



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Geovano Pedro Hoffmann

**Integração entre variáveis ambientais na avaliação da interação entre as águas em
diferentes domínios hidrogeológicos para gestão de bacias hidrográficas**

Florianópolis

2023

Geovano Pedro Hoffmann

Integração entre variáveis ambientais na avaliação da interação entre as águas em diferentes domínios hidrogeológicos para gestão de bacias hidrográficas

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Geografia na Área de Concentração de Utilização e Conservação de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Luiz Fernando Scheibe, Dr.

Florianópolis

2023

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

Hoffmann, Geovano Pedro

Integração entre variáveis ambientais na avaliação da interação entre as águas em diferentes domínios hidrogeológicos para gestão de bacias hidrográficas / Geovano Pedro Hoffmann ; orientador, Luiz Fernando Scheibe, 2023.

331 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Geografia. 2. gestão de águas. 3. interação aquífero rio. 4. domínios hidrogeológicos. 5. modificações antropogênicas. I. Scheibe, Luiz Fernando. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Geografia. III. Título.

Geovano Pedro Hoffmann

Integração entre variáveis ambientais na avaliação da interação entre as águas em diferentes domínios hidrogeológicos para gestão de bacias hidrográficas

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 15 de agosto de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Arthur Schmidt Nanni, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Rodrigo de Almeida Heringer, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Rodrigo Lilla Manzione, Dr.
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Luiz Fernando Scheibe, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023.

Dedico este trabalho a minha mãe

Veronica (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Luiz Fernando Scheibe, pela oportunidade, que me designou valiosa confiança ao longo desses anos, desde a época do meu mestrado em Geografia, pela paciência, pelo otimismo e por possibilitar o desenvolvimento do presente estudo.

Ao prof. Dr. Arthur Schmidt Nanni, pela privilegiada honra em tê-lo conhecido desde a minha graduação, pela nobreza de apresentação a mim da exploração desse tema como proposta de trabalho, além de todos os direcionamentos e apoio para contornar as dificuldades encontradas durante essa pesquisa, por quem sou profundamente grato.

À Dra. Raquel Barros Binnoto (CPRM/RS) e ao prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione (UNESP) pelas correções e sugestões realizadas no exame de qualificação deste trabalho.

Ao prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione (UNESP), ao prof. Dr. Rodrigo de Almeida Heringer (UFSC) e ao prof. Dr. Leônidas Luiz Volcato Descovi Filho (UFOPA) pelas oportunas contribuições perante a defesa do presente trabalho.

Ao Projeto Rede Guarani Serra/Geral e ao Laboratório de Análise Ambiental (LAAm/UFSC), pela oportunidade de participação no grupo de trabalho.

De modo especial, à minha esposa, Thais Caroline Nunes Barreto Hoffmann, que, mesmo nos momentos mais difíceis da pesquisa (especialmente naqueles de vida pessoal inimagináveis), esteve sempre ao meu lado, teve paciência, me erguendo e me incentivando com a sua energia e entusiasmo para seguir em frente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Caiu dos céus, pelos trovões anunciada
Abre caminhos, rasga a terra, averdejada
Ela me leva ou eu é que a levo comigo?
Vida sem ela não existe, meu amigo

Se mata a minha sede, ou se vai me banhar
Se tá lá na geleira, ou no fundo do mar
Meu mundo sem ela, viraria pó
Amigo não se engane, a água é uma só”

“A água é uma só” - (Bando de Seu Pereira, 2020)

RESUMO

As mudanças antropogênicas nas paisagens exercem alterações na disponibilidade dos aquíferos em contribuir para manter fluindo os rios das bacias hidrográficas na forma do escoamento de base. À vista disso, a presente pesquisa teve o objetivo de propor uma metodologia de integração entre variáveis ambientais como instrumento de avaliação da interação entre águas subterrâneas e superficiais em diferentes domínios hidrogeológicos para gestão de bacias hidrográficas. A metodologia consistiu no estabelecimento de um cenário balizador de disponibilidade de águas, ou seja, de máxima disponibilidade do escoamento de base, mensurado pelo Índice do Fluxo de Base (BFI) para um cenário hipotético de cobertura natural de bacia hidrográfica. O cenário balizador é um nível de medida situacional do ordenamento territorial quanto ao ganho, ou à perda, na perenidade de águas entre os cenários de usos e coberturas da terra. A partir de uma matriz de cruzamento da Velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES), usando a declividade e classificações de uso e cobertura da terra antropogênicos (anos de 1985, 1993, 2001, 2009 e 2018), o cenário hipotético de condição natural foi simulado no QGIS para as bacias hidrográficas representativas de cinco domínios hidrogeológicos definidos para o estado de Santa Catarina: Cristalino; Bacia Sedimentar Paleozoica; Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Não Confinado e Semiconfinado; SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado; e Depósitos Cenozoicos. Além disso, em planilha, séries de vazão foram empregadas na determinação do BFI médio global para o período de 1981 a 2018, em correspondência aos cenários antropogênicos, com o filtro digital recursivo de Eckhardt. A fim de estimar o BFI natural específico por cenário observado, procedeu-se com a obtenção do BFI específico — distribuição proporcional do BFI médio global pelas VmES específicas do cenário; e do Coeficiente de variação da VmES específica natural (CVmES) — razão entre a VmES específica de um cenário observado e a VmES específica do cenário balizador. A média de valores do BFI natural específico resultou no BFI médio global natural. Esse dado foi admitido como indicador no Índice Geoambiental do Escoamento de Base (IGEB), razão entre o BFI médio global dos cenários antropogênicos e o BFI médio global do cenário balizador das bacias hidrográficas representativas. Orientado por um fluxograma de suporte à decisão, esse diagnóstico permite avaliar, qualitativamente, os cenários observados com uma classificação semafórica, apontando estratégias de aumento da disponibilidade do escoamento de base pela gestão de uso e cobertura da terra, conforme a necessidade de reidratação das paisagens. Dentre as limitações, cita-se a ausência de dados observados do BFI para os cenários balizadores de condição natural; a heterogeneidade hidrogeológica das bacias hidrográficas em Santa Catarina; o represamento de águas; a superexploração de poços; e a variabilidade do regime pluviométrico. Apesar disso, a metodologia pode ser usada para comparar bacias hidrográficas, independentemente do domínio hidrogeológico; verificar quais delas requerem atenção prioritária; e sensibilizar, bem como mobilizar, a sociedade ao facilitar a divulgação de dados da indissociabilidade de águas. Enfatiza-se, ainda, a outra forma de pensar a gestão de águas, diferenciando-a da noção das águas apenas como recurso natural, contemplando o seu papel ecológico e para os seres humanos pela incorporação de três pressupostos de abordagem geossistêmica: o ciclo hidrológico como integrante de um equilíbrio natural geossistêmico; a segurança hídrica como uma questão de *déficit* hídrico e do modelo civilizatório; e a gestão de águas como integrada (institucionalmente), integradora (das águas superficiais e subterrâneas) e participativa (com a participação de todos).

Palavras-chave: gestão de águas; interação aquífero-rio; domínios hidrogeológicos; modificações antropogênicas.

ABSTRACT

Anthropogenic changes in landscapes exert changes in the availability of aquifers that contribute to keeping rivers in watersheds flowing in the form of baseflow. In view of this, the present research aimed to propose a methodology for integrating environmental variables as an instrument for evaluating the interaction between groundwater and surface waters in different hydrogeological domains for watershed management. The methodology consisted of establishing a benchmark scenario for water availability, that is, the maximum availability of baseflow, measured by the Baseflow Index (BFI) for a hypothetical scenario of the watershed's natural landscape. The benchmark scenario is a situational measure of territorial planning regarding the gain or loss in perennial water between land use and land cover scenarios. From an Average Surface Runoff Velocity (VmES) matrix, using the slope and anthropogenic land use and cover classifications (years 1985, 1993, 2001, 2009 and 2018), the hypothetical natural condition scenario was simulated in QGIS for representative watersheds of five hydrogeological domains defined for the State of Santa Catarina, in Brazil: Crystalline; Paleozoic Sedimentary Basin; Guarani/Serra Geral Integrated Aquifer System (SAIG/SG) with Unconfined and Semiconfined SAG; SAIG/SG with SAG Semiconfined to Confined; and Cenozoic Deposits. Furthermore, in a spreadsheet, flow series were used to determine the global mean BFI for the period from 1981 to 2018, corresponding to anthropogenic scenarios, with Eckhardt's recursive digital filter. In order to estimate the specific natural BFI by an observed scenario, it was obtained the specific BFI — proportional distribution of the global mean BFI by the specific VmES from the scenario; and the Coefficient of variation of the natural specific VmES (CVmES) — ratio between the specific VmES of an observed scenario and the specific VmES of the benchmark scenario. The average of specific natural BFI values resulted in the natural global mean BFI. This data was admitted as an indicator in the Baseflow Geoenvironmental Index (IGEB), the ratio between the global mean BFI of the anthropogenic scenarios and the global mean BFI of the benchmark scenario from the representative watersheds. Guided by a decision support flowchart, this assessment makes it possible to qualitatively evaluate the scenarios observed with a color classification, pointing out strategies for increasing the availability of baseflow through land use and cover management according to the need for landscape rehydration. Among the limitations are the lack of observed data from the BFI for the natural condition benchmark scenarios; the hydrogeological heterogeneity of watersheds in Santa Catarina; water damming; the wells' overexploitation; and the variability of the rainfall regime. Despite this, the methodology can be used to compare watersheds, regardless of the hydrogeological domain; check which of them require priority attention; and raise awareness and mobilize society by facilitating the dissemination of data about the aquifer-river interaction. Another way of thinking about water management is also emphasized, differentiating it from the notion of water only as a natural resource, contemplating its ecological role and to human beings through the incorporation of three assumptions of a geosystemic approach: the hydrological cycle as part of a natural geosystemic balance; water security as a question of water deficit and the civilizing model; and water management as integrated (institutionally), integrative (of surface and groundwater) and participatory (with everybody's participation).

Keywords: water management; aquifer-river interaction; hydrogeological domains; anthropogenic modifications.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz institucional do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).....	37
Figura 2 – Matriz institucional do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Santa Catarina.....	48
Figura 3 – Localização das entidades executivas no Sistema Estadual de Gerenciamento dos Recursos Hídricos de Santa Catarina no ano de 2017.....	49
Figura 4 – Mapa dos comitês de bacia hidrográfica do estado de Santa Catarina.....	51
Figura 5 – Mapa de avaliação do Índice Integrado de Seca (IIS) no estado de Santa Catarina para a data de 30/11/2020.....	54
Figura 6 – Mapa do balanço hídrico quali-quantitativo das bacias e regiões hidrográficas do estado de Santa Catarina.....	57
Figura 7 – Mapa da disponibilidade hídrica subterrânea (vazões de poços) e superficial (vazão Q98 e Q7,10) das regiões hidrográficas do estado de Santa Catarina.....	60
Figura 8 – Os dois tipos principais de interação entre aquíferos e corpos d’água superficiais: recarga do aquífero (A) ou descarga de águas para o rio (B).....	62
Figura 9 – Componentes de entrada e saída do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica....	65
Figura 10 – Balanço hídrico da interação aquífero-rio.....	66
Figura 11 – Condutividade hidráulica para diferentes rochas e depósitos sedimentares.....	70
Figura 12 – Fluxos constituintes do escoamento de um curso d’água.....	72
Figura 13 – Diferentes tempos de residência dos fluxos de águas no subsolo conforme a configuração estrutural e de litologia das camadas dos sistemas aquíferos.....	73
Figura 14 – Fluxos de águas subterrâneas em um vale fluvial.....	75
Figura 15 – Sistemas de fluxos locais, intermediários e regionais das águas subterrâneas.....	76
Figura 16 – Separação da vazão em fluxos no hidrograma, em linha reta, com o início e o fim do fluxo superficial delimitado por linha tracejada.....	79
Figura 17 – Curva de recessão em um hidrograma.....	80
Figura 18 – Exemplos de diferentes valores de K para três curvas de recessão provenientes de um mesmo reservatório com comportamento linear de descarga de águas.....	83
Figura 19 – Escalas espaciais de análise do fluxo de base: escala de trecho de um rio ou de área de contribuição (A) e escala de bacia hidrográfica (B).....	85
Figura 20 – Modelo conceitual do escoamento de base no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.....	89
Figura 21 – Mapa dos cursos d’água perenes no estado do Kansas, nos EUA, nos anos de 1961 e 1994, no qual se nota a redução da extensão dos cursos d’água perenes.....	91
Figura 22 – Imagens de satélite do Rio Uruguai, no município de Itapiranga/SC, no período entre abril de 2019 e abril de 2020.....	92
Figura 23 – Curvas de infiltração e hidrogramas de bacias hidrográficas em paisagem natural e paisagem modificada.....	93
Figura 24 – Exemplos de situações do efeito da bomba biótica ou da sua ausência.....	95
Figura 25 – Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil.....	98
Figura 26 – Ilustração da taxonomia hidrogeológica proposta pela CPRM.....	100

Figura 27 – Mapa das unidades hidrolitológicas/domínios hidrogeológicos do Brasil.....	101
Figura 28 – Mapa das unidades hidroestratigráficas aflorantes e das principais bacias hidrográficas no estado de Santa Catarina.....	104
Figura 29 – Fluxograma dos materiais, métodos e procedimentos usados na presente pesquisa.....	112
Figura 30 – Mapa dos domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina, definidos no presente estudo a partir das unidades hidroestratigráficas.....	118
Figura 31 – Altitude média do contato entre a base do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e o topo do Sistema Aquífero Guarani (SAG) nos principais blocos hidrogeológicos do SAIG/SG em Santa Catarina.....	120
Figura 32 – Localização das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina.....	123
Figura 33 – Mapa de localização da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino.....	126
Figura 34 – Composição pedológica e produtividade de poços da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino.....	129
Figura 35 – Mapa de localização da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.....	131
Figura 36 – Composição pedológica e produtividade de poços da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.....	133
Figura 37 – Mapa de localização da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Não Confinado e Semiconfinado.....	135
Figura 38 – Composição pedológica e produtividade de poços da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado.....	139
Figura 39 – Mapa de localização da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Semiconfinado a Confinado.....	140
Figura 40 – Perfil estrutural esquemático do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG).....	143
Figura 41 – Composição pedológica e produtividade de poços da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.....	144
Figura 42 – Mapa de localização da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.....	146
Figura 43 – Composição pedológica e produtividade de poços da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.....	151
Figura 44 – Modelo conceitual de registro do escoamento de base na área de drenagem de uma estação fluviométrica.....	154
Figura 45 – Representação do coeficiente de recessão (a) no hidrograma.....	160
Figura 46 – Recomendações para uso dos métodos de análise de hidrograma do Groundwater Toolbox.....	166
Figura 47 – Duração do fluxo do escoamento superficial e subsuperficial (D) para um determinado tempo após o pico de vazão.....	170

Figura 48 – Etapas da construção de uma curva mestra de recessão.....	171
Figura 49 – Ábaco de Velocidades médias do Escoamento Superficial (VmES), em m/s, em função da declividade (%) e do tipo de cobertura da terra.....	182
Figura 50 – Etapas metodológicas de produção dos mapas anuais de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomass.....	186
Figura 51 – Representação hipotética, em hidrograma, da resposta hidrológica à precipitação para as diferentes coberturas da terra consideradas no presente estudo, no escoamento superficial e no escoamento de base.....	191
Figura 52 – Representação do comportamento da Velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES) e do escoamento de base para uma bacia hidrográfica em cenário de condição natural e em cenário de modificação antropogênica.....	203
Figura 53 – Pirâmide da síntese de informações.....	211
Figura 54 – BFI _{máx} , índice de recessão (k) e coeficiente de recessão (a) das séries de dados de vazão do período de 1981 a 2018 para as bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina.....	216
Figura 55 – Oscilação do BFI anual médio das bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina para o período entre 1981 e 2018....	217
Figura 56 – BFI anual médio e precipitação total anual para a Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino.....	219
Figura 57 – Alterações de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino.....	221
Figura 58 – BFI anual médio e precipitação total anual para a Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.....	223
Figura 59 – Alterações de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.....	224
Figura 60 – BFI anual médio e precipitação total anual para a Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado.....	226
Figura 61 – Alterações de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Não Confinado e Semiconfinado.....	228
Figura 62 – BFI anual médio e precipitação total anual para a Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.....	230
Figura 63 – Alterações de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Semiconfinado a Confinado.....	231
Figura 64 – BFI anual médio e precipitação total anual para a Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.....	233
Figura 65 – Alterações de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.....	235
Figura 66 – Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino.....	238
Figura 67 – Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.....	240

Figura 68 – Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Não Confinado e Semiconfinado.....	242
Figura 69 – Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Semiconfinado a Confinado.....	244
Figura 70 – Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.....	246
Figura 71 – Comportamento da Velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES) global, em m/s, e do Índice do Fluxo de base (BFI) médio global estimados para os cenários observados e de condição natural simulada de uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos de Santa Catarina.....	248
Figura 72 – Aplicação do IGEB para estimativa da disponibilidade do escoamento de base nas bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos do Estado de Santa Catarina para os cenários de condição natural simulada e cenários observados (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018).....	251
Figura 73 – Distribuição da vegetação original no estado de Santa Catarina.....	256
Figura 74 – Uso e cobertura da terra do estado de Santa Catarina no ano de 2021.....	258
Figura 75 – Comparativo entre o cenário de condição natural e de uso e cobertura da terra do ano de 2021 para o estado de Santa Catarina.....	259
Figura 76 – Fluxograma de suporte à decisão pela avaliação de disponibilidade hídrica da interação aquífero-rio para a gestão de bacias hidrográficas.....	264
Figura 77 – Mapa de distribuição de poços tubulares no Estado de Santa Catarina por domínio hidrogeológico e região hidrográfica.....	272

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese dos modelos de gestão de águas no Brasil.....	33
Quadro 2 – Competências dos entes federativos na gestão de águas no Brasil.....	35
Quadro 3 – Instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).....	39
Quadro 4 – Resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos que remetem à integração das águas subterrâneas e superficiais.....	42
Quadro 5 – Caracterização das regiões hidrográficas de Santa Catarina.....	55
Quadro 6 – Valores típicos de transmissividade (T), armazenamento (S) e Índice do Fluxo de Base (Base Flow Index – BFI) conforme os tipos de rochas em bacias hidrográficas perenes.....	71
Quadro 7 – Conceitos de fluxo de base na literatura especializada.....	78
Quadro 8 – Variáveis ambientais usadas como preditoras do Índice do Fluxo de Base (BFI). 90	
Quadro 9 – Síntese das características geológicas e hidrogeológicas das unidades hidroestratigráficas do estado de Santa Catarina: das mais antigas até as mais recentes no tempo geológico.....	106
Quadro 10 – Variáveis ambientais utilizadas no presente estudo para a calibração do Índice de Fluxo de Base (BFI) estimado para as bacias hidrográficas de domínio hidrogeológico.....	113
Quadro 11 – Correspondência da extensão geográfica entre as classificações hidrogeológicas propostas para o estado de Santa Catarina.....	117
Quadro 12 – Informações das estações fluviométricas das bacias hidrográficas representativas de cada domínio hidrogeológico de Santa Catarina.....	124
Quadro 13 – Correspondência entre a classificação da vazão subterrânea no estado de Santa Catarina por Machado (2013) e a classificação da produtividade de poços do IBGE (2015).....	125
Quadro 14 – Unidades geológicas aflorantes na bacia hidrográfica representativa do Cristalino.....	127
Quadro 15 – Unidades geológicas aflorantes na bacia hidrográfica representativa da Bacia Sedimentar Paleozoica.....	132
Quadro 16 – Unidades geológicas aflorantes na bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado.....	136
Quadro 17 – Unidades geológicas aflorantes na bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.....	141
Quadro 18 – Unidades geológicas aflorantes na bacia hidrográfica representativa dos Depósitos Cenozoicos.....	149
Quadro 19 – Quantidade de falhas de registros diários de vazão das estações fluviométricas das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos para cada ano.....	158
Quadro 20 – Estações pluviométricas usadas para caracterização do escoamento de base nas bacias hidrográficas representativas de cada domínio hidrogeológico de Santa Catarina.....	174
Quadro 21 – Quantidade de falhas diárias de precipitação das estações pluviométricas das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos para cada ano.....	176
Quadro 22 – Informações das estações pluviométricas com falhas e estações pluviométricas vizinhas usadas para o preenchimento por regressão linear simples.....	178
Quadro 23 – Situação das falhas diárias de precipitação das estações pluviométricas das	

bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos, para cada ano, após o preenchimento de falhas mensais pelo método da regressão linear simples.....	180
Quadro 24 – Relação entre intervalos de declividade e classes morfológicas.....	184
Quadro 25 – Características dos tipos de uso e cobertura da terra.....	185
Quadro 26 – Correspondências entre as classes e subclasses de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomias e as classes da presente pesquisa.....	187
Quadro 27 – Reclassificação dos pixels dos dados de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomias no QGIS.....	193
Quadro 28 – Classificação físico-temporal da disponibilidade do escoamento de base em uma bacia hidrográfica (IGEB) a partir do nível de estresse hídrico.....	214
Quadro 29 – Ano aproximado da colonização dentre os municípios situados nas bacias hidrográficas representativas.....	237
Quadro 30 – Estratégias que permitem aumentar a disponibilidade do escoamento de base pelo uso e cobertura da terra.....	261
Quadro 31 – Diferenças na perspectiva entre a gestão realizada pelo comitê de bacia hidrográfica e pelo cidadão.....	278

