ID/view?usp=sharing>

APÊNDICE B

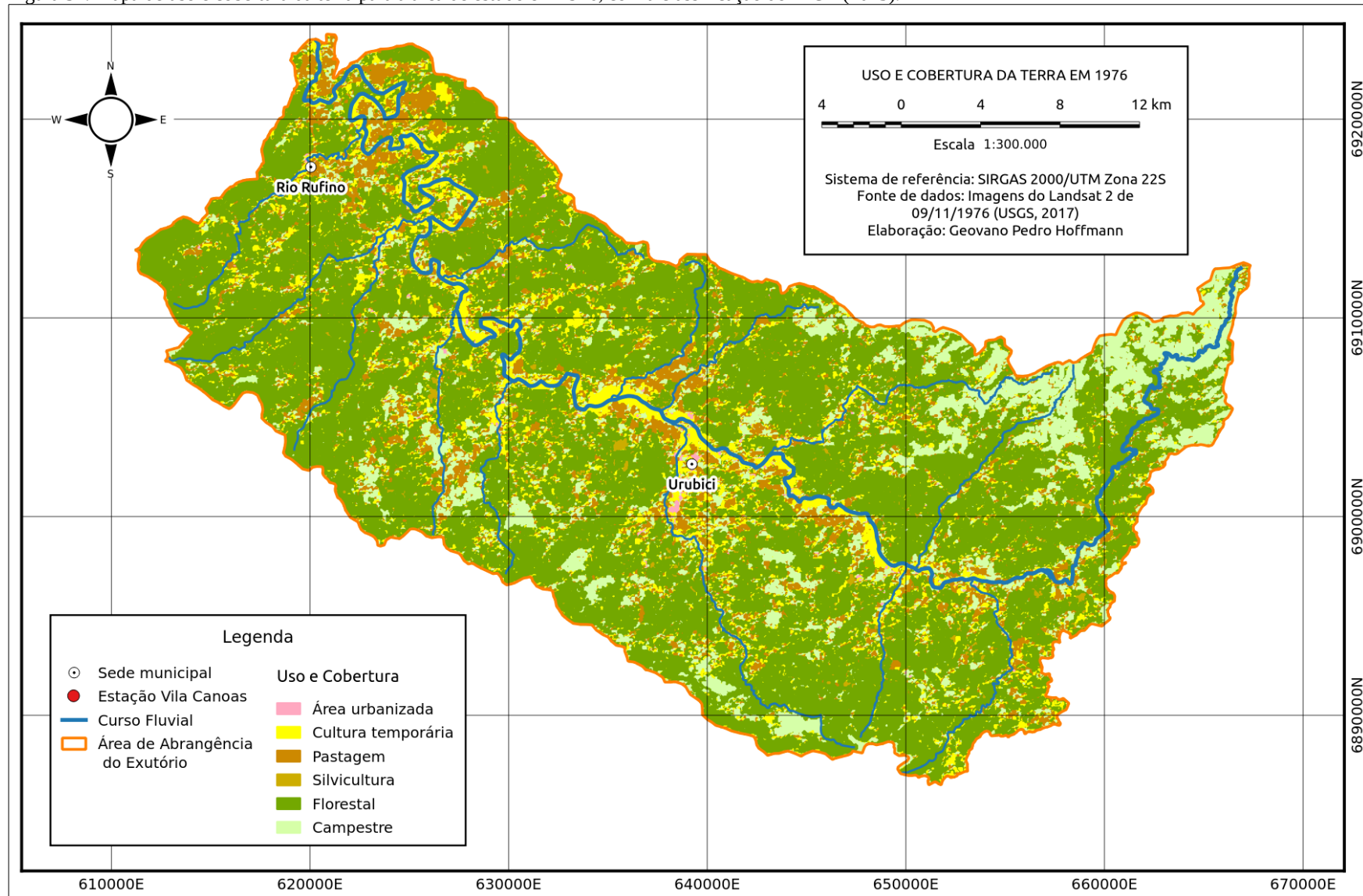
Figura 51. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1957, com a classificação do IBGE (2013).



Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE C

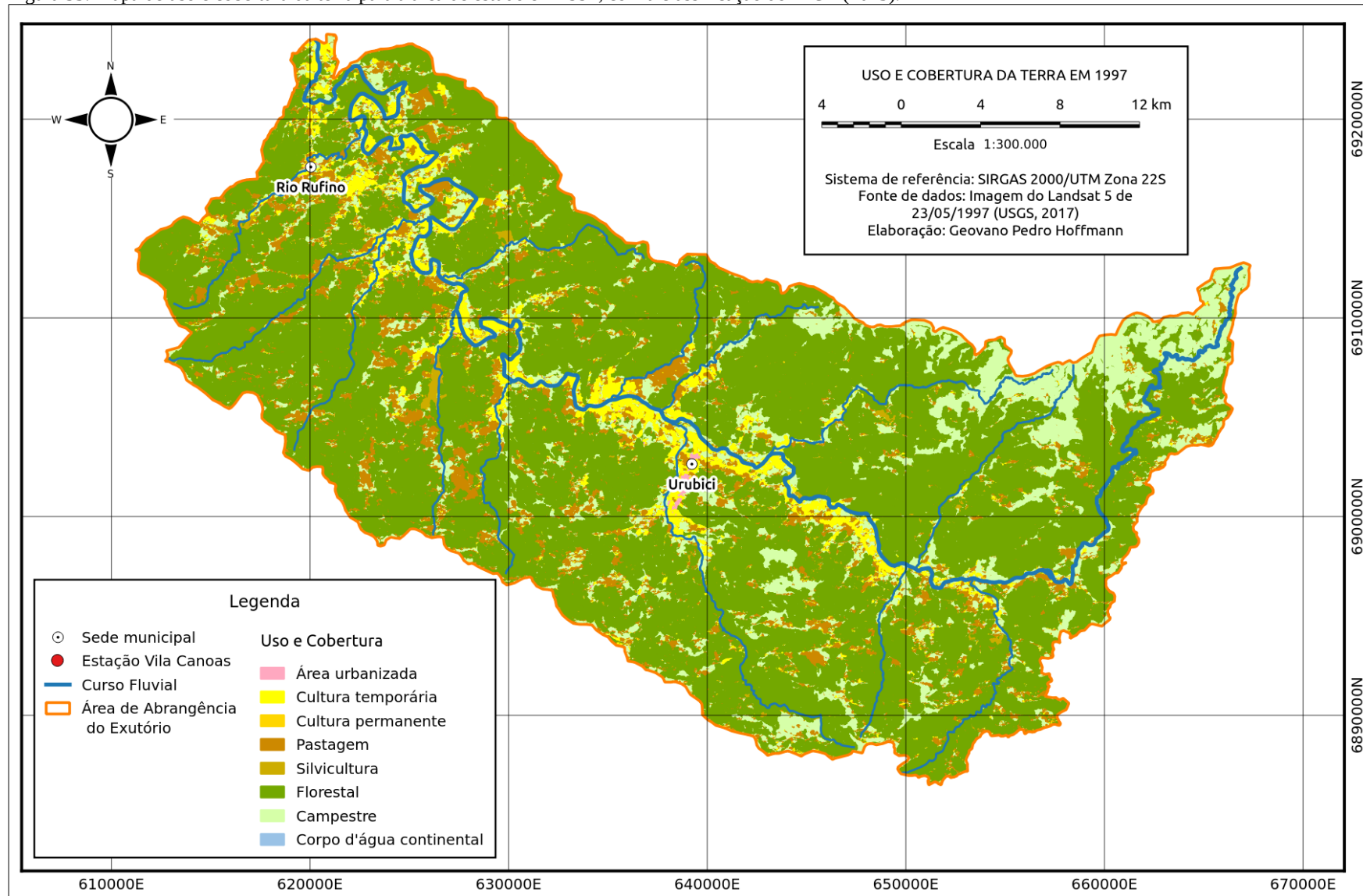
Figura 52. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1976, com a classificação do IBGE (2013).



Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE D

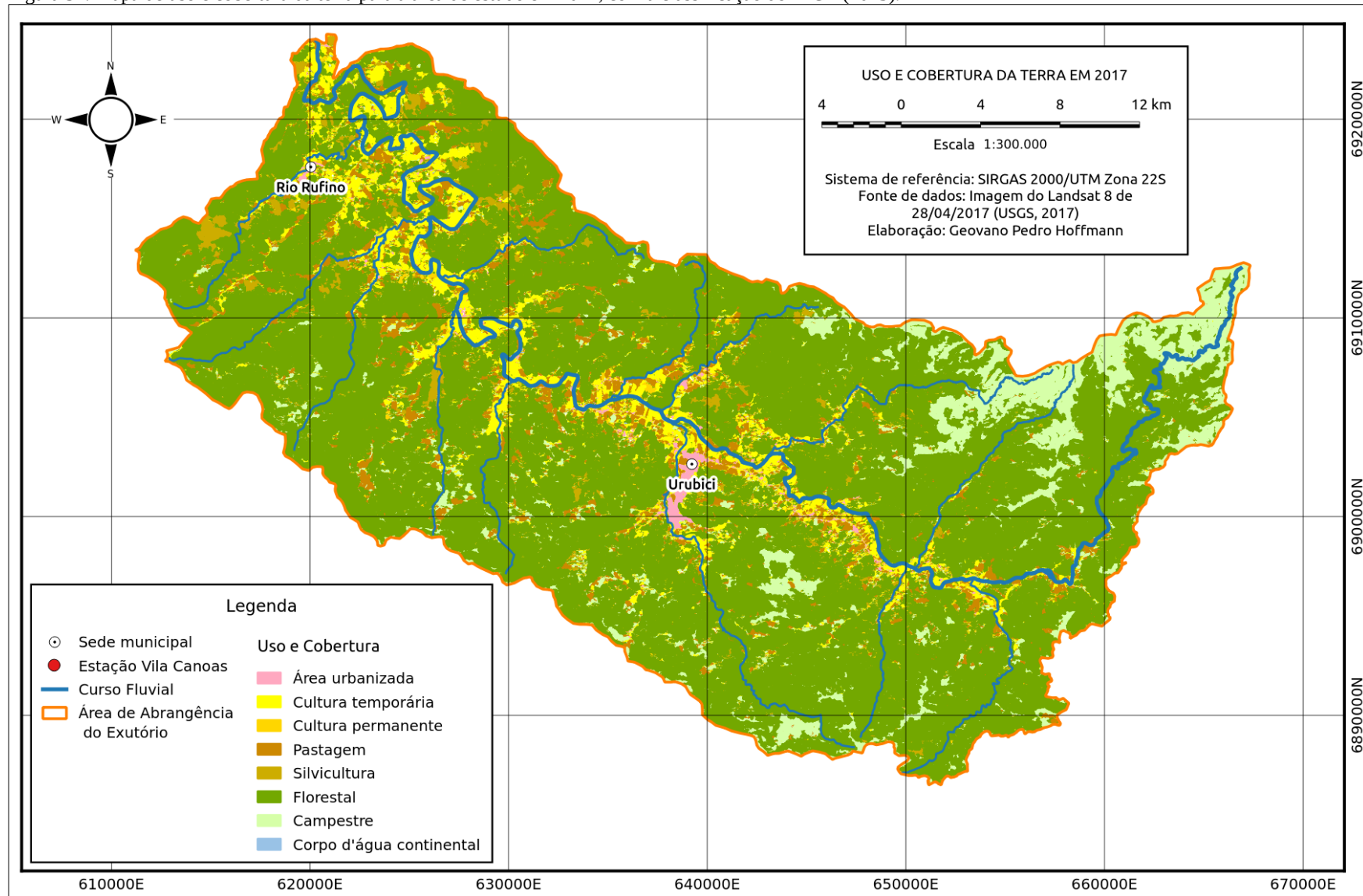
Figura 53. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 1997, com a classificação do IBGE (2013).



Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE E

Figura 54. Mapa de uso e cobertura da terra para a área de estudo em 2017, com a classificação do IBGE (2013).



Fonte: Elaboração própria.