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Balanço hídrico, quantitativo, qualitativo e quali-quantitativo das regiões hidrográficas do estado de Santa Catarina.....	58
Tabela 2 – Correspondência entre o período de vazão para obtenção do BFI médio global e os cenários de uso e cobertura da terra observados.....	156
Tabela 3 – Exemplo da relação entre o índice de recessão (k) estimado e os tempos de recessão.....	172
Tabela 4 – Dados de calibração usados no método Recess para obtenção do Índice de recessão (k) das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina.....	173
Tabela 5 – Velocidades médias de escoamento superficial em m/s.....	181
Tabela 6 – Velocidades médias do escoamento superficial (em m/s) de diferentes coberturas da terra conforme o intervalo de declividade (%).....	190
Tabela 7 – Valores convencionados (chaves-primárias) para a reclassificação do raster resultante do cruzamento entre os cenários de uso e cobertura da terra e a declividade.....	193
Tabela 8 – Diferenças entre a área de drenagem e a área classificada para cada ano de referência da classificação.....	199
Tabela 9 – Velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES) global estimada para os cenários observados e de condição natural simulada de uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico.....	201
Tabela 10 – BFI médio global estimado para cada cenário observado de uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico.....	205
Tabela 11 – Equações de regressão linear simples considerando os dados observados para estimativa do escoamento de base a partir da Velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES) para as bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).....	206
Tabela 12 – BFI médio global estimado e BFI em condição natural para cada cenário de uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico.....	247

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADM	Associação de Desenvolvimento da Microbacia
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	Análise de Variância
AQUASTAT	Global Information System on Water and Agriculture
BFI	Índice do Fluxo de Base
BFI _{máx}	Índice do Fluxo de Base máximo
BIRD	Banco Internacional para a Reconstrução e o Desenvolvimento
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CIGERD	Centro Integrado de Gerenciamento de Riscos e Desastres
CMR	Curva Mestre de Recessão
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DRHS	Diretoria de Recursos Hídricos e Saneamento do Estado de Santa Catarina
EMPASC	Empresa Catarinense de Pesquisa Agropecuária
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
EPSG	European Petroleum Survey Group
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations

FDR	Filtro Digital Recursivo
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
HYSEP	Hydrograph Separation Program
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGEB	Índice Geoambiental do Escoamento de Base
IIS	Índice Integrado de Seca
MDB	Microsoft Access Database
MDE	Modelo Digital de Elevação
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
NRCS	Natural Resources Conservation Service
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
PART	Partitioning Computer Program
PERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais
RDB	Relational Database
RGSG	Rede Guarani/Serra Geral
RH	Região Hidrográfica
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SAIG/SG	Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral
SASG	Sistema Aquífero Serra Geral
SC	Santa Catarina

SCS	Soil Conservation Service
SDE	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina
SEMA	Secretaria Executiva do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SHP	Shapefile
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SIRHESC	Sistema de Informações de Recursos Hídricos de Santa Catarina
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UKIH	United Kingdom Institute of Hydrology's Method
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UPG	Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversa de Mercator
VmES	Velocidade Média do Escoamento Superficial
WRI	World Resources Institute

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 OBJETIVOS.....	26
1.1.1 Objetivo geral.....	26
1.1.2 Objetivos específicos.....	26
1.2 JUSTIFICATIVA.....	27
1.3 HIPÓTESE.....	30
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	31
2.1 GESTÃO DE ÁGUAS NO BRASIL E A INCORPORAÇÃO NORMATIVA DO ESCOAMENTO DE BASE.....	31
2.1.1 Gestão de águas no Brasil.....	32
2.1.2 Gestão integrada de águas em Santa Catarina.....	47
2.2 INTERAÇÃO AQUÍFERO-RIO.....	61
2.2.1 As águas subterrâneas e superficiais no balanço hídrico.....	63
2.2.2 O escoamento de base na manutenção do regime perene das bacias hidrográficas	66
2.2.3 Conceitos e questões metodológicas na análise do escoamento de base.....	76
2.2.4 Dinamismo do escoamento de base nas bacias hidrográficas: fatores de influência na circulação de águas.....	87
2.3 DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS.....	96
2.3.1 Classificação hidrogeológica do Brasil.....	96
2.3.2 Classificação hidrogeológica do estado de Santa Catarina.....	101
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	111
3.1 DEFINIÇÃO DOS DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS.....	115
3.1.1 Caracterização dos domínios hidrogeológicos para o estado de Santa Catarina...	116
3.1.2 Bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos.....	121
<i>3.1.2.1 Cristalino.....</i>	<i>125</i>
<i>3.1.2.2 Bacia Sedimentar Paleozoica.....</i>	<i>130</i>
<i>3.1.2.3 SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado.....</i>	<i>134</i>
<i>3.1.2.4 SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.....</i>	<i>139</i>
<i>3.1.2.5 Depósitos Cenozoicos.....</i>	<i>145</i>
3.2 ÍNDICE DO FLUXO DE BASE (BASEFLOW INDEX - BFI).....	152
3.2.1 Coeficiente de recessão do fluxo de base (a).....	159
3.2.2 Índice Máximo do Fluxo de Base (BFImáx).....	162
3.2.3 BFI anual médio.....	163
3.2.4 Limitações das estimativas de descarga de águas subterrâneas.....	164
3.2.5 Caracterização da recessão do escoamento das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos.....	168
<i>3.2.5.1 Índice de recessão (k).....</i>	<i>168</i>
<i>3.2.5.2 Precipitação total anual.....</i>	<i>173</i>
3.3 VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (VmES).....	181
3.3.1 Declividade.....	183

3.3.2	Uso e cobertura da terra.....	184
3.3.3	Matriz de cruzamento da VmES.....	189
3.4	CALIBRAÇÃO DO BFI ÀS VARIÁVEIS AMBIENTAIS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS.....	201
3.4.1	BFI específico.....	207
3.4.2	Coefficiente de variação da VmES específica natural (CVmES).....	208
3.4.3	BFI médio global para o cenário de condição natural.....	209
3.5	AVALIAÇÃO FÍSICO-TEMPORAL DA DISPONIBILIDADE DO ESCOAMENTO DE BASE EM BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	210
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	215
4.1	CONDIÇÕES DE RECESSÃO DO ESCOAMENTO NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS DE DOMÍNIOS HIDROGEOLOGÍCOS.....	215
4.1.1	Cristalino.....	218
4.1.2	Bacia Sedimentar Paleozóica.....	222
4.1.3	SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado.....	225
4.1.4	SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.....	229
4.1.5	Depósitos Cenozoicos.....	232
4.2	CENÁRIO BALIZADOR DO ESCOAMENTO DE BASE NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS DE DOMÍNIOS HIDROGEOLOGÍCOS.....	236
4.3	AVALIAÇÃO FÍSICO-TEMPORAL DA INTERAÇÃO AQUÍFERO-RIO.....	250
4.4	DIAGNÓSTICO DA DISPONIBILIDADE DO ESCOAMENTO DE BASE COMO INSTRUMENTO NA GESTÃO DE ÁGUAS.....	254
4.5	OUTRA FORMA DE PENSAR A GESTÃO DE ÁGUAS: PRESSUPOSTOS PARA UMA ABORDAGEM GEOSISTÊMICA.....	265
4.5.1	O ciclo hidrológico é integrante de um equilíbrio natural geossistêmico.....	269
4.5.2	A segurança hídrica é uma questão de déficit hídrico e do modelo civilizatório...	271
4.5.3	A gestão de águas precisa ser integrada, integradora e participativa.....	275
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	281
5.1	CONCLUSÕES.....	281
5.1.1	Vantagens de uso da metodologia desenvolvida no presente estudo.....	281
5.1.2	Implicações da execução da metodologia na gestão de águas por bacia hidrográfica.....	283
5.1.3	Limitações da metodologia desenvolvida.....	284
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	285
5.2.1	Perspectivas de estudos que ainda podem ser desenvolvidos.....	286
5.2.2	Elementos para o necessário aperfeiçoamento da gestão de águas.....	287
	REFERÊNCIAS.....	289
	APÊNDICE A – Dados de calibração do BFI médio global da condição natural do Domínio Hidrogeológico Cristalino.....	316
	APÊNDICE B – Dados de calibração do BFI médio global da condição natural do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.....	319
	APÊNDICE C – Dados de calibração do BFI médio global da condição natural do	

Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado.....	322
APÊNDICE D – Dados de calibração do BFI médio global da condição natural do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.....	325
APÊNDICE E – Dados de calibração do BFI médio global da condição natural do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.....	328

1 INTRODUÇÃO

O escoamento de base corresponde ao fluxo de drenagem dos aquíferos para as bacias hidrográficas e garante, durante os períodos secos, as vazões mínimas e a perenidade dos cursos d'água, lagos, pântanos e manguezais (WINTER *et al.*, 1998; SMAKHTIN, 2001; FEITOSA e FEITOSA, 2008; OMM/UNESCO, 2012; CNRH, 2018; HIRATA *et al.*, 2019). Contudo, as águas superficiais e as águas subterrâneas costumam ser tratadas separadamente pelos gestores de bacias hidrográficas (WINTER *et al.*, 1998). Apesar de possuírem características distintas, elas constituem fisicamente uma mesma parcela de água no âmbito do ciclo hidrológico. Boa parte das águas superficiais estão conectadas às águas subterrâneas, em condições variáveis de interação e sob diferentes dimensões espaciais e temporais. Ora os rios ou as massas d'água (lagos, áreas úmidas, etc.) recebem águas dos aquíferos, através de nascentes, ora os aquíferos têm ponderável recarga a partir do sistema de drenagem das bacias hidrográficas. Dessa forma, a redução de disponibilidade das águas subterrâneas pode, por exemplo, diminuir as vazões dos rios, enquanto o bombeamento dos cursos d'água, ou a sua contaminação, podem afetar a recarga e a qualidade das águas que infiltram nos aquíferos. A escala de tempo dos efeitos das intervenções humanas pode durar desde dias, até décadas ou milênios, como na contaminação das águas subterrâneas. Essas e outras inter-relações entre aquíferos e bacias hidrográficas não são devidamente reconhecidas quando há o tratamento isolado de ambos na gestão de águas (NATHAN e EVANS, 2011).

Há um equívoco em igualar as águas superficiais diretas às fluviais, corroborando para a noção fragmentada entre águas superficiais e subterrâneas. O escoamento fluvial é formado tanto por águas provenientes da precipitação atmosférica, as águas superficiais diretas, quanto pelas águas drenadas dos sistemas aquíferos por meio do fluxo de base. Com exceção dos cursos d'água efêmeros, as bacias hidrográficas com rios perenes e intermitentes são essencialmente supridas pelas águas subterrâneas. Neste sentido, as águas que escoam através dos rios estão intimamente conectadas às águas subterrâneas no ciclo hidrológico (ALBUQUERQUE, 2007). Não considerar essa indissociabilidade, por exemplo, leva a consequências prejudiciais ao processo de gestão das bacias hidrográficas e das atividades dependentes dele.

O escoamento de base constitui um indicativo da disponibilidade hídrica do conjunto de aquíferos para a manutenção de vazões de uma determinada bacia hidrográfica (REBOUÇAS, 2002a), especialmente usado para a investigação de eventos hidrológicos

críticos (TUCCI e CHAGAS, 2017). O escoamento de base é fundamental para as bacias hidrográficas situadas nas regiões semiáridas do planeta (MWAKALILA, FEYEN e WYSEURE, 2002) e também importante, principalmente, para aquelas que apresentam sazonalidade climática (SMAKTIN, 2001), de modo que a principal contribuição para a descarga de águas das bacias hidrográficas dessas áreas provém dos fluxos subterrâneos (VAN LOON, 2015).

A falta de água provocada pela seca se propaga pelo ciclo hidrológico, a começar pela precipitação, seguida do fluxo superficial e, por último, das águas subterrâneas. Os fluxos de águas subterrâneas são os mais resilientes em manter as águas em superfície, tanto pela maior capacidade de armazenamento nos aquíferos quanto pela lenta circulação. Os impactos provocados por estiagens, apesar de estarem geralmente associados com as regiões áridas e semiáridas, também podem ocorrer em áreas caracteristicamente úmidas, em razão das variações regionais da precipitação (DOWNING *et al.*, 2016). O Brasil, por exemplo, embora tenha uma participação de cerca de 12% na disponibilidade global de águas doces no mundo, apresenta distribuição desigual na oferta de águas, relacionados tanto ao comprometimento da qualidade quanto às demandas elevadas no volume de águas para os diferentes usos (BRAGA *et al.*, 2008).

Nas últimas duas décadas, aproximadamente, ocorreram no país, eventos de secas e estiagens históricas nas regiões Nordeste, no período 2010-2016 (MARENGO *et al.*, 2018); Sudeste, no período 2014-2015; estiagens esporádicas no Pantanal e no estado do Amazonas (MARENGO *et al.*, 2015); assim como na região Sul (PORTELA *et al.*, 2015; SPINELLI, NASCIMENTO e FUENTES, 2020). Se consideradas as últimas quatro décadas, as mudanças climáticas aceleraram o ciclo hidrológico no Brasil pelo aumento nos extremos das vazões das maiores bacias hidrográficas da América do Sul. O aumento das vazões máximas e, derivadamente, a redução das vazões mínimas, estão condicionadas às mudanças nos fluxos de umidade e da gestão de uso e cobertura da terra, estando intimamente atreladas à distribuição das chuvas e à intensificação dos desflorestamentos nos biomas, especialmente no sul da Amazônia (CHAGAS, CHAFFE e BLÖSCHL, 2022).

As águas subterrâneas, pela sua capacidade de armazenamento e de permanência a longos períodos sem chuvas, possibilitam a minimização do estresse hídrico das populações, especialmente com a perspectiva de intensificação desse problema com as mudanças climáticas (HIRATA, ZOBY e OLIVEIRA, 2010). As áreas do mundo sob estresse hídrico e com demanda por água tenderão a aumentar nas próximas décadas com o crescimento

populacional e econômico. Além disso, as mudanças climáticas poderão modificar os padrões sazonais, ao acelerar os processos vinculados aos ciclos hidrológicos e elevar a probabilidade de eventos extremos. Em razão da sua natureza circulante e pela distribuição desigual da disponibilidade das águas doces, as avaliações de recursos hídricos deveriam ter como foco, na realidade, o fluxo das águas (OKI e KANAE, 2006). É em cenários como esse, em que as águas tornam-se escassas e a demanda maior, que a gestão coordenada das águas superficiais e subterrâneas mostra-se mais necessária (PULIDO-VELAZQUEZ *et al.*, 2016), para a efetivação do planejamento e da mediação de conflitos. Novas estratégias de gestão de águas podem ser desenvolvidas por conta do conhecimento acerca do escoamento de base, abarcando-o como um recurso primordial do ciclo hidrológico que forma, mantém fluindo e recicla as águas superficialmente nas bacias hidrográficas ao redor do mundo. Sobretudo pela sua relação com a variabilidade climática e das atividades humanas (WU *et al.*, 2019).

Também nos momentos de excedência hídrica, incluindo regiões úmidas do planeta, como em grande parte do Brasil, a perenidade dos cursos d'água, assegurada pelo escoamento de base, mostra-se relevante. As águas de rios, áreas úmidas e lagos usadas para o abastecimento das cidades e comunidades, indústrias, irrigação, lazer, fins urbanísticos e paisagísticos, são resultantes da descarga dos aquíferos. Além disso, as águas subterrâneas, na forma do escoamento de base, permitem a diluição de esgotos, minimizam o assoreamento e possibilitam a manutenção da fauna e da flora. Assim, os papéis constantemente atribuídos às águas superficiais nas regiões úmidas são, na verdade, garantidos pela descarga das águas subterrâneas. Por isso, as águas subterrâneas devem ter a mesma importância que a dos mananciais superficiais na gestão de águas (HIRATA, ZOBY e OLIVEIRA, 2010), de maneira a buscar o aumento da disponibilidade e a garantia da oferta das águas em qualidade nas bacias e regiões hidrográficas (BRAGA *et al.*, 2008). Um caminho viável para atender essas necessidades na gestão de águas é a integração das águas subterrâneas aos três pilares da Gestão Integrada de Recursos Hídricos: a sustentabilidade ambiental, a eficiência econômica e a equidade social (FOSTER e AIT-KADI, 2012).

No Brasil, entretanto, as águas subterrâneas são pouco discutidas nas instâncias do sistema nacional de gerenciamento, como os comitês de bacia hidrográfica, principalmente pelo fato dos gestores, da sociedade civil organizada e dos usuários de águas desconhecerem os processos hidrogeológicos que influenciam o comportamento das águas em suas bacias hidrográficas (CONICELLI, 2014). Acrescenta-se que um dos pontos emblemáticos é a dificuldade em dimensionar a disponibilidade e o comportamento hídrico subterrâneo,

especialmente para um modelo de gestão baseado em bacias hidrográficas, em razão da não coincidência da área de atuação dos comitês com a extensão dos aquíferos (GRANZIERA e GRANZIERA, 2014). Por outro lado, o recorte espacial da bacia hidrográfica não deve limitar os trabalhos de pesquisa e as ações de gestão de águas, mas orientar (PIRES, SANTOS e DEL PRETTE, 2002). Concomitantemente, a falta de dados e de informações necessárias sobre recarga e descarga de águas dos aquíferos nos rios das bacias hidrográficas é refletida na dificuldade de geri-las como recurso natural único.

Saber o quanto uma bacia hidrográfica secará (LAAHA *et al.*, 2013), isto é, o quanto de águas estará disponível na forma de escoamento de base nas ocasiões de estiagens e secas mediante às mudanças nas condições ambientais, é primordial para uma gestão sistematizada das águas. As questões mencionadas envolvendo a gestão de águas no país representam um descompasso a essa abordagem, haja vista que nos momentos mais críticos, e duradouros, de estresse hídrico nas bacias hidrográficas, não é possível a implementação de determinadas medidas, como, por exemplo, a recuperação de longo prazo das paisagens para a melhoria da disponibilidade hídrica pela recarga subterrânea.

Os resultados de alguns estudos (INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980b; LACEY e GRAYSON, 1998; MWAKALILA, FEYEN e WYSEURE, 2002; TAGUE e GRANT, 2004; BLOOMFIELD, ALLEN e GRIFFITHS, 2009; COELHO *et al.*, 2015; LEDESMA, 2016; MATTIUZI *et al.*, 2015; PONTES *et al.*, 2016), indicam a distinção de contribuição do fluxo de base provida por diferentes conjuntos de aquíferos subjacentes às bacias hidrográficas, com similaridades intrínsecas de litologia e conectividade hidráulica, conhecidos, conforme BOMFIM (2010), pela denominação de domínios hidrogeológicos. Assim, percebe-se como necessidade o desenvolvimento de uma ferramenta na gestão das águas que também contemple a singularidade do suprimento do escoamento de base pelos diferentes domínios hidrogeológicos. Ao mesmo tempo, que se adeque à condição socioambiental geossistêmica das bacias hidrográficas, ou seja, que na gestão não separe as águas superficiais e as águas subterrâneas, ou ainda a componente antropogênica em relação às características físico-temporais delas.

Nesse ínterim, o presente estudo foi conduzido pelo seguinte questionamento: **como introduzir a interação entre águas subterrâneas e superficiais em um modelo de gestão geossistêmica de águas para bacias hidrográficas?** Trata-se, portanto, da proposição de uma metodologia para a avaliação da disponibilidade do escoamento de base por bacia hidrográfica pela integração entre variáveis ambientais, tendo como área de estudo as bacias

hidrográficas representativas definidas para os domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina.

Apesar da incorporação recente de normas sobre a interação aquífero-rio, tal como a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 202/2018, que representam um importante aperfeiçoamento na legislação sobre águas no país, e da diversidade de métodos para estimar o escoamento de base, ainda não há um documento institucional que dê respaldo às etapas de realização das avaliações hidrológicas de interação aquífero-rio. Ao mesmo tempo, são escassas avaliações de indissociabilidade das águas com estratégias para melhorar a gestão de águas, sendo necessário tornar acessível esse conhecimento aos profissionais técnicos dos comitês de bacias hidrográficas e também para aqueles que não se encontram no círculo de especialistas no assunto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Propor uma metodologia de integração entre variáveis ambientais como instrumento de avaliação da interação entre águas subterrâneas e superficiais em diferentes domínios hidrogeológicos para gestão de bacias hidrográficas.

1.1.2 Objetivos específicos

Junto ao objetivo geral foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Compreender as condições ambientais de recessão do escoamento de base das bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos;
- Identificar o cenário balizador (nível de medida máximo) de disponibilidade de águas das bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico pela calibração do escoamento de base às variáveis ambientais;
- Avaliar a disponibilidade físico-temporal do escoamento de base com o cenário balizador de uso e cobertura da terra para as bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico;
- Discutir a aplicação da metodologia proposta como instrumento na gestão de bacias hidrográficas;

- Sugerir uma incorporação da abordagem geossistêmica para uma gestão de águas integrada, integradora e participativa em bacias hidrográficas.

1.2 JUSTIFICATIVA

As águas subterrâneas e superficiais, por estarem em interação no ciclo hidrológico, devem ser analisadas em sua unicidade (HERRÁIZ, 2009). Apesar de serem fundamentais na gestão da quantidade e qualidade das águas, as interconexões aquífero-rio são pouco compreendidas na maioria das bacias hidrográficas no mundo (IVKOVIC, 2009). Assim, é necessária na gestão de águas a compreensão científica não somente dos processos das bacias hidrográficas, mas também dos processos que levam as águas superficiais a serem mantidas pelo fluxo de base das águas subterrâneas (PRICE, 2011). A ocorrência das águas subterrâneas e o comportamento do fluxo de base são relevantes para as tomadas de decisão, como, por exemplo, na alocação hídrica, nas normas de qualidade das águas e na prioridade na conservação ambiental das águas em áreas com tendência ao crescimento populacional ou às estiagens e secas (SÁNCHEZ-MURILLO *et al.*, 2015). Portanto, uma gestão racional e eficiente das águas deve considerar as interações aquífero-rio e o seu uso conjuntivo (PULIDO-VELAZQUES *et al.*, 2005).

Um dos principais problemas está no desconhecimento da interação das águas subterrâneas e superficiais, enquanto corpo hídrico único (GRANZIERA e GRANZIERA, 2014), e como se dá o seu planejamento em uma perspectiva de longo prazo, tal como é o tempo de percolação das águas subterrâneas. De acordo com Bohn, Goetten e Primo (2014) tanto a produção científica quanto o uso das águas subterrâneas em grande escala são recentes no país, fazendo com que a gestão integrada com as águas superficiais ainda não seja clara nem na legislação e nem na prática.

Do ponto de vista do gestor de águas, os aspectos de armazenamento e aproveitamento dos fluxos de águas ainda podem consistir na ideia de que um aquífero é desconexo de uma bacia hidrográfica. No Brasil, por exemplo, não há um planejamento integrado que realize o melhor uso ambiental do ciclo hidrológico, como em cidades que usam fontes de águas subterrâneas e superficiais simultaneamente. Os cenários de impactos do crescimento populacional e de mudanças climáticas podem agravar essa situação (HIRATA e CONICELLI, 2012). Além disso, a combinação da ocupação e do uso da terra a fatores hidrogeológicos, geomorfológicos e climáticos, quando não sustentável ambientalmente,

modifica, por consequência, o tempo que as águas subterrâneas e superficiais permanecem no sistema hidrológico. Isso pode afetar, significativamente, o desenvolvimento das diferentes atividades humanas e ecológicas dependentes das interações aquífero-rio por meio do escoamento de base.

Isso é desafiador aos pesquisadores e aos agentes envolvidos na gestão de águas em diferentes países, inclusive no Brasil. Em seu ordenamento jurídico, o Brasil dispõe da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei Federal nº 9.433 de 1997 (BRASIL, 1997), e preconiza o gerenciamento das águas subterrâneas integrado às águas superficiais, tomando como referência o modelo francês, cuja gestão é exercida por comitês de bacia hidrográfica (CAMPOS e FRACALANZA, 2010). Apesar de fazer menção e de não contemplar as particularidades das águas subterrâneas, a PNRH não destacou como poderia ser orientado o gerenciamento das águas subterrâneas no país e delegou a sua competência de fiscalização, outorga e direitos de uso aos estados, à exceção de águas armazenadas em unidades hidrogeológicas entre estados e/ou transfronteiriças, além do Distrito Federal, que ainda gera controvérsia se são de competência do Poder Executivo Federal, mas que atuam com o modo de gestão compartilhada. Por outro lado, a legislação e a gestão das águas subterrâneas pelos estados seguem os princípios da PNRH (HUNSHE, 2010).

Como legislação complementar à PNRH acerca da integração às águas subterrâneas, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) publicou a Resolução nº 145/2012 (CNRH, 2012). Essa resolução destaca que os planos de recursos hídricos, a serem elaborados pelos comitês de bacia hidrográfica, devem abranger as águas superficiais e subterrâneas (Art. 10º), de modo que no diagnóstico das bacias hidrográficas deve haver a “avaliação quantitativa e qualitativa das águas superficiais e subterrâneas” (Inciso IV do Art. 11º). A norma mais relevante do CNRH que trata exclusivamente de diretrizes sobre a gestão da indissociabilidade de águas é a Resolução nº 202/2018. Essa resolução, em seu Art. 3º, traz diretrizes mínimas a serem seguidas para a avaliação quantitativa das águas nas bacias hidrográficas:

Art. 3º A gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos contemplará avaliações hidrológicas integradas e deverá observar, no mínimo, as seguintes diretrizes:

- I - delimitação das áreas de recarga e de contribuição dos aquíferos para os rios diretamente conectados;
- II - estimativa da contribuição dos aquíferos para a vazão de base dos rios;
- III - estimativa da recarga e as reservas exploráveis e renováveis;
- IV - estimativa da disponibilidade hídrica integrada subterrânea e superficial para os diversos usos, considerando os incisos anteriores; e
- V - as redes de monitoramento hidrometeorológica e hidrogeológica necessárias.

Entretanto, a carência de dados e estudos levou tardiamente à inclusão das águas subterrâneas nos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas e na proposição de estratégias adequadas à gestão também dos aquíferos. Demais instrumentos da PNRH também têm a sua aplicação obstruída em decorrência dessa situação (VILLAR, 2016). Assim, não é possível ocorrer a confiabilidade no planejamento realizado pelos comitês de bacia hidrográfica, na emissão de outorgas para captações, na resolução de conflitos de usos que envolvam o rebaixamento do lençol freático e, até mesmo, no enquadramento dos corpos d'água e na autodepuração de corpos hídricos das bacias hidrográficas. Em todos esses casos, o conhecimento do escoamento de base é imprescindível para haver a segurança hídrica e o acesso às águas.

A indissociabilidade entre águas subterrâneas e superficiais é de fundamental interesse da gestão de águas, especialmente nos períodos das baixas vazões, quando há uma maior necessidade pela conciliação entre os múltiplos usos. Ao não considerar essas interações no planejamento, a gestão de águas torna-se comprometida nos momentos de disponibilidade hídrica reduzida (RASSAM *et al.*, 2013). Além disso, a variabilidade de condições para o suprimento das vazões mínimas deveria estar incorporada nos planos de gestão de bacias hidrográficas, assim como a identificação dos mecanismos que controlam o seu comportamento (SMAKHTIN, 2001).

A ampliação do conhecimento teórico-metodológico e de avanços tecnológicos por parte das universidades e institutos de pesquisa é fundamental para a consolidação da gestão de águas, especialmente com pesquisas relacionadas aos instrumentos de integração do planejamento socioambiental condizentes com o planejamento territorial e de uso da terra (TUNDISI, 2006). Métodos indiretos são comumente usados para caracterizar a conexão dos aquíferos ao escoamento superficial para áreas com limitação de informações hidrogeológicas. Apesar disso, o uso de técnicas de caracterização de aquíferos a partir do escoamento de base ainda é pouco empregado no Brasil (COSTA e BACELLAR, 2010).

No contexto do estado de Santa Catarina, o cenário é de diminuição progressiva da disponibilidade hídrica de águas superficiais (CERTI, 2017), seja pela redução na quantidade de florestas, pela influência climática sazonal ou mesmo pela contaminação. Neste cenário, as águas subterrâneas estão se tornando recurso de consumo cada vez mais frequente do abastecimento público e agroindustrial. Junto a esse problema, provocado por falhas de desenvolvimento e de planejamento econômico-territorial (FREITAS e OLIVEIRA, 2017), os comitês de bacia hidrográfica de Santa Catarina, na maioria recém-implementados, e com as

suas dificuldades de organização como órgãos consultivos e deliberativos na gestão de águas, não têm conhecimento técnico e legal, ou até mesmo apoio financeiro (TRINDADE, SCHEIBE e RIBEIRO, 2018) para realização de estudos. Essas limitações são também comuns nos comitês de bacia hidrográfica de outros estados (TRINDADE e SCHEIBE, 2019) e constituem obstáculo na avaliação da situação hídrica das águas subterrâneas e superficiais.

Há a necessidade por metodologias contendo diagnósticos do comportamento dos aquíferos em relação à recarga e descarga de águas nas bacias hidrográficas para aplicação de políticas ambientais, incluindo aquelas voltadas aos recursos hídricos. Na maioria das vezes, as técnicas utilizam abordagens compartimentadas e incorporam os ambientes como estáticos nos diagnósticos. Um enfoque interdisciplinar por relações espaciais e temporais do ciclo hidrológico pode integrar os ecossistemas, os geossistemas, o uso da terra e da água para subsidiar informações para as tomadas de decisão, seja por instrumentos de atuação em escala local, como outorgas de recursos hídricos, licenças ambientais ou alocações de reserva legal, por exemplo; seja em âmbito de um planejamento regional, tais como em planos de bacia hidrográfica, planos diretores municipais ou zoneamentos ecológico-econômicos, dentre outros (VASCONCELOS, MARTINS JUNIOR e HADAD, 2013a).

Dessa forma, o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da interação aquífero-rio no estado de Santa Catarina pode ser um subsídio para os comitês de bacia hidrográfica atuarem adequadamente em uma melhor integração e conservação das águas, considerando as particularidades físico-temporais de suas respectivas áreas de gestão, ao passo que possam atender às prerrogativas da PNRH e das resoluções do CNRH.

1.3 HIPÓTESE

A presente pesquisa parte da hipótese de que a metodologia proposta de integração entre variáveis ambientais para a avaliação da interação entre águas subterrâneas e superficiais em diferentes domínios hidrogeológicos possibilitará indicar a disponibilidade do escoamento de base ao longo do tempo em bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico. A partir disso, poderá ser possível que a metodologia proposta seja incorporada como instrumento sistematizado na gestão de águas por bacia hidrográfica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão de literatura está relacionada ao desenvolvimento de uma metodologia que engloba três grandes tópicos: “gestão de águas no Brasil e a incorporação normativa do escoamento de base”, “interação aquífero-rio” e “domínios hidrogeológicos”. O primeiro tópico descreve o funcionamento do atual modelo de gestão de águas no país e situa como a interação aquífero-rio é reportada na legislação brasileira. O segundo tópico trata da discussão dos conceitos, das premissas e dos fatores de circulação do escoamento de base, no contexto da teoria do ciclo hidrológico. Por fim, o último tópico retrata a construção do conceito de domínios hidrogeológicos, enquanto conjunto de aquíferos que se distinguem no suprimento do escoamento de base às bacias hidrográficas.

2.1 GESTÃO DE ÁGUAS NO BRASIL E A INCORPORAÇÃO NORMATIVA DO ESCOAMENTO DE BASE

A gestão¹ de águas é o conjunto de procedimentos organizados, que consideram os princípios da justiça social e as restrições econômicas e ambientais, voltados para a resolução de problemas de uso e controle dos recursos hídricos decorrentes da limitação da sua disponibilidade. Como subfunções, a gestão de águas engloba o planejamento, a administração e a regulamentação (TEIXEIRA, 2004). A gestão de águas também pode ser compreendida como o conjunto de informações técnicas, institucionais e jurídicas, assim como conceitos, aspectos ideológicos e éticos. Considera modelos administrativos variados, diferentes formas de pensar e novos fenômenos que modificam o ambiente e que envolvem as águas, a exemplo das atividades antropogênicas e as mudanças climáticas (ARAÚJO *et al.*, 2015). A gestão de águas é constituída pela política de águas, a qual inclui “o plano de uso, controle e proteção das águas; o gerenciamento e o monitoramento dos usos da água” (CAMPOS e FRACALANZA, 2010, p. 366). A gestão de águas também pode ser compreendida como a (IGAM, 2012, p. 51):

Utilização e administração racional, democrática e participativa dos recursos hídricos. A gestão das águas também pode ser definida como uma atividade analítica e criativa voltada à formulação de princípios e diretrizes (Política das Águas), ao preparo de documentos orientadores e normativos, à estruturação de sistemas

¹ Enquanto isso, o gerenciamento diferencia-se da gestão de águas pela “produção de informações, acompanhamento e tomada de decisões que têm por objetivo final promover o uso, o controle e a proteção dos recursos ambientais” (IGAM, 2012, p. 51).

gerenciais e à tomada de decisões (modelo de gerenciamento) que têm por objetivo final promover o inventário, uso, controle e proteção dos recursos hídricos (planejamento).

2.1.1 Gestão de águas no Brasil

O modelo sistêmico de integração participativa (LANNA e CÁNEPA, 1994; LANNA, 1995 apud SETTI *et al.*, 2001) ou apenas modelo de integração participativa (THEODORO e MARQUES, 2014) foi concebido a partir do fracasso dos modelos anteriores de gestão de águas, a saber, o modelo burocrático e o modelo econômico-financeiro (Quadro 1). Isso porque é uma abordagem de gestão de águas que passou a incorporar o dinamismo ambiental e social das bacias hidrográficas (LIBÂNIO, 2006). A gestão integrada de águas é tratada como um paradigma efetivado a partir da década de 1990. Até então, a concepção vigente na legislação brasileira preconizava o gerenciamento do tipo setorial e local, para prover respostas a impactos e crises gerados pela falta ou pelo excesso de águas. A gestão integrada, no entanto, é uma formulação teórica preditiva, direcionada ao planejamento que se almeja alcançar, e aplicada à escala de um ecossistema, cujos processos são conectados hidrologicamente, como as bacias hidrográficas (TUNDISI, 2006).

Quadro 1 – Síntese dos modelos de gestão de águas no Brasil.

Modelos	Características	Consequências/ dificuldades	Avanços	Marcos referenciais
Burocrático	<ul style="list-style-type: none"> - centralização administrativa - burocracia e formalismo excessivos - privilegiava dispositivos legais e de regulação 	<ul style="list-style-type: none"> - pouca flexibilidade no atendimento às demandas eventuais - morosidade nas ações administrativas - descompromisso das autoridades quanto aos resultados 	<ul style="list-style-type: none"> - inexistentes 	<ul style="list-style-type: none"> - Código das Águas de 1934
Econômico-financeiro	<ul style="list-style-type: none"> - intervenção estatal significativa - privilegiava instrumentos econômicos - análise econômica de custo-benefício - orientava-se por ações setoriais 	<ul style="list-style-type: none"> - pouca flexibilidade para adequação às questões contingenciais - atendimento desigual aos setores usuários - conflitos entre demandas desenvolvimentistas e preocupações ambientais 	<ul style="list-style-type: none"> - planejamento setorial - implementação de planos diretores 	<ul style="list-style-type: none"> - CODEVASF, 1948
Sistêmico de integração participativa	<ul style="list-style-type: none"> - descentralização administrativa - aplicação combinada de instrumentos de regulação e econômicos - análise econômica de custo-efetividade - orienta-se por ações integradas multissetoriais 	<ul style="list-style-type: none"> - pouca ou nenhuma experiência de negociação social no país - resistência de grupos políticos e agentes econômicos viciados em relações clientelistas - conflitos de competências administrativas 	<ul style="list-style-type: none"> - planejamento multissetorial - revisão do planejamento - consideração de preocupações conservacionistas - instituição de fóruns de negociação social 	<ul style="list-style-type: none"> - instituição de comitês de bacia em alguns estados - Constituições Federal e Estaduais após 1988 - Lei das Águas (Lei 9.433/97)

Fonte: Adaptado de Setti *et al.* (2001); Barth (2002 apud Libânio, 2006, p. 63).

A proposição de um sistema nacional e de sistemas estaduais de recursos hídricos por um grupo de trabalho de diferentes segmentos das esferas do poder do Estado, em 1986, exerceu influência na elaboração da Constituição Federal e na Política Nacional de Recursos Hídricos (CARVALHO *et al.*, 2008). A Constituição Federal de 1988 alterou o Código de Águas de 1934 ao extinguir a propriedade privada sobre as águas, definindo-a como bem ambiental de uso comum sob responsabilidade da União. Ademais, transferiu aos estados o domínio das águas subterrâneas, as quais não apresentavam titularidade (FREITAS, 2006). A Constituição Federal não mencionava o domínio de bacias hidrográficas, mas sobre rios. Determinou que o governo federal estaria incumbido de gerir os grandes rios que escoam por mais de um estado, ou que são o limite geográfico entre estados e entre países, enquanto os

governos estaduais administrariam os tributários desses rios. Assim sendo, deveria haver a ação conjunta dessas duas esferas administrativas na escala de bacia hidrográfica, representando um dos principais desafios na forma como a gestão vinha ocorrendo (PORTO e KELMAN, 2000).

Por outro lado, as águas subterrâneas passaram a pertencer à esfera administrativa estadual, circunscritas ao limite territorial (BORGES, REZENDE e AVANZI, 2012). A dominialidade manteve-se a mesma prevista na Constituição Federal de 1988, de modo que as águas superficiais estão sujeitas às bacias hidrográficas nacionais e estaduais e as águas subterrâneas sob jurisdição dos estados. Com a Lei das Águas, o país passou a contar com três escalas de planejamento das águas por comitês, a saber, nacional, estadual e de bacia hidrográfica (RIBEIRO, 2017).

A gestão integrada de águas no Brasil é atualmente regida pela Lei das Águas, Lei Federal nº 9.433 de 1997, que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (PORTO e KELMAN, 2000). A Lei das Águas reforçou o caráter de domínio público das águas, definido pela Constituição Federal de 1988, e considerou a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento. Além disso, admitiu a água como recurso escasso, por isso devendo ser dotado de valor econômico, e os direitos dos usuários e dos múltiplos usos (VEIGA e MAGRINI, 2013), bem como possibilitou a inclusão de avaliações de aspectos socioambientais (ENGLE e LEMOS, 2010). Dessa maneira, o conceito tradicional de gestão de águas por regiões administrativas (União, estados e municípios) foi oficialmente rompido (MAGRINI e SANTOS, 2001). Ainda assim, cada unidade administrativa (União, estados, municípios e Distrito Federal) tem a sua competência em relação à gestão de águas no Brasil (Quadro 2), condizente com o que prescreve a Constituição Federal em legislação complementar (AITH e ROTHBARTH, 2015).

Quadro 2 – Competências dos entes federativos na gestão de águas no Brasil.

Ente federativo	Competência
União Federal	<ul style="list-style-type: none"> • Gerencia a Política Nacional e o Plano Nacional de Recursos Hídricos; • Fiscaliza e regula a gestão hídrica no país, junto ao Ministério do Meio Ambiente e a Agência Nacional de Águas; • Conselho Nacional de Recursos Hídricos regulamenta política com a participação do governo federal, estados, DF, setores e usuários da Sociedade Civil; • Gerencia comitês de bacias hidrográficas federais ou interestaduais; • Fiscaliza a água para consumo humano por meio da Agência Nacional de Vigilância Sanitária;
estados	<ul style="list-style-type: none"> • Responsável pela gestão das águas sob o seu domínio; • Elabora legislação específica para sua área; • Organiza o Conselho Estadual de Recursos Hídricos e garante o funcionamento dos comitês de bacia hidrográfica em sua competência; • Fiscaliza a água para consumo humano por meio da Vigilância Sanitária estadual;
Municípios	<ul style="list-style-type: none"> • Integram políticas de saneamento básico às políticas de uso, ocupação e conservação do solo e do meio ambiente com as políticas federal e estaduais de Recursos Hídricos; • Possuem assentos nos Comitês de Bacias Hidrográficas no intuito de promover a articulação intersetorial e federativa das políticas públicas territoriais; • Fiscaliza a água para consumo humano por meio da Vigilância Sanitária municipal.
Distrito Federal	<ul style="list-style-type: none"> • Possui as mesmas competências dos estados e municípios na gestão de águas.

Fonte: Adaptado de Aith e Rothbarth (2015, p. 169).

Na perspectiva da administração de organizações, o gerenciamento depende do ambiente em que se insere a organização, das demandas que surgem e das respostas a elas, decorrentes da rede de relações da estrutura institucional em sistema. Como nada é fixo, a negociação e a criação de instâncias para realizar o gerenciamento são fundamentais. Assim, o modelo sistêmico de integração participativa é sustentado por três instrumentos principais de gerenciamento (LANNA, 1995 apud SETTI *et al.*, 2001, p. 84):

- INSTRUMENTO 1. Planejamento estratégico por bacia hidrográfica: Baseado no estudo de cenários alternativos futuros, estabelecendo metas alternativas específicas de desenvolvimento sustentável (crescimento econômico, equidade social e sustentabilidade ambiental) no âmbito de uma bacia hidrográfica. Vinculados a essas metas são definidos prazos para concretização, meios financeiros e os instrumentos legais requeridos.

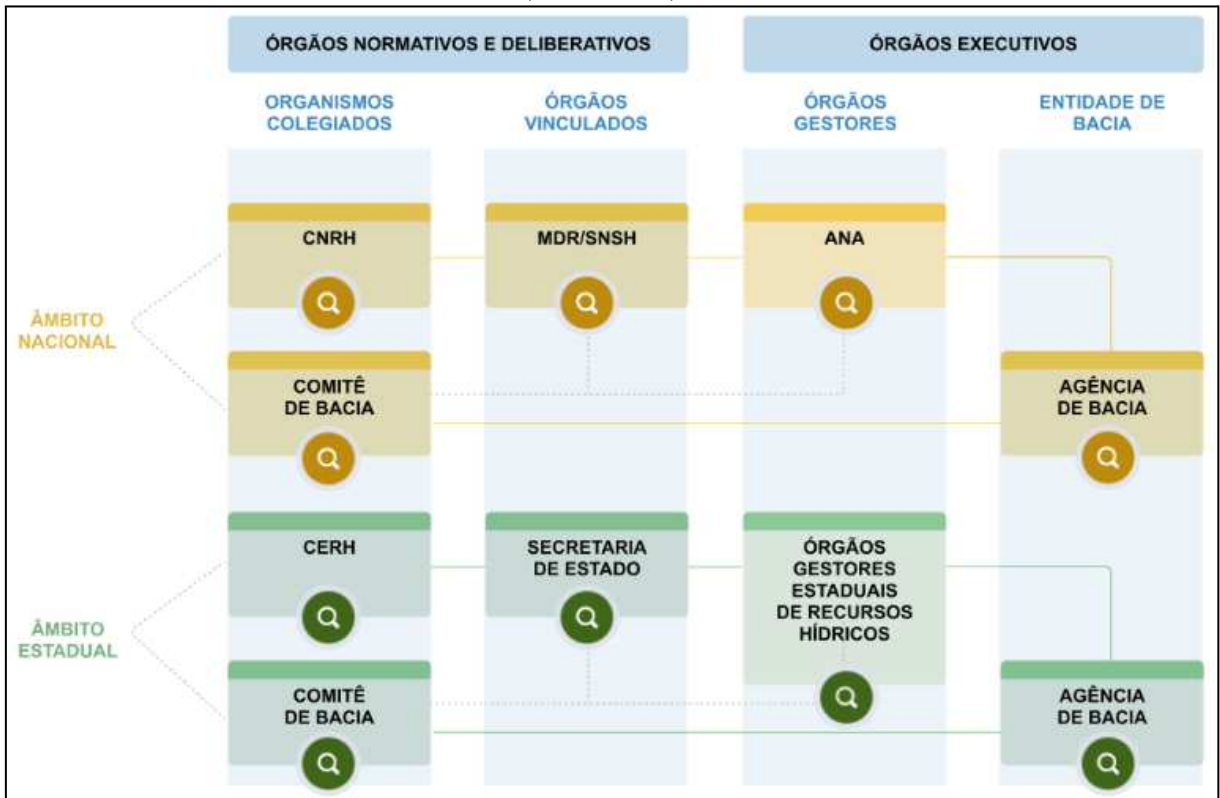
- INSTRUMENTO 2. Tomada de decisão através de liberações multilaterais e descentralizadas: Implementação da negociação social, baseada na constituição de um Comitê de Bacia Hidrográfica do qual participem representantes de instituições públicas, privadas, usuários, comunidades e de classes políticas e empresariais atuantes na bacia. Esse comitê tem para si assegurada a análise e aprovação dos planos e programas de investimentos vinculados ao desenvolvimento da bacia, permitindo o cotejo dos benefícios e custos correspondentes às diferentes alternativas.

- INSTRUMENTO 3. Estabelecimento de instrumentos legais e financeiros: Tendo por base o planejamento estratégico e as decisões, são estabelecidos os instrumentos

legais pertinentes e as formas de captação de recursos financeiros necessários para implementação de planos e programas de investimentos.

No modelo de gestão de águas atual, a condição mais relevante é a da descentralização da tomada de decisões, com a participação dos representantes das partes interessadas do menor nível do sistema de gerenciamento para o consenso entre conflitos, na escala da bacia hidrográfica em que estão situadas (PORTO e KELMAN, 2000). Assim como a descentralização e a participação por representação, a integração é um dos pilares desse modelo de gestão de águas. A integração é compreendida pela articulação vertical, entre os poderes federal, estadual e municipal, e horizontalmente, pela realização da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental, assim como entre os diferentes segmentos da sociedade que têm interesse na gestão de águas e que têm a sua representação nos comitês de bacia hidrográfica. Em linhas gerais, o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH - Figura 1), criado com a promulgação da Lei das Águas, é constituído por entidades formuladoras de políticas públicas, responsável pela criação de normas e regimentos de recursos hídricos, como órgãos colegiados e da administração direta nacional e estadual, e entidades implementadoras das políticas públicas propostas, com poder de execução nas bacias hidrográficas, como órgãos outorgantes e as agências de bacia (SPÍNOLA, VITORIA e CERQUEIRA, 2016).

Figura 1 – Matriz institucional do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).



Fonte: ANA (2022a, p. 70).

À vista disso, o SINGREH tem a responsabilidade de fomentar a PNRH (RIBEIRO, 2017; ROSA e GUARDA, 2019). O SINGREH é constituído, em âmbito nacional, pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que tem a função de articular o planejamento e arbitrar conflitos; pela Secretaria Nacional de Segurança Hídrica, do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, como apoio ao CNRH e coordenar o Plano Nacional de Recursos Hídricos; e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), com poder executivo e com o papel de promover o funcionamento do SINGREH, fiscalizar os reservatórios e de editar normas de referência para o saneamento básico. No nível estadual, há os Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERH) e órgãos gestores estaduais de caráter executivo, como as secretarias de Estado. Os comitês de bacia e as agências de bacia estão tanto em escala nacional quanto em escala estadual (TOTTI, 2009; ANA, 2022a). Na bacia hidrográfica, os comitês de bacia possuem atribuições propositivas, deliberativas e consultivas, enquanto as agências de bacia, quando têm a possibilidade de serem criadas, ficam encarregadas de assumir a atribuição administrativa de secretaria-executiva e de apoio técnico aos comitês de bacia hidrográfica (ANA, 2011).

Esses comitês são as unidades básicas do sistema de gestão de águas e são formados por representantes da administração pública, dos usuários de água e da sociedade civil organizada (SPÍNOLA, VITORIA e CERQUEIRA, 2016). No caso do Brasil, os participantes que fazem parte da sociedade civil organizada são formados por usuários de águas, entidades de classe e movimentos sociais e ambientalistas, o que não é comum nos demais países (CARVALHO *et al.*, 2008). Enquanto o comitê de bacia hidrográfica é a primeira instância administrativa do SINGREH, abaixo hierarquicamente do CERH e do CNRH, acionada para arbitrar conflitos pelo uso da água, aos órgãos gestores cabe desempenhar a função de regulação, poder de polícia e de implementação das decisões. O comitê é também um fórum onde deve haver o debate das questões hídricas e de articulação dos interessados em cada bacia hidrográfica (ANA, 2011). Uma vez que há interessados com maior poder de influência, política e/ou econômica, e podem exercer a imposição de sua vontade, as tomadas de decisões exigem que os comitês de bacia hidrográfica sejam colegiados. Além disso, o interesse coletivo é a premissa básica que deve ser defendida (MACHADO, 2003).

A Lei de Águas, dentre outros avanços em relação aos modelos de gestão anteriores, definiu cinco instrumentos para a realização da Política Nacional de Recursos Hídricos: o plano de bacia hidrográfica, o enquadramento de corpo d'água, a outorga de direito de uso, a cobrança pelo uso da água e o sistema de informações sobre recursos hídricos (TOTTI, 2009). Essas ferramentas podem ser agrupadas em dois conjuntos (Quadro 3), a saber, os instrumentos usados para o planejamento (plano de bacia hidrográfica, enquadramento dos corpos d'água e sistema de informações sobre recursos hídricos) e os instrumentos de controle administrativo (outorga e cobrança pelo uso das águas) (GRANZIERA, 2006 apud BURITI e BARBOSA, 2014).

Quadro 3 – Instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

Modalidade	Instrumento	Objetivo
Planejamento	Plano de bacia hidrográfica	Fundamentar e orientar a gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica.
	Enquadramento dos corpos d'água	Assegurar qualidade compatível com os usos e diminuir os custos de combate à poluição das águas mediante ações preventivas permanentes.
	Sistema de informações sobre recursos hídricos	Armazenar dados e informações sobre a situação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos para caracterizar a situação da bacia.
Controle administrativo	Outorga de direito de uso de recursos hídricos	Garantir o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água.
	Cobrança pelo uso da água	Incentivar a racionalização do uso da água e obter recursos financeiros para o financiamento dos programas de intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos.

Fonte: Adaptado de Totti (2009, p. 16); Granziera (2006 apud Buriti e Barbosa, 2014).

O comitê de bacia hidrográfica tem a incumbência de implantar esses instrumentos. Por ser um órgão colegiado e abranger diversos interesses, a efetivação de cada instrumento necessita de tempo para envolver a participação e aceitação dos segmentos compreendidos (TOTTI, 2009). Nessa perspectiva, a Lei das Águas também rompeu com os modelos de gestão tradicionais ao trocar os instrumentos de “comando e controle” por instrumentos econômicos, como a outorga e a cobrança (MAGRINI e SANTOS, 2001).

A partir da Lei das Águas, de 1997, o Brasil seguiu tendências internacionais de gestão integrada de águas. Mesmo organizado com base no modelo de águas francês, o atual modelo assimilou o conceito de desenvolvimento sustentável, que tenta se adaptar às desigualdades regionais de distribuição e demanda de águas em um país continental (VEIGA e MAGRINI, 2013). Grande parte dos estados do Brasil seguem a estrutura de regulação das águas definida pela Política Nacional de Recursos Hídricos, apesar da eficiência ser variável entre os estados e mesmo entre os comitês de bacias hidrográficas (RIBEIRO, 2017). Isso porque a Lei das Águas deixa livre aos estados a escolha de aspectos dos comitês de bacia, como o percentual de representantes, o apoio técnico, a implementação da cobrança e o nível da agência de águas, limitando o papel de gerenciamento do comitê (ENGLE e LEMOS, 2010).

Mesmo depois da sua criação, o SINGREH ainda apresenta fragilidades e isso é verificado, por exemplo, nos momentos em que há crises de desabastecimento de água, como ocorreu nas regiões Sudeste e Nordeste do país (RIBEIRO, 2017). Além disso, as agências estatais do setor de águas ainda mantêm controle ativo nas decisões, extrapolando o papel que seria dos próprios comitês de bacia hidrográfica (BARBOSA, ALAM e MUSHTAQ, 2016). Assim, apesar do incentivo à participação das partes interessadas e do gerenciamento descentralizado das águas, a gestão ainda é centralizada no poder de agentes estatais, de modo que a noção de participação nesse modelo de gestão não alcançou os resultados esperados (LIBÂNIO, 2018). Por outro lado, a Lei das águas também é compreendida como uma resposta neoliberal às contradições geradas pelas suas atividades econômicas, na forma de pequenas concessões democráticas e periféricas, as quais não constituem, de fato, um marco de cidadania (IORIS, 2009).

Por mais que o modelo de gestão de águas atualmente no Brasil tenha apresentado avanços em relação a outros países, há de se considerar que a Lei das Águas não contemplou todas as necessidades. Após a sua promulgação, leis complementares foram criadas para suprir a carência de informações ou a falta de diretrizes sobre determinadas questões, como foi o caso do enquadramento dos corpos d'água pela Resolução CONAMA nº 357/2005 e da criação da ANA pela Lei Federal nº 9.984/2000 (MARTINELLI, 2013). Particularmente, a abordagem da indissociação das águas subterrâneas e águas superficiais aparece no Inciso I, do Art. 3º, da Lei das Águas (BRASIL, 1997):

Art. 3º Constituem diretrizes gerais de ação para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos:
I - a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade.

O uso recente, em grande escala, das águas subterrâneas no país (BOHN, GOETTEN e PRIMO, 2014), assim como as poucas informações acerca dos aquíferos somado ao ideário de que as águas subterrâneas são um recurso inesgotável e livre de contaminação podem ter contribuído para que houvesse a defasagem de regulamentação das águas subterrâneas em relação às águas superficiais na legislação brasileira (STAUD e BERRETA, 2018). O mesmo pode-se dizer de sua visibilidade, uma vez que contaminações nas águas subterrâneas podem ter ocorrido ao longo de certo tempo sem que alterações tenham sido percebidas (MANZIONE, 2015).

Por isso, questiona-se essa integração, institucional e de águas, definida na Lei das Águas. Em um primeiro plano tem-se a integração pela descentralização administrativa, com a concessão de funções distribuídas entre instituições do Estado, e pela descentralização

territorial, com os comitês de bacia hidrográfica. Apesar da maior participação social em relação aos modelos anteriores, o atual modelo de gestão de águas não tem condições para tornar o poder de decisão completamente descentralizado e participativo, pois há continuidade da divisão institucional e realização de políticas setoriais. Isso indica que, até esse momento, a gestão de águas é fragmentada e resultante da “herança de um Estado interventor e paternalista, tal como as relações que este estabeleceu com os grupos dominantes” (CAMPOS e FRACALANZA, 2010, p. 366). O mesmo aplica-se à abordagem de indissociabilidade das águas, em que há uma indefinição do regramento da gestão das águas subterrâneas (BOHN, GOETTEN e PRIMO, 2014). Inclusive, os sistemas de monitoramento nacional de águas são dissociados, como o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) para as águas superficiais e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) (VILLAR, 2016).

Durante muito tempo, as águas subterrâneas estiveram subordinadas à proteção das águas superficiais e participaram parcialmente da gestão de águas. Com o estabelecimento da Lei das Águas, as águas subterrâneas assimilaram os princípios da gestão de águas em geral, como a gestão compartilhada, para o caso da dominialidade dos estados federativos. Sem uma sistematização normativa (HUNSCHE, 2010) o CNRH gradualmente emitiu resoluções que dizem respeito às águas subterrâneas e a sua gestão integrada às águas superficiais para realizar a complementação necessária à Lei das Águas (Quadro 4).

Quadro 4 – Resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos que remetem à integração das águas subterrâneas e superficiais.

Norma	Determinação
Resolução do CNRH nº 09, de 21 de junho de 2000	“Institui a Câmara Técnica Permanente de Águas Subterrâneas”.
Resolução do CNRH nº 15, de 11 de Janeiro de 2001	“Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas”.
Resolução do CNRH nº 22, de 24 de Maio de 2002	“Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no instrumento Planos de Recursos Hídricos”.
Resolução do CNRH nº 91, de 5 de Novembro de 2008	“Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos”.
Proposta de Resolução do CNRH nº 92, de 05 de Novembro de 2008	“Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro”.
Resolução do CNRH nº 107, de 13 de abril de 2010	“Estabelece diretrizes e critérios a serem adotados para o planejamento, a implantação e a operação de Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo, Quantitativo de Águas Subterrâneas”.
Resolução do CNRH nº 126, de 30 de junho de 2011	“Aprova diretrizes para o cadastro de usuários de recursos hídricos e para a integração das bases de dados referentes aos usos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos”.
Resolução do CNRH nº 145, de 12 de dezembro de 2012	“Estabelece diretrizes para a elaboração de Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas e dá outras providências. Observações: Revoga a Resolução CNRH nº17, de 29 de maio de 2001”.
Resolução do CNRH nº 153, de 17 de dezembro de 2013	“Estabelece critérios e diretrizes para implantação de Recarga Artificial de Aquíferos no território brasileiro”.
Resolução do CNRH nº 184, de 07 de dezembro de 2016	“Estabelece diretrizes e critérios gerais para definição das derivações e captações de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, e lançamentos de efluentes em corpos de água e acumulações de volumes de água de pouca expressão, considerados insignificantes, os quais independem de outorga de direito de uso de recursos hídricos, e dá outras providências”.
Resolução do CNRH nº 202, de 28 de junho de 2018	“Estabelece diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que contemplem a articulação entre a União, os Estados e o Distrito Federal com vistas ao fortalecimento dessa gestão”.

Fonte: CNRH (2023).

No ano de 2000, a Resolução nº 09 (CNRH, 2000) criou a Câmara Técnica Permanente de Águas Subterrâneas para tratar de assuntos pertinentes às particularidades de gestão dessas águas. No ano seguinte, a Resolução nº 15/2001 (CNRH, 2001), em seu Art. 2º, informa que “na formulação de diretrizes para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos deverá ser considerada a interdependência das águas superficiais, subterrâneas e meteóricas”. É a primeira normativa, após a Lei das Águas, que reafirma o compromisso de incluir as águas subterrâneas à gestão das águas superficiais e especifica, no

Art. 3º, como deve ser o tratamento das águas subterrâneas através dos cinco instrumentos da PNRH: o plano de bacia hidrográfica, o enquadramento dos corpos d'água subterrânea, a outorga de direito de uso, a cobrança pelo uso das águas subterrâneas e o Sistema de Informações de Recursos Hídricos.

No que diz respeito aos aquíferos que abrangem mais de uma bacia hidrográfica, a mesma resolução coloca, no seu Art. 4º, que o SINGREH, em conjunto com os Sistemas de Gerenciamento de Recursos Hídricos dos Estados ou do Distrito Federal, são responsáveis por “promover a uniformização de diretrizes e critérios para coleta dos dados e elaboração dos estudos hidrogeológicos necessários à identificação e caracterização da bacia hidrogeológica”. A Resolução nº 15/2001 (CNRH, 2001) esclarece, no parágrafo único do Art. 4º, que os comitês de bacia hidrográfica terão a incumbência de realizar o compartilhamento e a sistematização de dados para a caracterização da mesma bacia hidrogeológica. Por outro lado, essa normativa define, no seu Art. 6º, os municípios como os entes administrativos que deverão gerir as águas subterrâneas dentro das suas áreas territoriais, seguindo a orientação do SINGREH, dos Sistemas Estaduais de Gerenciamento de Recursos Hídricos e do Distrito Federal, bem como o que está previsto no plano de recursos hídricos. O papel dos municípios é também de incentivar a proteção das áreas de recarga natural e de recarga artificial. Assim, os municípios devem articular os seus planos diretores à gestão das águas subterrâneas (FABIANOVICZ e SILVA JUNIOR, 2007).

A elaboração de uma normativa para a inserção das águas subterrâneas nos planos de recursos hídricos pode ter sido uma estratégia para deliberar sobre a incompatibilidade entre as bacias hidrográficas e os aquíferos (GRANZIERA e GRANZIERA, 2014). A Resolução do CNRH nº 22/2002 (CNRH, 2002) deixa expresso que o plano de recursos hídricos, instrumento da PNRH, deve considerar os usos múltiplos das águas subterrâneas (Art. 1º), com a possibilidade de criar áreas de uso restritivo (parágrafo 2º do Art. 6º), detalhado mais tarde na Proposta de Resolução do CNRH nº 92, de 05 de Novembro de 2008 (CNRH, 2008). O plano de recursos hídricos deve conter a caracterização dos aquíferos, de modo que sejam identificadas “as inter-relações de cada aquífero com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos e com o meio ambiente, visando à gestão sistêmica, integrada e participativa das águas” (Art. 2º). Ou seja, conforme o Art. 2º, as informações obtidas na avaliação das interações aquífero-rio são exigidas nos planos de recursos hídricos. Em relação à normativa anterior (Resolução nº 15/2001), essa resolução indica que “no caso de aquíferos subjacentes a grupos de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas, os Comitês deverão estabelecer os

critérios de elaboração, sistematização e aprovação dos respectivos Planos de Recursos Hídricos [...]”, conforme parágrafo único do Art. 2º. Além disso, nos planos de recursos hídricos, a avaliação das águas subterrâneas, incluindo as interações aquífero-rio (incisos I, II e III) constam no Art. 3º, no qual devem aparecer as seguintes informações individualmente para cada aquífero (CNRH, 2002):

- I – a caracterização espacial;
- II – o cômputo das águas subterrâneas no balanço hídrico;
- III – a estimativa das recargas e descargas, tanto naturais quanto artificiais;
- IV – a estimativa das reservas permanentes exploráveis dos aquíferos;
- V – caracterização físico, química e biológica das águas dos aquíferos;
- VI – as devidas medidas de uso e proteção dos aquíferos.

Outra normativa que trata da gestão de águas superficiais e subterrâneas nos planos de recursos hídricos é a Resolução do CNRH nº 145, de 12 de dezembro de 2012 (CNRH, 2012). O inciso IV, do Art. 11º, prevê que para a aprovação do plano de recursos hídricos, é necessário atender como um dos requisitos mínimos a “avaliação quantitativa e qualitativa das águas superficiais e subterrâneas”.

A Resolução do CNRH nº 107, de 13 de abril de 2010 (CNRH, 2010), estabeleceu no seu Art. 2º que “A Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas deverá ser planejada e coordenada pela Agência Nacional de Águas-ANA e implantada, operada e mantida pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais-CPRM”. A ANA e a CPRM devem articular-se aos órgãos e entidades gestores de águas dos estados e do Distrito Federal. O cadastro de usuários de águas superficiais e subterrâneas foi definido como um sistema integrado através da Resolução do CNRH nº 126, de 30 de junho de 2011 (CNRH, 2011).

De todas as normativas produzidas pelo CNRH que fazem menção à integração de águas subterrâneas e superficiais, com base na PNRH, a mais recente é a Resolução nº 202, de 28 de junho de 2018 (CNRH, 2018). Essa normativa é um marco no sistema de gestão de águas do país, uma vez que trata especificamente da gestão integrada entre os aquíferos e as bacias hidrográficas (MATTIUZZI e MARQUES, 2019). Definitivamente, esta é a resolução que traz diretrizes explícitas da incorporação da descarga de águas subterrâneas e sua relação com a manutenção do escoamento de base de rios na gestão integrada de águas subterrâneas e superficiais, como se observa no parágrafo único do Art. 1º: “Esta resolução se aplica aos aquíferos livres e rios perenes onde exista conectividade direta entre águas superficiais e subterrâneas”. Em termos de hidrogeologia, verifica-se que essa última resolução é restrita aos aquíferos livres e ignora a contribuição da vazão de base proveniente dos aquíferos

confinados. Alguns dos conceitos utilizados nessa resolução são os de aquífero, aquífero livre, área de recarga, conectividade direta, vazão de base, gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, rios perenes e sistema aquífero (Art. 2º - CNRH, 2018):

I - aquífero: corpo hidrogeológico, formação geológica com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras, ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos;

II - aquífero livre: aquífero que possui uma superfície livre de água submetida à pressão atmosférica. Sua superfície potenciométrica é real e situa-se ou no topo ou abaixo do topo da formação aquífera;

[...]

V - área de recarga: trecho da bacia hidrográfica em que a água da chuva que infiltra no solo, recarrega o aquífero;

VI - conectividade direta: fluxo de água que drena diretamente de um aquífero para um rio ou de um rio para um aquífero, sem interagir significativamente com outros mananciais de água superficial ou subterrânea;

VII - vazão de base: fluxo de água subterrânea responsável pela perenidade dos corpos de água superficial, exceto naqueles regularizados por contribuições de água de degelo e por reservatórios superficiais;

VIII - gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos: conjunto de procedimentos que visam garantir a sustentabilidade hídrica quanto ao aproveitamento integrado das águas superficiais e subterrâneas;

[...]

XII - rios perenes: rios que, em função da contribuição de aquíferos, possuem naturalmente escoamento superficial durante todo o período do ano; e

XIII - sistema aquífero: conjunto de aquíferos hidraulicamente conectados.

Chamam a atenção as ideias de “sustentabilidade hídrica” e de “aproveitamento integrado das águas superficiais e subterrâneas”, ambas vinculadas ao conceito de gestão de recursos hídricos (Art. 2º). Depreende-se pelo conceito de gestão, dessa normativa, que há uma preocupação quanto à capacidade de armazenamento do balanço hídrico subterrâneo, em função da extração de águas ou obstaculização da recarga por atividades antropogênicas, e do seu impacto, por conectividade direta, na disponibilidade do escoamento de base para os múltiplos usos. A própria resolução considera que a sua elaboração baseia-se no “princípio de que os recursos hídricos são limitados e seus usos são interdependentes”. Outros conceitos introduzidos junto ao Art. 2º (CNRH, 2018), mostram que essa resolução está inclinada ao incentivo de estudos de aspectos quantitativos do escoamento de base, tendo em vista que não realiza sequer alusão direta à qualidade das águas, observável nas definições de Reserva Renovável ou Reguladora ou Recarga Potencial Direta; o de Reserva Explotável ou Reserva Potencial Explotável; e o de Coeficiente de Sustentabilidade:

IX - Reserva Renovável ou Reguladora ou Recarga Potencial Direta (RPD): parcela da precipitação pluviométrica média anual que infiltra e efetivamente alcança o aquífero livre, correspondendo ao somatório da vazão de base, dos volumes de águas subterrâneas em exploração e da recarga profunda;

X - Reserva Explotável ou Reserva Potencial Explotável: parcela da RPD indicada pelo Coeficiente de Sustentabilidade (CS) que deve ser explorada de forma

sustentável, de modo a não interferir nas vazões mínimas referenciais para a outorga de águas superficiais;

XI - Coeficiente de Sustentabilidade (CS): percentual máximo recomendado para se explorar a Recarga Potencial Direta (RPD), com vistas a evitar efeitos adversos nos aquíferos e a redução significativa das vazões de base dos rios a eles interconectados. Seu valor varia entre 0,1 e 1,0 e deve ser atribuído por aquífero, em função de suas características intrínsecas, especialmente sua contribuição por meio do fluxo de base no escoamento superficial total de um rio. Sua função é evitar o comprometimento da disponibilidade hídrica superficial desses corpos d'água nos períodos de estiagem com o uso indiscriminado da água subterrânea;

A avaliação hidrológica integrada da Resolução n° 202/2018 (Art. 3°) difere da apresentada na Resolução do CNRH n° 22/2002 (CNRH, 2002), sobre os planos de recursos hídricos. No Art. 3° da Resolução n° 202/2018, há a descrição dos estudos que devem ser realizados pela gestão de águas para a identificação, caracterização e estimativa das áreas de recarga e descarga de águas subterrâneas. O Inciso III, do Art. 3° (CNRH, 2018), ainda inclui a estimativa da Reserva Explotável ou Reserva Potencial Explotável, o qual requer, conseqüentemente, a estimativa da Reserva Renovável ou Reguladora ou Recarga Potencial Direta (RPD) e do Coeficiente de Sustentabilidade (CS):

Art. 3° A gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos contemplará avaliações hidrológicas integradas e deverá observar, no mínimo, as seguintes diretrizes:

- I - delimitação das áreas de recarga e de contribuição dos aquíferos para os rios diretamente conectados;
- II - estimativa da contribuição dos aquíferos para a vazão de base dos rios;
- III - estimativa da recarga e as reservas explotáveis e renováveis,
- IV - estimativa da disponibilidade hídrica integrada subterrânea e superficial para os diversos usos, considerando os incisos anteriores; e
- V - as redes de monitoramento hidrometeorológica e hidrogeológica necessárias.

O Art. 3° também prevê redes de monitoramento para a caracterização do escoamento de base, de modo que “no planejamento e na implantação de novos pontos de monitoramento fluviométrico nas bacias hidrográficas, deverão ser considerados os aquíferos ou sistemas aquíferos para a adequada avaliação das contribuições subterrâneas” (Art. 4°). Por fim, a Resolução n° 202/2018 determina que a criação de atos administrativos e estudos de contribuição dos aquíferos ao escoamento de base das bacias hidrográficas seja de responsabilidade dos órgãos com competência de outorga das águas superficiais e subterrâneas (Art. 3°). Além disso, indica que deve ser observada a dominialidade dos cursos d'água prevista na Constituição Federal de 1988, para a criação de diretrizes e critérios de outorga dessas águas (Art. 5°) e articulação com os comitês de bacia hidrográfica, a depender das prioridades elencadas pelos órgãos gestores (Art. 8°).

Apesar da elaboração esporádica de normas pelo CNRH referentes à indissociabilidade de águas, a gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas

estabelecida no Brasil ainda enfrenta uma série de desafios. Dentre eles, por exemplo, há a não coincidência da divisão político-administrativa dos estados ou da área de atuação dos comitês nas bacias hidrográficas com a extensão dos aquíferos; a dificuldade em se articular a atuação administrativa, no ordenamento jurídico nacional em vigor, com as mesmas políticas de recursos hídricos e ordenamento da ocupação territorial de estados ou comitês de bacia hidrográfica que compartilham os mesmos aquíferos; e a falta de pesquisas de cunho sistêmico que retratem a unicidade das águas subterrâneas e superficiais como corpo hídrico em cada unidade hidrográfica na elaboração dos planos de recursos hídricos (GRANZIERA e GRANZIERA, 2014).

2.1.2 Gestão integrada de águas em Santa Catarina

A gestão de águas em Santa Catarina está vinculada às entidades do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Figura 2). Instituído no ano de 1993, antes mesmo da Lei das Águas no Brasil, esse sistema é responsável pela implementação da Política Estadual de Recursos Hídricos. O sistema de gerenciamento está estruturado em Órgão de Orientação Superior (Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CERH), Órgão Gestor de Recursos Hídricos ou Órgão Central do Sistema (Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável - SDE) e por Órgãos Setoriais de Apoio e Execução² (órgãos e entidades públicas do Estado com o papel de apoiar o CERH técnica e administrativamente e de articular-se com a SDE). Na escala de bacia hidrográfica, o Comitê de Bacia Hidrográfica é o órgão normativo e deliberativo; a Diretoria de Recursos Hídricos e Saneamento (DRHS), da Secretaria Executiva do Meio Ambiente (SEMA), representa³ o Órgão Gestor de Recursos Hídricos (a SDE); e a Agência de Bacia Hidrográfica, que assume a função de Secretaria Executiva do Comitê de Bacia Hidrográfica (SANTA CATARINA, 1993; SANTA CATARINA, 2010).

² Dentre esses órgãos, podem ser mencionados a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE), Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), Departamento Estadual de Infraestrutura (DEINFRA), Secretaria de Agricultura, IMA (extinta FATMA), Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), bem como demais empresas públicas ou fundações vinculadas à área de recursos hídricos (TRINDADE, 2016).

³ Essas funções ainda não se encontravam, em junho de 2023, totalmente em exercício no âmbito do governo do Estado de Santa Catarina.

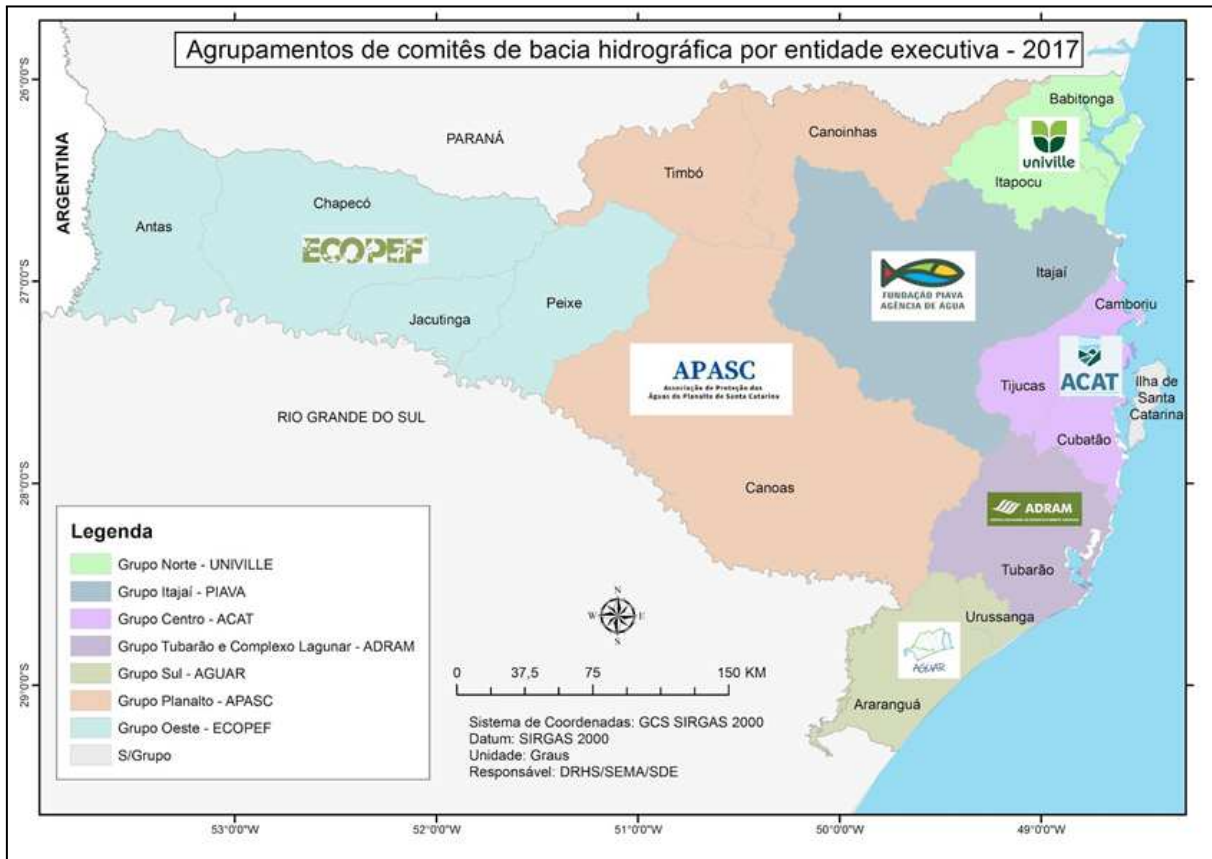
Figura 2 – Matriz institucional do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Santa Catarina.



Fonte: ANA (2019, p. 04).

Na ausência das Agências de Bacia Hidrográfica em Santa Catarina, o CERH instituiu pela Resolução nº 20, de 23 de abril de 2018, o modelo de Entidades Executivas (Figura 3). Elas são instituições formadas por organizações da sociedade civil sem fins lucrativos, com caráter de apoio ao funcionamento de um ou mais comitês de bacia hidrográfica. Elas operam por meio do estabelecimento de parceria por tempo determinado com o Órgão Gestor de Recursos Hídricos (Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável, até dez/2022), enquanto as Agências de Bacia Hidrográfica não forem criadas (CERH-SC, 2018a).

Figura 3 – Localização das entidades executivas no Sistema Estadual de Gerenciamento dos Recursos Hídricos de Santa Catarina no ano de 2017.



Fonte: SIRHESC (2017).

A gestão de águas em Santa Catarina segue a conformação do relevo e da disposição da rede hidrográfica. As bacias hidrográficas situadas no estado, em seu conjunto, apresentam o sistema de drenagem disposto em dois grupos: a Vertente do Interior e a Vertente do Litoral ou do Atlântico. A linha divisória de ambos os sistemas de drenagem é, de norte para sul, a Serra do Mar, a Escarpa do Planalto de Canoinhas, a Serra do Espinhaço (divisor entre as regiões hidrográficas do Paraná e do Uruguai) e a Escarpa da Serra Geral (PRATES, MANZOLLI e MIRA, 1986).

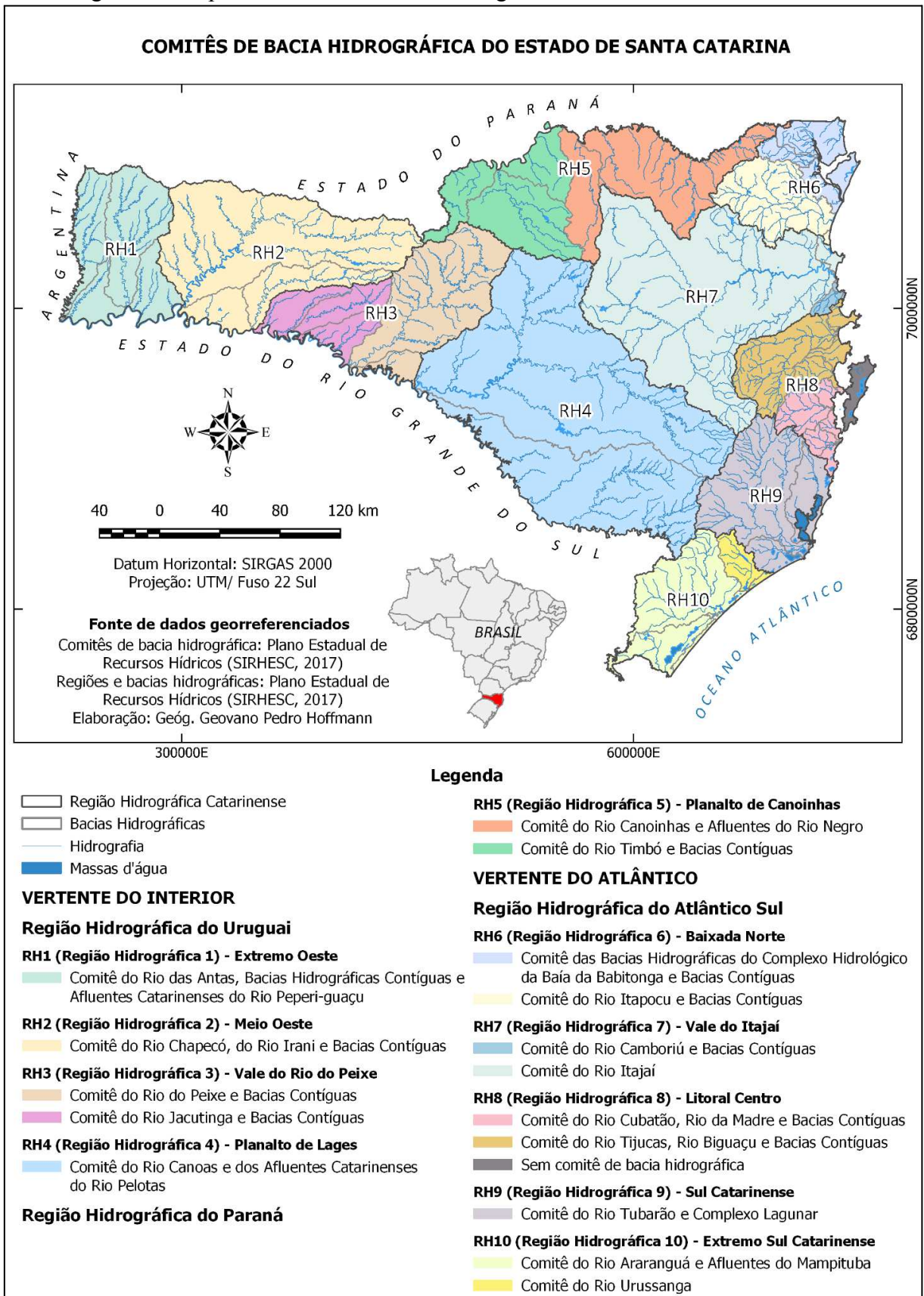
A Vertente Litorânea ou do Atlântico, em nível nacional, abrange parte da Região Hidrográfica Atlântico Sul (CNRH, 2003). Apresenta bacias hidrográficas autônomas, que deságuam em direção ao litoral, conhecidas como “Bacias do Sudeste” (SANTOS, 1977). Os rios apresentam orientação oeste-leste e são menos extensos que os da Vertente Interior (PRATES, MANZOLLI e MIRA, 1986). Nesse grupo de bacias hidrográficas, que ocupa 38% da área territorial de Santa Catarina, há os rios que nascem nas escarpas da Serra Geral e da Serra do Mar e há aqueles que têm origem em planícies. É também onde está a maior bacia

hidrográfica localizada inteiramente no estado, a do Rio Itajaí-Açu. A gestão de águas nessa vertente está compreendida nas seguintes regiões hidrográficas: Baixada Norte (RH6); Vale do Itajaí (RH7); Litoral Centro (RH8); Sul Catarinense (RH9); e Extremo Sul Catarinense (RH10) (ANTUNES e CONSTANTE, 2016).

A Vertente do Interior, em nível nacional, abriga parte das Regiões Hidrográficas do Uruguai e do Paraná (CNRH, 2003) e apresenta a maior cobertura da área territorial em Santa Catarina, com aproximadamente 62% (ANTUNES e CONSTANTE, 2016). A rede hidrográfica desses sistemas ultrapassa estados e países no âmbito da América do Sul e constituem a Bacia Hidrográfica do Prata (SANTOS, 1977). As regiões hidrográficas catarinenses dessa vertente usadas para a gestão de águas são: Extremo Oeste (RH1); Meio Oeste (RH2), Vale do Rio do Peixe (RH3); Planalto de Lages (RH4); e Planalto de Canoinhas (RH5) (ANTUNES e CONSTANTE, 2016).

Com o intuito de realizar o planejamento regional e descentralizado da gestão de águas, o governo do estado estabeleceu pela Lei nº 10.949/1998 a divisão do gerenciamento em 10 regiões hidrográficas (SANTA CATARINA, 1998). Essa regionalização foi atualizada para a implementação da Política Estadual de Recursos Hídricos com a Resolução do CERH nº 26/2018. Nesse último dispositivo legal, a região hidrográfica é considerada “o espaço territorial compreendido por grupo de bacias hidrográficas contíguas, [...], com características naturais, sociais e econômicas similares, com vistas a orientar o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos em âmbito estadual”. As regiões hidrográficas, do oeste ao litoral, são as seguintes (Figura 4): Extremo Oeste, Meio Oeste, Vale do Rio do Peixe, Planalto de Lages, Planalto de Canoinhas, Baixada Norte, Vale do Itajaí, Litoral Centro, Sul Catarinense e Extremo Sul Catarinense. Dentro de cada região hidrográfica estão uma ou mais Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPG), ou seja, os comitês de bacia hidrográfica, para orientar e implementar a PERH, podendo haver subdivisões de UPG em caso de necessidade (CERH-SC, 2018b).

Figura 4 – Mapa dos comitês de bacia hidrográfica do estado de Santa Catarina.



Fonte: Elaboração própria.

Apesar de ser capital do estado, Florianópolis é o único município que ainda não possui comitê(s) de bacia hidrográfica em sua área territorial, exceto na porção continental do município. Na sua parte insular, composta pela Ilha de Santa Catarina, onde se encontra significativa quantidade de bacias hidrográficas que deságuam diretamente no oceano (exorreicas) e que contêm importantes mananciais subterrâneos, ainda não possui um plano de gerenciamento das suas águas, mesmo que conflitos ambientais tenham sido gerados pelo avanço da urbanização nas últimas décadas.

Para além das bacias hidrográficas de Florianópolis, dos 16 comitês de bacia hidrográfica existentes em Santa Catarina, um deles está em processo de elaboração (Comitê dos rios Canoinhas e Negro) e outros dois continuam em processo de licitação (Comitê do rio do Peixe e Comitê dos rios Canoas e Pelotas) para desenvolver o plano de recursos hídricos (SANTA CATARINA, 2023), somando mais de 20 anos sem um planejamento desde a implementação de ambos em 2001 (SIRHESC, 2023). Também tardiamente à Lei das Águas e ao planejamento da maioria dos comitês de bacia hidrográfica do estado, o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH) aprovou o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) no ano de 2017 (SANTA CATARINA, 2017).

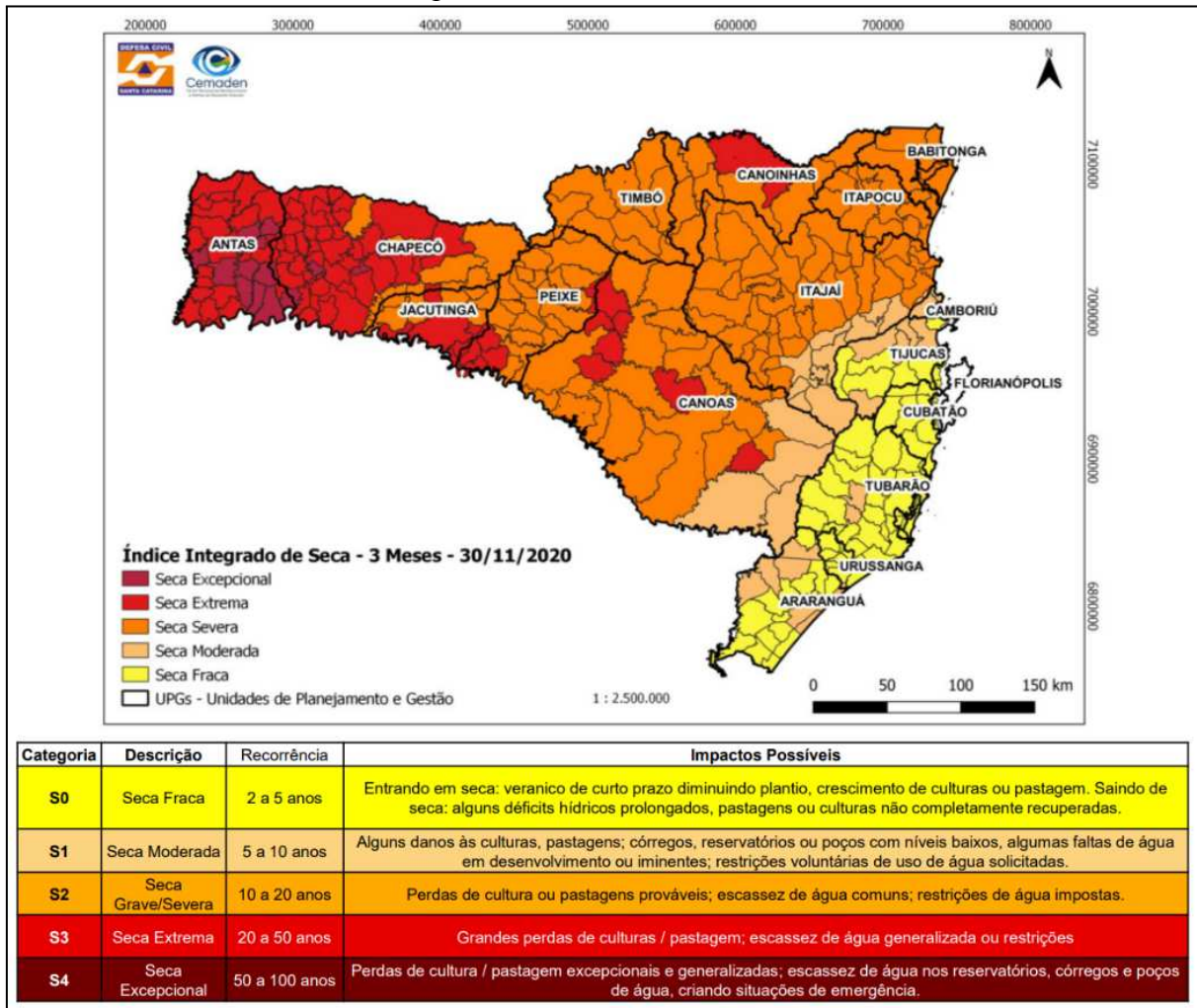
Apesar de existir uma estrutura administrativa do gerenciamento de águas, uma discussão a ser proposta é sobre o que significa e o que contempla a gestão do escoamento de base (interação aquífero-rio). A carência de uma gestão do escoamento de base, em nível de estado, se mostra de diferentes maneiras e alguns dados sobre o estado de Santa Catarina retratam essa situação.

Em Santa Catarina, a condição geral dos rios é de perenidade ao longo do ano, acompanhada de variações sazonais, dada a regularidade na distribuição das chuvas. A primavera e o final do verão são os períodos caracteristicamente de cheias, enquanto os momentos de vazões mínimas ocorrem no início do verão e no outono, com possibilidade de estender-se até o inverno (ANTUNES e CONSTANTE, 2016). Apesar do regime perene das bacias hidrográficas do estado, a redução nos volumes disponíveis têm sido cada vez mais frequente nas últimas décadas. O enfraquecimento de sistemas atmosféricos, como das convecções de verão e frentes frias, além do aumento da frequência de bloqueios atmosféricos sobre o estado, têm reduzido significativamente os totais mensais de chuvas durante sequências de meses. Essa configuração atmosférica resulta em secas meteorológicas, que podem levar municípios a atingirem somente 10% da média climatológica prevista de chuvas, como aconteceu no período entre 2000 e 2010. É em momentos de desastres ambientais como

esses, proporcionados por fenômenos naturais, que a sociedade torna-se mais exposta à vulnerabilidade dos sistemas físicos e sociais (MONTEIRO e SILVA, 2017).

Recentemente, em novembro de 2020, Santa Catarina vivenciou um de seus piores cenários de seca meteorológica. Naquele ano, houve uma abrangência generalizada de seca que atingiu todos os municípios do estado, em diferentes graus de severidade (Figura 5). Dos 295 municípios catarinenses, 13 apresentaram seca excepcional (com tempo de recorrência de 50 a 100 anos), 78 estavam em seca extrema (com tempo de recorrência de 20 a 50 anos), 120 tinham seca severa (tempo de recorrência de 10 a 20 anos), 30 em seca moderada e 52 estavam na situação de seca fraca (SDE/CIGERD-SC, 2020). Boletins hidrometeorológicos do mesmo período, referentes às datas de 15 de junho de 2021 (SDE/CIGERD-SC, 2021) e de 02 de março de 2022 (SDE/CIGERD-SC, 2022) registraram situações que chegaram próximas à magnitude do evento de seca do ano de 2020, e que se intercalaram com períodos de excedentes hídricos. Os episódios recentes de seca mostram que períodos secos eram eventuais e restritos ao Oeste de Santa Catarina, ao menos no início do século, e agora passaram a ser recorrentes, em um ciclo anual de ocorrência, e a difundir-se para todas as regiões hidrográficas do estado. Em situações extremas como essas, a necessidade de um armazenamento nos aquíferos com águas em qualidade que possam suprir minimamente as bacias hidrográficas pelo maior tempo possível torna-se vital.

Figura 5 – Mapa de avaliação do Índice Integrado de Seca (IIS) no estado de Santa Catarina para a data de 30/11/2020.



Fonte: Adaptado de CEMADEN/ANA (2020 apud SDE/CIGERD-SC, 2020, p. 10-11).

Em Santa Catarina, as bacias hidrográficas estão agrupadas em regiões hidrográficas e são similarmente compatíveis com a delimitação econômica e regional. Cada região hidrográfica abrange um ou mais comitês de bacia hidrográfica. Cada região hidrográfica tem as suas particularidades socioeconômicas, isso porque se desenvolveram historicamente de forma articulada e, ao mesmo tempo, diferenciaram-se entre si. Por isso, o conjunto de bacias hidrográficas de uma região tem problemas muito específicos que também caracterizam a diversidade regional. Dessa forma, cada comitê de bacia hidrográfica precisa lidar com diferentes interesses de setores usuários de água, especialmente das atividades econômicas predominantes, assim como os impactos ambientais decorrentes do seu desenvolvimento, de modo a tentar reverter ou minimizar os cenários de degradação ambiental. No Quadro 5 verifica-se a diversidade de atividades econômicas e os principais aspectos ambientais por região hidrográfica.

Quadro 5 – Caracterização das regiões hidrográficas de Santa Catarina.

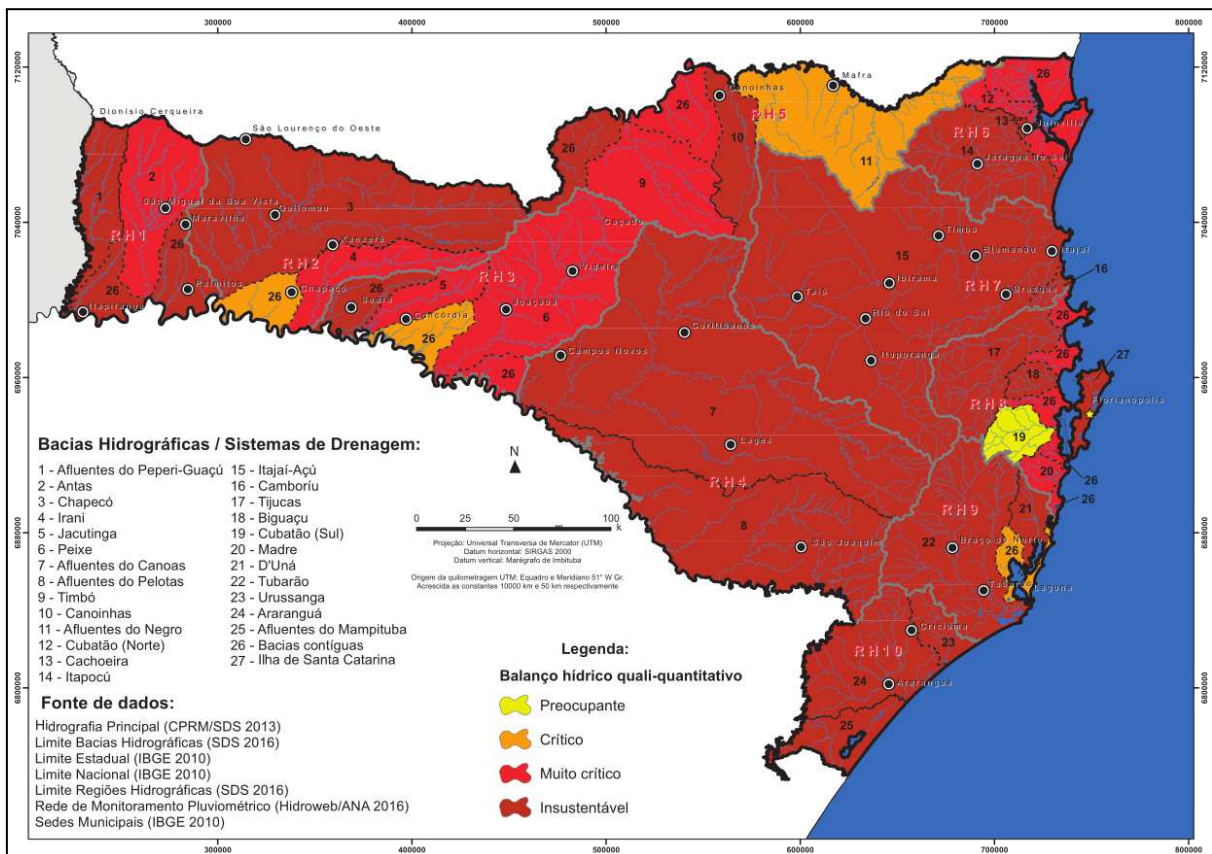
Região hidrográfica	Comitês de bacia hidrográfica	Atividades econômicas predominantes	Principais impactos ambientais
RH1 - Extremo Oeste (RH1)	-Comitê do Rio das Antas, Bacias Hidrográficas Contíguas e Afluentes Catarinenses do Rio Peperi-guaçu	-Suinocultura; -Avicultura; -Produção agrícola de milho e soja.	-Poluição difusa no meio rural (DBO, Nutrientes); -Poluição pontual nas cidades (DBO); -Uso indiscriminado de águas subterrâneas; -Estiagens; -Eutrofização reservatórios; -Tem a menor cobertura vegetal nativa (de 10% da sua área total, que inclui a Floresta Estacional Decidual e a Floresta Ombrófila Mista) dentre as regiões hidrográficas e também a menor quantidade de áreas legalmente protegidas.
RH2 - Meio Oeste	-Comitê do Rio Chapecó, do Rio Irani e Bacias Contíguas	-Suinocultura; -Avicultura; -Produção agrícola de milho e soja; -Agroindústrias.	- Poluição difusa no meio rural (DBO, Nutrientes); - Poluição pontual nas cidades (DBO); - Uso indiscriminado de águas subterrâneas; - Estiagens; - Eutrofização reservatórios; -Apresenta uma das menores quantidades de áreas legalmente protegidas no Estado (11%), contando com quatro unidades de conservação para a vegetação de Floresta Ombrófila Mista
RH3 - Vale do Rio do Peixe	-Comitê do Rio do Peixe e Bacias Contíguas -Comitê do Rio Jacutinga e Bacias Contíguas	-Suinocultura; -Avicultura; -Produção agrícola de milho e soja; -Agroindústrias.	- Poluição difusa no meio rural (DBO, Nutrientes); - Poluição pontual nas cidades (DBO); - Uso indiscriminado águas subterrâneas; - Estiagens; - Eutrofização reservatórios; -Possui uma das menores coberturas vegetais nativas no estado (de 10%, que inclui apenas Floresta Ombrófila Mista), contando com duas unidades de conservação.
RH4 - Planalto de Lages	-Comitê do Rio Canoas e dos Afluentes Catarinenses do Rio Pelotas	-Indústrias de papel e celulose; -Indústrias químicas; -Bovinocultura; -Avicultura; -Monocultivos florestais de espécies exóticas; -Produção agrícola de milho, soja e maçã.	- Poluição difusa no meio rural (DBO); - Poluição pontual nas cidades (DBO); -É uma das regiões hidrográficas com a maior cobertura vegetal nativa (cerca de 14,6% da sua área total, que inclui apenas a Floresta Ombrófila Mista), porém, é também uma das regiões com menor número de áreas protegidas, com somente duas unidades de conservação.
RH5 - Planalto de Canoinhas	-Comitê do Rio Canoinhas e Afluentes do Rio Negro -Comitê do Rio Timbó e Bacias Contíguas	-Indústrias moveleiras; -Bovinocultura; -Avicultura; -Monocultivos florestais de espécies exóticas; -Produção agrícola de milho e soja.	- Poluição difusa no meio rural (DBO, Nutrientes); - Poluição pontual nas cidades (DBO); -É uma das regiões hidrográficas com a maior cobertura vegetal nativa (cerca de 20% da sua área total), porém, sendo também uma das regiões hidrográficas com o menor número de áreas protegidas, com somente uma unidade de conservação.
RH 6 - Baixada Norte	-Comitê do Rio Itapocu e Bacias	-Indústria eletro-metal-mecânica;	- Poluição difusa no meio rural (DBO, Nutrientes);

Região hidrográfica	Comitês de bacia hidrográfica	Atividades econômicas predominantes	Principais impactos ambientais
	Contíguas -Comitê das Bacias Hidrográficas do Complexo Hidrológico da Baía da Babitonga e Bacias Contíguas (Comitê Babitonga)	-Construção civil; -Avicultura; -Bovinocultura; -Produção agrícola de arroz.	- Poluição pontual nas cidades (DBO); - Poluição pontual indústrias (DQO); - Inundações frequentes; -Apresenta 34% da sua área total com cobertura vegetal nativa (com Florestas Ciliares e Bosques de Pinheiros, Campos com Capões, Floresta Nebular, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Ombrófila Densa e Vegetação Litorânea) e é a 3ª região hidrográfica em número de unidades de conservação identificadas, contando com seis no total.
RH7 - Vale do Itajaí	-Comitê do Rio Itajaí -Comitê do Rio Camboriú e Bacias Contíguas	-Indústrias têxteis e de vestuário; -Indústrias metal-mecânicas; -Indústrias de papel e celulose; -Fecularias; -Indústrias de extração de óleo vegetal; -Construção civil; -Avicultura; -Bovinocultura. -Produção de milho, fumo, soja e arroz;	- Poluição difusa no meio rural (DBO, Sedimentos); - Poluição pontual nas cidades (DBO); - Inundações frequentes; - Conflito de usos (localizados); -É a região hidrográfica com maior cobertura vegetal nativa (cerca de 40,6% de sua área total) e também com o maior número de UC identificadas em sua área de abrangência, dez no total.
RH8 - Litoral Centro	-Comitê do Rio Tijucas, Rio Biguaçu e Bacias Contíguas -Comitê do Rio Cubatão, Rio da Madre e Bacias Contíguas	-Indústrias de calçados; -Indústrias de cerâmicos; -Indústrias de plásticos; -Produção de hortaliças, arroz e banana; -Avicultura; -Bovinocultura.	- Poluição difusa no meio rural (DBO); - Poluição pontual nas cidades (DBO); - Inundações frequentes; - Conflito de usos (localizados); -Uma das regiões hidrográficas com menor cobertura vegetal nativa (cerca de 10% da Floresta Ombrófila Densa), porém, possui sete unidades de conservação, tornando-a a 2ª região hidrográfica em maior número.
RH9 - Sul Catarinense	-Comitê do Rio Tubarão e Complexo Lagunar	-Indústrias carboníferas; -Indústrias de materiais plásticos; -Produção agrícola de arroz e fumo; -Avicultura; -Suinocultura.	- Poluição difusa no meio rural (DBO, Nutrientes); - Poluição pontual nas cidades (DBO); - Inundações frequentes; - Conflito de usos (localizados); -Possui 34% de sua área total constituída de remanescentes de vegetação nativa (Floresta Ombrófila Densa) e conta com cinco unidades de conservação.
RH10 - Extremo Sul Catarinense	-Comitê do Rio Urussanga -Comitê do Rio Araranguá e Afluentes do Mampituba	-Indústrias carboníferas; -Indústrias de revestimentos cerâmicos; -Indústrias de calçados; -Indústrias de materiais plásticos; -Produção agrícola de arroz irrigado e banana; -Avicultura; -Bovinocultura.	- Conflito de usos (irrigação X outros usos); - Poluição difusa no meio rural (DBO, Nutrientes); - Poluição pontual nas cidades (DBO); - Poluição química em áreas de mineração (pH e DQO). -Os remanescentes de vegetação nativa estão em 22% de sua área total e apresenta cinco unidades de conservação.

Fonte: Santa Catarina (2017); Antunes e Constante (2016); Goulart Filho (2007).

O diagnóstico do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) de Santa Catarina (SANTA CATARINA, 2017), deixa claro que é necessária uma atividade intensa e urgente de gerenciamento nas bacias hidrográficas de todo o estado de Santa Catarina, acompanhada de grandes investimentos. Esse estudo expôs que a maioria das bacias hidrográficas do estado encontram-se em situação “insustentável” ou “muito crítica” (Figura 6) para a razão entre a demanda total de água e a oferta hídrica. De maneira similar, condicionada a essas mesmas situações, a variável de vazão de diluição de efluentes, do balanço qualitativo, demonstrando a incapacidade dos cursos d’água realizarem a autodepuração das cargas orgânicas lançadas, tanto no campo quanto nas cidades. Atribuem-se como fatores desse contexto de risco: a infraestrutura insuficiente para o saneamento associado à pecuária; o turismo sazonal de verão nas bacias hidrográficas da Vertente Litorânea; a elevada densidade populacional das cidades; e o alto consumo de águas para as indústrias e para a irrigação das lavouras de arroz.

Figura 6 – Mapa do balanço hídrico quali-quantitativo das bacias e regiões hidrográficas do estado de Santa Catarina.



Fonte: Adaptado de Santa Catarina (2017, p. 38).

Os dados do balanço hídrico quali-quantitativo, quando consideradas as regiões hidrográficas do estado, também não são diferentes (Tabela 1); onde é incluída a vazão

necessária para a diluição de cargas orgânicas no balanço qualitativo, os dados revelam que 8, das 10 regiões hidrográficas, estão em situação enquadrada como insustentável, a pior possível. Em relação ao balanço hídrico quantitativo (relação entre a vazão de retirada e a vazão mínima de referência Q98), apenas 3 regiões hidrográficas têm uma situação confortável, enquanto as demais estão em situação preocupante (RH1 e RH3), crítica (RH6 a RH9) e insustentável (RH10), para os períodos de menor disponibilidade hídrica superficial, justamente pelo uso da água em setores de irrigação (48% da vazão total retirada), industrial (23% da vazão total retirada) e abastecimento humano urbano (17%). Nas regiões hidrográficas da Vertente do Interior, o predomínio do consumo de água é para a pecuária na área da Bacia do Rio Uruguai e industrial na Bacia do Paraná. Na Vertente do Litoral, a irrigação e o abastecimento urbano flutuante são os usos predominantes na retirada de água das bacias hidrográficas (SANTA CATARINA, 2017).

Tabela 1 – Balanço hídrico, quantitativo, qualitativo e quali-quantitativo das regiões hidrográficas do estado de Santa Catarina.

Região Hidrográfica	Balanço Quantitativo (Retirada/Q98)	Balanço Qualitativo (Subsidio/Q98)	Balanço Quali-quantitativo	
RH1	17,30%	263,80%	281,10%	<p>Faixas de classificação do balanço hídrico quali-quantitativo superficial:</p> <ul style="list-style-type: none"> 5 a 10% - Confortável: Pode ocorrer necessidade de gerenciamento para solução de problemas locais de abastecimento. 10 a 20% - Preocupante: A atividade de gerenciamento é indispensável, exigindo a realização de investimentos médios. 20 a 40% - Crítico: Exige intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos. 40 a 100% - Muito crítico: Exige intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos. >100% - Insustentável: Exige intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos urgentes.
RH2	9,10%	200,00%	209,10%	
RH3	15,00%	41,00%	56,10%	
RH4	5,30%	173,50%	178,80%	
RH5	7,40%	51,50%	58,90%	
RH6	34,40%	100,80%	135,20%	
RH7	28,00%	205,80%	233,80%	
RH8	23,40%	242,30%	265,70%	
RH9	20,30%	205,10%	225,40%	
RH10	161,50%	377,50%	539,00%	

Fonte: Adaptado de Santa Catarina (2017, p. 37).

É também crescente o número de poços nos últimos anos cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS, ou ao menos regularizados. Segundo Silva e Kirchheim (2011), havia 3.419 poços registrados no diagnóstico do Plano Estadual de Recursos Hídricos, contra 7.165, em 2011, e, mais de uma década depois, conforme a CPRM (2023) 8.259 poços até maio/2023. Em razão da clandestinidade de poços tubulares, Silva e Kirchheim (2011) estimam que haja 10 vezes mais locais de extração de águas do que os registros existentes no SIAGAS.

A limitação do escoamento de base no estado de Santa Catarina é também uma questão de discussão urbano-regional. Conforme o Atlas Águas — Segurança Hídrica do Abastecimento Urbano (ANA, 2021b), 95% da população urbana de Santa Catarina (ou 145

das sedes urbanas, quase metade, somadas a 66 sedes com o uso preponderante de águas superficiais), é atendida pela captação a partir de mananciais superficiais, como os rios Uruguai, Iguaçu, Itajaí-Açu, Negro, Tubarão e do Peixe. Embora grande parte dessas cidades utilizem o escoamento de base da própria bacia hidrográfica, o crescimento urbano nas últimas décadas acarretou sua insuficiência, principalmente nas cidades onde a densidade demográfica e a concentração de indústrias e de serviços é elevada, sendo estabelecida como solução a captação do escoamento de base de bacias hidrográficas vizinhas. Atualmente, a transposição de águas entre bacias hidrográficas ocorre por 21 sistemas integrados de abastecimento, como, por exemplo, o da Região Metropolitana de Florianópolis (Sistema Biguaçu-Florianópolis-Palhoça-Santo Amaro da Imperatriz-São José). No que diz respeito ao abastecimento exclusivo ou preponderantemente por aquíferos, 84 sedes urbanas (5% do total) são atendidas por poços tubulares, representando, apesar da participação na sua proporção em nível de estado, uma quantidade expressiva de cidades que apresentam limitações no acesso às águas superficiais (ANA, 2021b).

Conforme o PERH de Santa Catarina, as zonas aquíferas são quase coincidentes com a regionalização do sistema de drenagem do estado. Nas regiões hidrográficas da Vertente do Interior (Figura 7), como na RH1 (Extremo Oeste), RH2 (Meio Oeste), RH3 (Vale do Rio do Peixe) e RH4 (Planalto de Lages), são encontradas maiores vazões prováveis em relação aos poços do que nas regiões hidrográficas da Vertente do Litoral (SANTA CATARINA, 2017). Na Vertente do Interior, as regiões hidrográficas RH1 (Extremo Oeste), RH2 (Meio Oeste) e RH3 (Vale do Rio do Peixe) seriam aquelas em que deveria haver maior contribuição do fluxo de base aos rios, ao apresentarem os maiores valores médios de vazão provável dentre os poços representativos do PERH. Entretanto, o que se verifica a despeito da Q98, uma das vazões mínimas de referência mais restritivas na escala temporal, é que, com exceção da RH2 (Meio Oeste), da RH4 (Planalto de Lages) e da RH5 (Planalto de Canoinhas), a RH1 (Extremo Oeste) e a RH3 (Vale do Rio do Peixe) apresentam algumas das menores vazões do estado de Santa Catarina durante os períodos de recessão de chuvas. Já quando é considerada a vazão Q7,10, a RH2 (Meio Oeste) soma-se à RH1 (Extremo Oeste) e a RH3 (Vale do Rio do Peixe) e situa-se em uma classificação um pouco melhor, porém modesta. Ou seja, apesar dessas duas regiões apresentarem elevada produtividade de poços nos aquíferos, não há uma correspondência de comportamento na resposta hidrológica nas bacias hidrográficas, visto que, em princípio, deveriam apresentar também maior permanência das vazões mínimas durante os períodos secos.

predomínio, em área, da baixa produtividade de poços, esperar-se-iam menores vazões para as bacias hidrográficas durante os períodos secos. No entanto, observa-se na Figura 7 que, com exceção da RH6 (Baixada Norte) e da RH10 (Extremo Sul), as regiões RH7 (Vale do Itajaí), RH8 (Litoral Centro) e RH9 (Sul Catarinense) apresentam os maiores valores de vazão Q98 e Q7,10 da Vertente do Litoral. Nesse caso, em linhas gerais, as vazões dos aquíferos da RH6 e da RH10 parecem manter por menos tempo o escoamento de base disponível na Vertente do Litoral durante os períodos de menor oferta hídrica. O PERH atribui a demanda de retirada do manejo no cultivo de arroz irrigado como causa para os baixos valores de disponibilidade hídrica superficial na RH10. Na RH6, a retirada de água é associada à irrigação, à aquicultura e ao uso industrial.

Nesse contexto, um desafio imposto aos órgãos gestores de águas, inclusive aos comitês de bacias hidrográficas, é se conseguirão interferir nas cadeias produtivas de Santa Catarina, como a suinocultura, a produção de papel e celulose e a rizicultura. Juntas, essas cadeias produtivas têm importante papel nos ganhos econômicos do estado, à medida que também são as principais responsáveis pelo comprometimento das águas nas bacias hidrográficas (ULLER-GÓMEZ e COMASSETTO, 2011). É necessário lembrar que a “crise hídrica” não é apenas da água, mas também do sistema urbano-industrial-agrário, pois todos os processos implicam no uso da água. A problemática da água envolve soluções que requerem modificações nos sistemas agrícolas, nos sistemas industriais e no jogo das escalas geográficas de influências geopolíticas, como o mercado mundial dos agronegócios, tais como a de carne suína e de frango (PORTO-GONÇALVES, 2011).

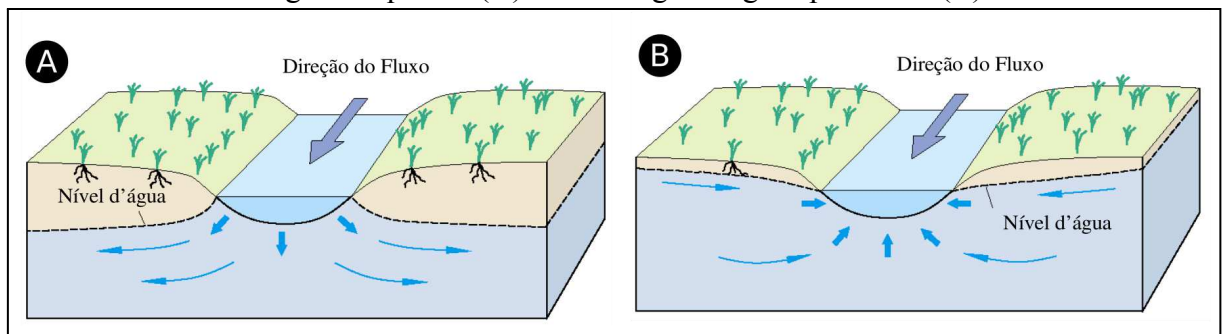
2.2 INTERAÇÃO AQUÍFERO-RIO

A hidrosfera é o reservatório de águas que, no contexto dos geossistemas terrestres e do ciclo hidrológico, armazena e escoam o volume de águas resultante da diferença entre os processos de precipitação e evapotranspiração (HIRATA, 2000). Dentro disso, as interações de águas subterrâneas e superficiais estão situadas como um estágio do ciclo hidrológico em que há trocas entre os fluxos da hidrosfera com o meio subterrâneo (CHEREPANSKY, VSEVOLOZHISKY e ZEKTSER, 2009).

As interações entre águas subterrâneas e superficiais ocorrem quando os fluxos dos aquíferos tornam-se hidráulicamente conectados aos corpos hídricos superficiais, podendo ser com rios, lagos, áreas úmidas ou com os oceanos. As interações podem ocorrer dos corpos

hídricos superficiais para o aquífero (Figura 8), quando o sistema é denominado de perda de águas, em que há a recarga do aquífero. Por sua vez, quando as interações são do aquífero para os corpos hídricos superficiais, a condição é chamada de ganho, na qual o lençol freático está em um nível acima do leito do curso d'água, momento em que ocorre a descarga de águas subterrâneas. Em alguns ambientes, ao longo de um curso d'água, as duas situações podem ocorrer simultaneamente, indicando três tipos básicos de ocorrência na interação dos aquíferos com os rios. A recarga de aquíferos pelos rios, ou a descarga de águas dos aquíferos em cursos d'água, pode ser dominante em determinadas bacias hidrográficas e ocorrer constantemente em um sentido único de interação de águas (WINTER *et al.*, 1998). Dessa forma, as interações podem ser compreendidas e avaliadas tanto pela recarga quanto pela descarga subterrânea (IDOWU, 2007).

Figura 8 – Os dois tipos principais de interação entre aquíferos e corpos d'água superficiais: recarga do aquífero (A) ou descarga de águas para o rio (B).



Fonte: Adaptado de Winter *et al.* (1998, p. 9).

Em ambientes áridos e semiáridos, a interação de águas subterrâneas e superficiais costuma ser analisada pela recarga de águas provenientes dos rios. Já nas bacias hidrográficas de climas mais úmidos, supridas pelas águas subterrâneas, os dados de vazão dos rios representam a principal fonte do comportamento da bacia hidrográfica e da descarga de águas (WRIGHT, 1980; LERNER, 2003). No presente trabalho, abordar-se-á apenas o tipo de interação de águas em que se tem a descarga dos aquíferos para as bacias hidrográficas, aqui denominada de interação aquífero-rio. Conforme Idowu (2007) a interação aquífero-rio se refere ao afloramento de águas em superfície, principalmente conhecido pela descarga dos fluxos de base em nascentes, ao longo de cursos d'água, mas que também ocorre na forma de pântanos, lagos, pela evapotranspiração de plantas profundamente enraizadas e pelo bombeamento de poços.

Durante muito tempo, as águas subterrâneas e superficiais foram investigadas de maneira individualizada (KALBUS, REINSTORF e SCHIRMER, 2006) e isso se deve, em parte, à dificuldade de compreensão dos fluxos subterrâneos regionais, o que só foi possível a partir das décadas de 1960 e 1970, tornando tardio o reconhecimento dos fenômenos de estudo à hidráulica regional de águas subterrâneas (TÓTH, 1999). Assim, além de serem necessárias na gestão de águas, as interações entre aquíferos e bacias hidrográficas requerem uma compreensão unificada do meio subterrâneo com o meio superficial, assim como dos processos de influências naturais e antropogênicas (WINTER *et al.*, 1998). Essa compreensão leva à lógica do gerenciamento integrado, onde o impacto de um meio acarretará uma ou mais respostas hidrológicas no outro (COSTA e BACELLAR, 2010).

2.2.1 As águas subterrâneas e superficiais no balanço hídrico

O conhecimento sobre a disponibilidade de águas em bacias hidrográficas parte do monitoramento do ciclo hidrológico a partir do balanço hídrico. O balanço hídrico é uma equação que expressa a diferença de armazenamento entre a quantidade de água que entra e a quantidade que sai, por exemplo, de uma bacia hidrográfica, de um aquífero ou mesmo de outro reservatório. Ao mesmo tempo, é uma abordagem universal pelo fato de poder ser aplicada em diferentes escalas espaciais, desde uma coluna de solo analisada em laboratório até investigações continentais, e também em diferentes escalas temporais, como um período de anos, décadas ou até séculos. O balanço hídrico, nas diferentes equações em que é representado, pode ser tratado com volume de água (para um período fixo), em fluxos (volume por tempo, como, por exemplo, m³/dia) ou densidades de fluxo (volume por unidade de área para um determinado tempo, como, por exemplo, em mm/dia) (HEALY *et al.*, 2007).

Para representar matematicamente os processos hidrológicos, a equação do balanço hídrico tem por premissa ser um sistema do tipo fechado (DAVIE, 2008). Com base no modelo de conservação da massa, toda entrada de águas em uma bacia hidrográfica (I) deve ser compensada com as saídas (O) e mudanças no armazenamento dessa mesma bacia hidrográfica (ΔS), resultando em $I - O = \Delta S$. O armazenamento deve aumentar caso as entradas excedam as saídas. Por outro lado, se as saídas excederem as entradas, então o armazenamento será reduzido (BROOKS, FFOLIOTT e MAGNER, 2013).

Há diferentes modos de apresentar a equação do balanço hídrico, sendo a mais fundamental delas a Equação 1. Nela, o símbolo \pm indica que cada componente pode ser

positiva ou negativa no balanço hídrico. Considera-se, geralmente, que as componentes de entrada são positivas quando representam acréscimo ao armazenamento, e que as componentes de saída, em função da perda do sistema, são negativas. A precipitação (P) é a principal componente de entrada, podendo ser chuva ou neve. A evaporação (E ou ET) abrange os fluxos gasosos de corpos hídricos, como rios e lagos, da superfície do solo e a evapotranspiração. A vazão (Q) é o fluxo líquido acima e abaixo da superfície terrestre. No caso do armazenamento (ΔS), quando a água é liberada como descarga aos rios, diz-se que o armazenamento é negativo e, quando há a sua absorção por recarga subterrânea, nos períodos com chuva, tem-se o armazenamento positivo (DAVIE, 2008).

$$P \pm E \pm \Delta S \pm Q = 0 \quad (1)$$

Em um intervalo de tempo com escala anual, as diferenças positivas e negativas tornam-se nulas. Assim, é possível simplificar o balanço hídrico na Equação 2, de forma que a evaporação (E ou ET) e a vazão (Q) deverão equivaler à precipitação (P) que entrou no sistema (KARMANN, 2009).

$$P = E + Q \quad (2)$$

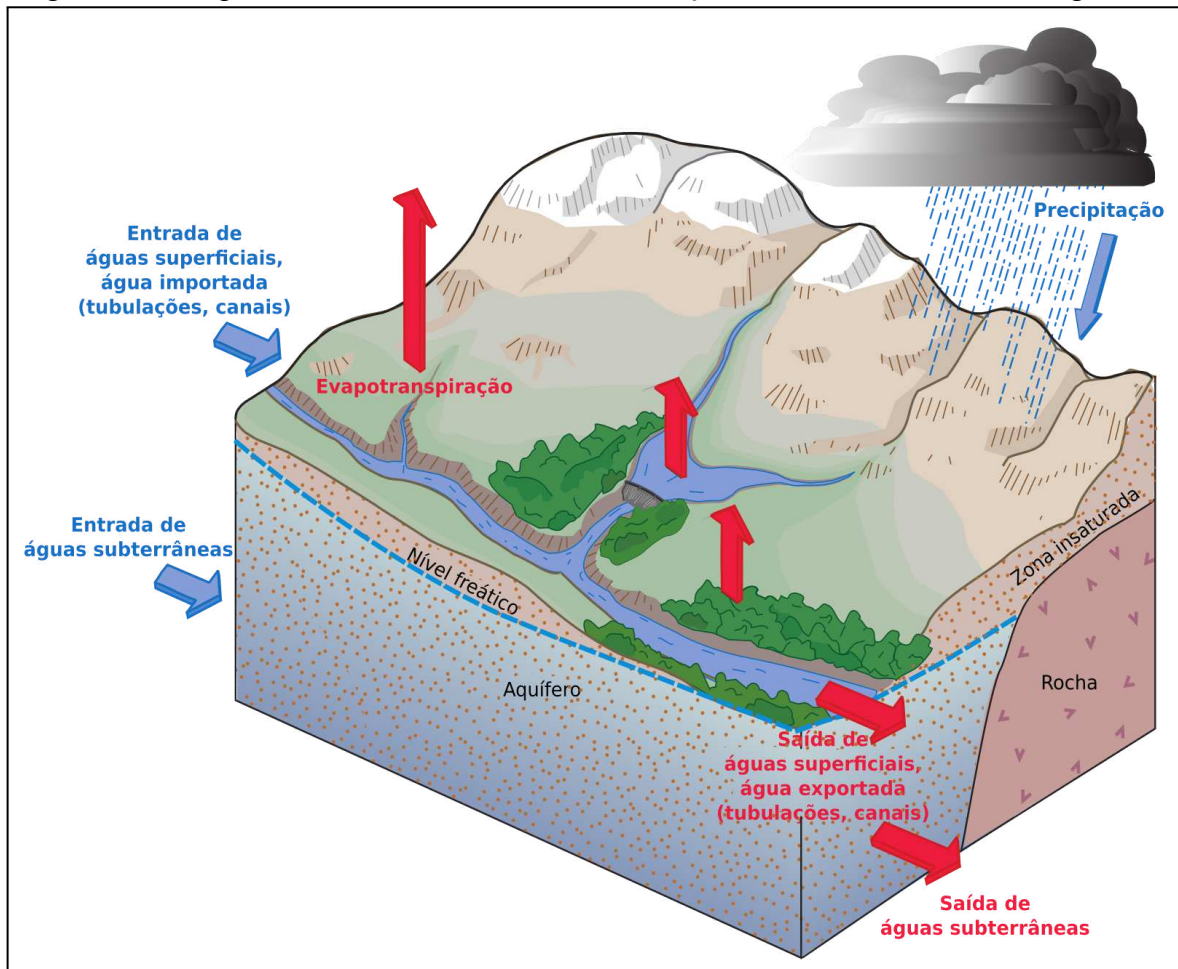
O balanço hídrico é também a maneira básica de situar a circulação de águas subterrâneas no ciclo hidrológico, ao contabilizar as suas componentes de entrada, ou de recarga de águas, e as componentes de saída, ou de descarga de águas (LACZNIAK *et al.*, 2007). Quando os divisores de águas superficiais e subterrâneas não coincidem, tem-se a inclusão da componente de entrada de um fluxo de água subterrâneo para a bacia hidrográfica (GW_i) e de uma componente de saída do fluxo de água subterrâneas que não contribui para o escoamento superficial da bacia hidrográfica (GW_o) (Equação 3) (BROOKS, FFOLLIOTT e MAGNER, 2013).

$$P + GW_i - Q - ET - GW_o = \Delta S \quad (3)$$

Na equação de balanço hídrico, o fluxo subterrâneo é apenas considerado quando contribui para o escoamento da bacia hidrográfica. Além disso, fluxos subterrâneos profundos, que não têm contato com a superfície, não são contabilizados (BROOKS, FFOLLIOTT e MAGNER, 2013). O funcionamento da Equação 3 está representado na Figura

9, a qual também apresenta como componente de entrada as águas transpostas de outras bacias hidrográficas, com canais e dutos, por exemplo.

Figura 9 – Componentes de entrada e saída do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.



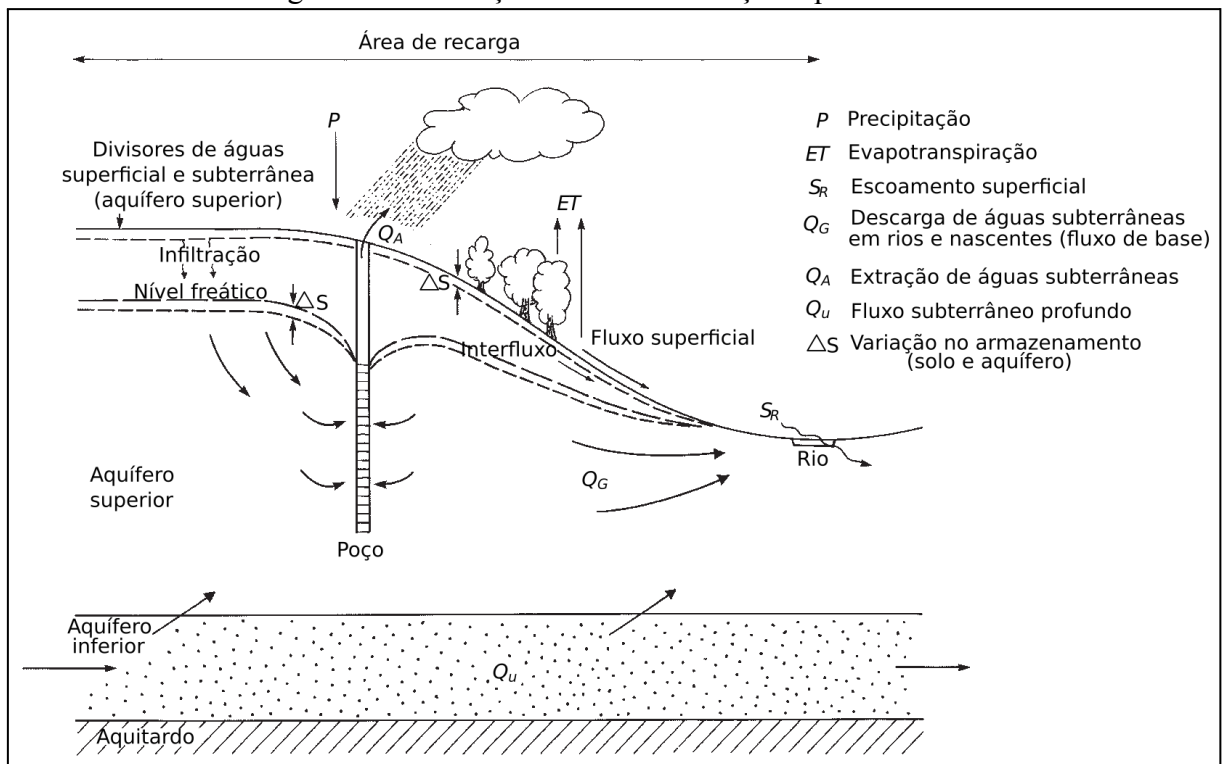
Fonte: Adaptado de Healy *et al.* (2007, p. 03).

Conforme Hiscock e Bense (2014), quando os divisores de águas superficiais e subterrâneas coincidem, o balanço hídrico comporta-se como na Equação 4. A diferença entre a precipitação (P) e a evapotranspiração (E ou ET), também chamada de precipitação efetiva, equivale ao escoamento superficial da bacia hidrográfica (S_R), à descarga de águas subterrâneas na forma de fluxo de base (Q_G) e à captação dessas mesmas águas subterrâneas por poços (Q_A). De acordo com Winter *et al.* (1998), a evapotranspiração das águas subterrâneas pela vegetação também é uma das componentes que pode ser acrescentada como de saída do sistema de águas subterrâneas na equação balanço hídrico.

$$P - E = S_R + Q_G + Q_A \quad (4)$$

Um aumento da extração de águas poderia impactar negativamente o escoamento de base (S_R) e gerar um conflito ambiental a partir da maior demanda socioeconômica (Q_A). Somados, o fluxo de base (Q_G), a extração de águas subterrâneas (Q_A) e o fluxo subterrâneo profundo (Q_U) constituem a descarga de águas subterrâneas (HISCOCK e BENSE, 2014). A Equação 4 está representada em um perfil de um curso d'água da Figura 10.

Figura 10 – Balanço hídrico da interação aquífero-rio.



Fonte: Adaptado de Hiscock e Bense (2014, p. 212).

2.2.2 O escoamento de base na manutenção do regime perene das bacias hidrográficas

As pesquisas com interesse no escoamento de base como campo de estudo acompanharam o próprio desenvolvimento da hidrologia e da hidrogeologia, havendo como divisor de conhecimento as mudanças proporcionadas no âmbito do surgimento da ciência moderna. Até o século XIX, o conhecimento sobre as águas subterrâneas era baseado na observação e raciocínio sobre a relação entre as águas das chuvas, dos rios, das nascentes e dos poços d'água, especialmente pelos filósofos, que constituíam o perfil majoritário desses investigadores (FETTER JUNIOR, 2004a). A aplicação do método científico, por

hidrogeólogos e engenheiros, implicou na transformação da hidrologia subterrânea, hoje conhecida como hidrogeologia, em uma ciência quantitativa (FETTER JUNIOR, 2004b).

Dois eventos históricos de influência nos estudos de águas subterrâneas foram as revoluções industriais do século XIX. Ao passo que as cidades eram organizadas em torno das áreas de produção industrial, a demanda por recursos, como a água, tornava-se maior. Normalmente, pela pouca disponibilidade hídrica, de quantidade e/ou em função de contaminações das águas superficiais, a perfuração de poços era a solução para o abastecimento. Junto ao processo produtivo industrial que ocorria na Europa e nos EUA, a criação da máquina a vapor e a extração de combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo, permitiram conhecer a ocorrência de águas cada vez mais profundas (MANZIONE, 2015).

Apesar de ser um campo de pesquisa recente no Brasil, sobretudo na última década, os primeiros estudos sobre o escoamento de base no mundo remetem a esse período. Na França, o pioneirismo estava relacionado à preocupação em torno do abastecimento das cidades durante os períodos de estiagem e seca, contexto que pode ter guiado pesquisas nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha. Uma dessas primeiras investigações foi a de Dausse (1842), com o seu trabalho *De la pluie et de l'influence des forêts sur les cours d'eau* (traduzido aqui como “Chuva e influência de florestas nos cursos d’água”), que discutia os impactos do desflorestamento no suprimento das vazões dos rios. Essa compreensão inicial da associação entre o conhecimento das águas subterrâneas e o suprimento dos rios proporcionou a proteção de “fontes” naquela época, ou, em outras palavras, das áreas de descarga subterrânea (HALL, 1968).

Nesse contexto, a frequente perfuração de poços na primeira metade do século XIX, na França, propiciou a elaboração de estudos quantitativos em torno da circulação das águas subterrâneas (TODD e MAYS, 2005). O engenheiro hidráulico Henry Darcy, em 1856, publicou o livro *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, no qual estabeleceu a equação, conhecida como Lei de Darcy, que expressa a circulação de águas subterrâneas com base em experimentos com filtros de areia. Essa foi a primeira teoria científica de fluxo subterrâneo da hidrogeologia, usada até hoje. Os trabalhos posteriores ao de Darcy foram desenvolvidos com base em sua equação (FETTER JUNIOR, 2004b), como os de Dupuit (1863 - *Etudes Théoriques et Pratiques sur le mouvement des Eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*); Boussinesq (1877 - *Essai sur la theorie des eaux courantes: du mouvemont non permanent des eaux souterraines*); e Maillet (1905 - *Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluviale*), compreendendo o rol das primeiras análises da recessão do fluxo de

base por hidrograma (THOMAS *et al.*, 2013; THOMAS, VOGEL e FAMIGLIETTI, 2015). Paralelamente, também passou a haver o interesse pelo fluxo de base na Grã-Bretanha, com a contribuição de Beardmore (1862 - *Manual of Hydrology*) sobre a análise dos cursos d'água supridos por águas subterrâneas durante o verão e de Hall (1918 - *Stream-flow and percolation-water*) sobre a separação do hidrograma. Já nos EUA, Vermeule (1894 - *Diagram Showing Ground Flow of Various Streams for a Given Depletion*) daria origem ao que mais tarde seria chamado de curva de descarga-armazenamento e Horton (1914 - *Discussion of report of committee on yield of drainage-areas*) que passaria a discutir equações de escoamento de base (HALL, 1968). O conhecimento acumulado na hidrogeologia pelo pensamento moderno sobre a circulação de águas subterrâneas, portanto, serviu para fundamentar a vasta publicação em periódicos que se iniciou a partir da década de 1960 (FETTER JUNIOR, 2004b).

A teoria de circulação das águas subterrâneas, ou Lei de Darcy, é expressa pela Equação 5, em que Q é a vazão subterrânea; K é o coeficiente de proporcionalidade, ou condutividade hidráulica; A representa a seção transversal do filtro de areia usado por Darcy; h_1 e h_2 é a carga hidráulica de dois piezômetros; e L é a distância entre os dois pontos com cargas hidráulicas distintas (CABRAL, 2008).

$$Q = K \cdot A \cdot \left(\frac{h_1 - h_2}{L} \right) \quad (5)$$

A Lei de Darcy aponta que a circulação de águas nos aquíferos ocorre pela diferença entre cargas hidráulicas ao longo de uma distância, conceituado como gradiente hidráulico, podendo apresentar ganhos ou perdas ao longo da percolação. O fluxo é gerado quando a água é impulsionada de um local, que dispõe de uma carga hidráulica maior, em direção a outro local, com uma carga hidráulica menor. As diferenças entre cargas hidráulicas entre os dois locais é também o resultado das diferenças da carga de pressão e de carga de elevação (ou seja, a altitude ou cota do ponto). A carga de pressão é nula ou equivalente à pressão atmosférica, em aquíferos livres, e correspondente à altura que o nível de água se elevará a partir do topo da camada, em aquíferos confinados, quando poços são perfurados, por exemplo. Para haver o movimento, a água segue um gradiente hidráulico negativo, ao decrescer ao longo de uma direção (CABRAL, 2008).

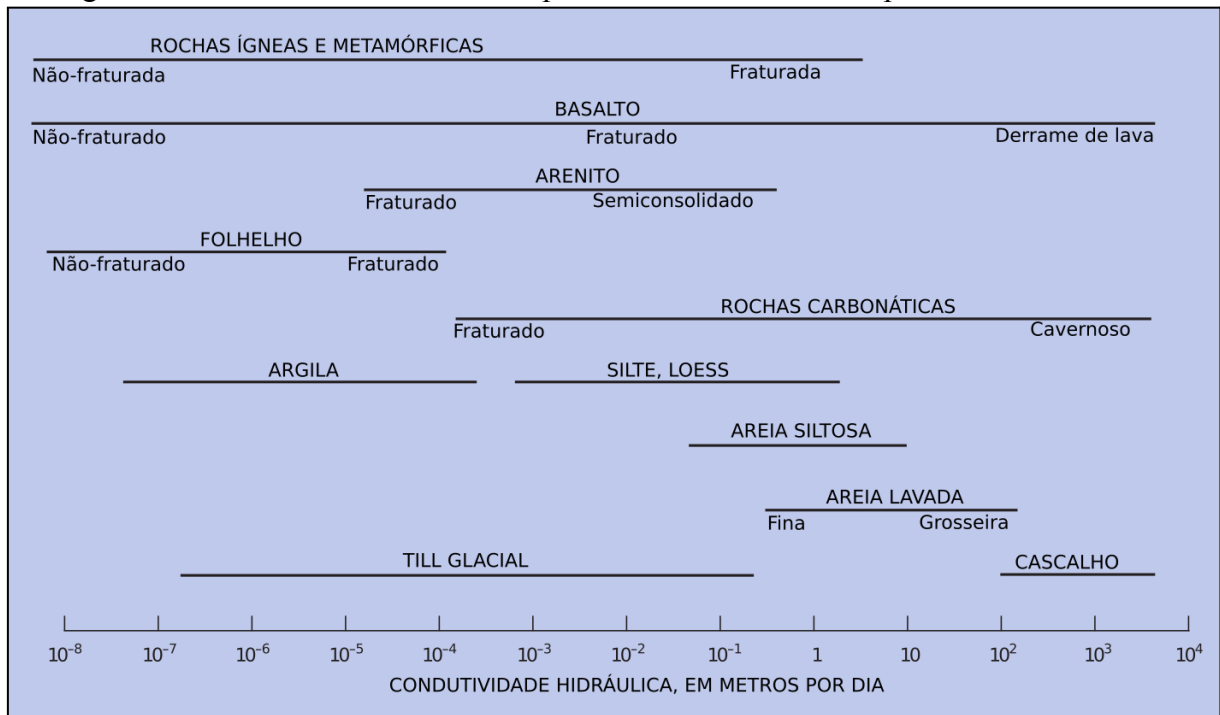
Além do gradiente hidráulico, outro parâmetro da Lei de Darcy é o coeficiente de proporcionalidade, comumente denominado de condutividade hidráulica (K). A condutividade

hidráulica é a capacidade da água de se mover de um poro para outro e depende das condições de transmissão e de retenção das águas pelas rochas (FETTER, 2001). A condutividade hidráulica depende das propriedades do fluido (viscosidade e massa específica), bem como das características do meio. Quanto a estas últimas, cada tipo de material (rocha ou depósito sedimentar) apresenta uma permeabilidade diferente, ou seja, uma capacidade própria de transmitir água durante a circulação subterrânea e, portanto, de velocidade do fluxo, em função da “porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas” (CABRAL, 2008, p. 78).

Os aquíferos realizam a circulação de águas justamente por esses espaços entre as partículas em que não há matéria mineral nas rochas e depósitos inconsolidados. A porosidade é denominada de primária quando os poros formam-se com a rocha, como os depósitos inconsolidados e as rochas sedimentares. As rochas são categorizadas em função da porosidade primária em intergranulares e fraturadas. Na porosidade primária, os poros têm diferentes dimensões, formas, distribuições e irregularidades. Quando os poros formam-se após a consolidação das rochas, por fraturas e juntas, tem-se a porosidade secundária, como acontece com as rochas ígneas e metamórficas, ou por cavidades, como nas rochas cársticas. As rochas sedimentares, além da porosidade primária, podem ter condutos e cavidades geradas pela percolação das águas, enquadrando-as entre as duas classificações (HEATH, 1983; TODD e MAYS, 2005).

Algumas rochas podem apresentar porosidade, mas não conter espaços interconectados, como o basalto vesicular, ou, ainda, ter poros pequenos demais que podem interrompem o fluxo de águas, como a argila e os xistos (FETTER, 2001). Para comparativo, o basalto fraturado, o cascalho grosso e o calcário podem atingir condutividades hidráulicas de até mil metros por dia. Já a argila marinha, o xisto e os depósitos glaciais de *till* têm condutividade hidráulica aproximada de 10^{-6} por dia, por serem materiais menos permeáveis (HEALY *et al.*, 2007). A transmissão de água é equivalente à condutividade hidráulica quando é tratada quantitativamente e como permeabilidade quando é descrito o seu caráter qualitativo (HEATH, 1983). A condutividade hidráulica varia entre diferentes tipos de rochas e mesmo em um mesmo tipo de litologia, como observado na Figura 11.

Figura 11 – Condutividade hidráulica para diferentes rochas e depósitos sedimentares.



Fonte: Adaptado de Heath (1983 apud Healy *et al.*, 2007, p. 34).

Um aquífero é homogêneo quando a condutividade hidráulica é a mesma para uma determinada área e heterogêneo quando uma área apresenta diferentes valores de condutividade hidráulica. Da mesma maneira, a condutividade hidráulica pode seguir uma única direção, caracterizando o aquífero como isotrópico, ou se distribuir em diferentes direções, situação em que o aquífero é denominado de anisotrópico. Geralmente os modelos de águas subterrâneas admitem os aquíferos como homogêneos e isotrópicos, apesar de serem pouco comuns. O sistema de águas subterrâneas, que compreende os aquíferos e as suas camadas confinantes, funciona como um reservatório ao realizar o armazenamento das águas, conforme a sua porosidade, assim como condutor, ao transmiti-las das áreas de recarga para as áreas de descarga, variando conforme a condutividade hidráulica e o gradiente hidráulico (HEATH, 1983).

Dessa forma, a geologia controla a distribuição do armazenamento, as taxas de circulação e os padrões de fluxos da circulação das águas subterrâneas (TÓTH, 1999). É, portanto, um importante fator para explicar a contribuição dos aquíferos às diferentes bacias hidrográficas, mensurado pelo Índice do Fluxo de Base (BFI), que varia entre zero e um (MWAKALILA, FEYEN e WYSEURE, 2002). A geologia, e a sua interface com o relevo, exercem o controle direto sobre os fluxos de águas (TAGUE e GRANT, 2004). Dessa forma, os aquíferos que armazenam mais águas têm condições de manter o regime perene dos rios

(REBOUÇAS, 2002b). No Quadro 6 são apresentados valores de transmissividade, armazenamento e Índice do Fluxo de Base (*Base Flow Index* – BFI) para diferentes aquíferos.

Quadro 6 – Valores típicos de transmissividade (T), armazenamento (S) e Índice do Fluxo de Base (*Base Flow Index* – BFI) conforme os tipos de rochas em bacias hidrográficas perenes.

Litologia do aquífero		T	S	Variação típica do BFI
Aquíferos sedimentares inconsolidados (permeabilidade quase intergranular)	Cascalho (bem selecionado)	Muito alto	Muito alto	0.95 - 1.00
	Areia (bem selecionada)	Moderado	Muito alto	0.85 - 0.95
	Areias e cascalhos (mal selecionados)	Moderado	Moderado	0.60 - 0.80
	Silte ou argila	Baixo/Muito baixo	Baixo/Muito baixo	0.15 - 0.45
Aquíferos apenas com permeabilidade em fraturas	Rochas cársticas (calcário/gesso)	Muito alto	Baixo	0.75 - 1.00
	Calcários com porosidade intergranular drenável insignificante; não intensamente carstificado	Alto a moderado	Baixo	0.80 - 0.98
	Basalto contendo tubos de lava não preenchidos e juntas abertas	Alto	Baixo	0.60 - 0.90
	Rochas vulcânicas não-basálticas e vulcânicas basálticas cimentadas	Moderado a baixo	Baixo	0.40 - 0.70
	Arenitos/ calcários/ rochas vulcânicas intensamente cimentadas	Baixo	Baixo	0.30 - 0.55
	Argilitos e siltitos	Muito baixo	Baixo	0.15 - 0.40
	Rochas plutônicas e metamórficas	Muito baixo	Muito baixo	0.30 - 0.50
Aquíferos com permeabilidade intergranular e fraturada	Arenitos com grãos grosseiros (poros não obstruídos por cimentos)	Moderado	Moderado a alto	0.70 - 0.80
	Calcários oolíticos (não carstificados) e outros calcários com porosidade primária grande	Moderado a alto	Moderado	0.85 - 0.95

Fonte: Institute of Hydrology (1980 apud Younger, 2007, p. 123).

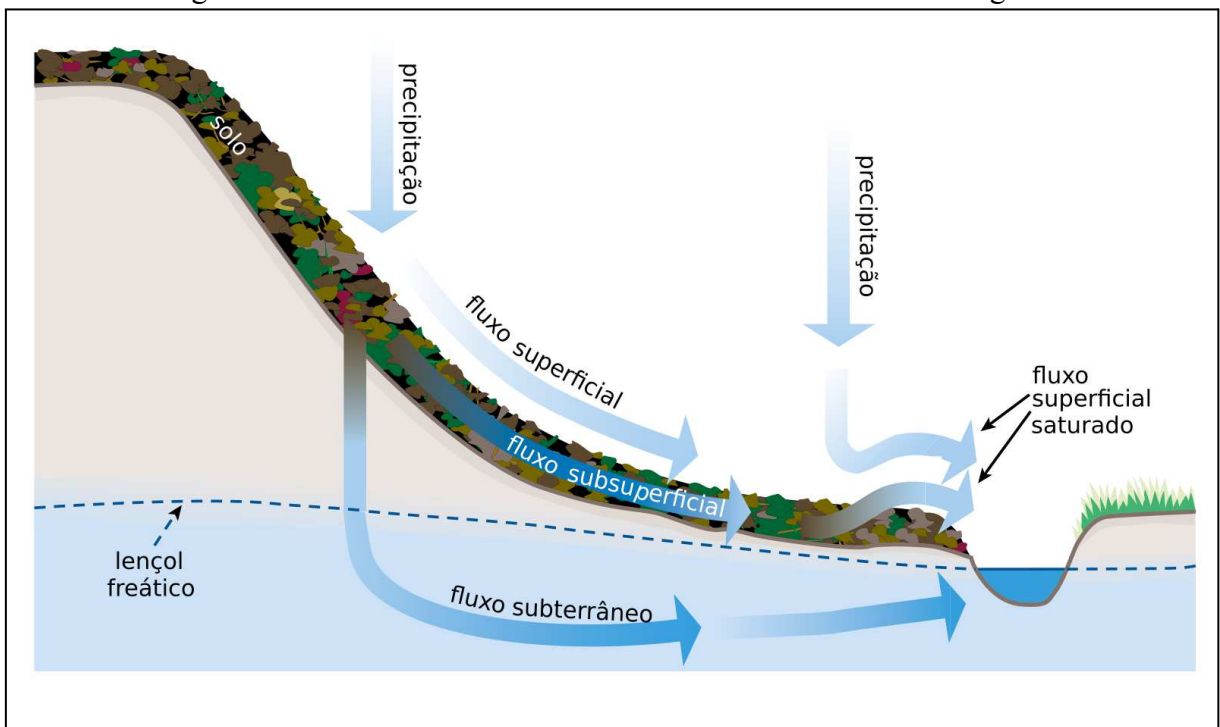
As litologias de uma bacia hidrográfica, de certa forma, podem influenciar o manto de intemperismo, a profundidade dos solos, o tipo de vegetação e mesmo a configuração do uso e cobertura da terra. Todos esses fatores também interferem na recarga subterrânea e, portanto, afetam o fluxo de base. Assim, a litologia pode ser o primeiro fator, de um conjunto, a se considerar na avaliação do escoamento de base (BLOOMFIELD, ALLEN e GRIFFITHS,

2009). Conforme a Lei de Darcy, ainda é preciso considerar que a forma como o escoamento de base flui é diferenciado entre áreas montanhosas e áreas de relevo plano.

Para haver a descarga de águas subterrâneas, é necessário que o nível do lençol freático seja maior que a altitude do corpo d'água receptor, como um rio. Essa conectividade entre aquíferos e rios é caracterizada como de ganho. No entanto, nas situações de perda de água para o aquífero, a massa de água superficial deve estar com cota altimétrica maior do que a do lençol freático (IDOWU, 2007). Isso ocorre em função da circulação de áreas de alto potencial de gradiente hidráulico para áreas de baixo potencial, conforme a forma de relevo (KARMANN, 2009).

Particularmente na conectividade de ganho (Figura 12), como nos interflúvios das áreas montanhosas (ou de vales), o fluxo de águas segue diferentes caminhos após a precipitação em chuvas ou neve. Na ocorrência de precipitação, parte da água infiltra-se nos solos e flui subsuperficialmente até os cursos d'água. Na porção inferior das encostas, o lençol freático tende a subir, favorecendo o escoamento superficial por saturação (WINTER *et al.*, 1998).

Figura 12 – Fluxos constituintes do escoamento de um curso d'água.

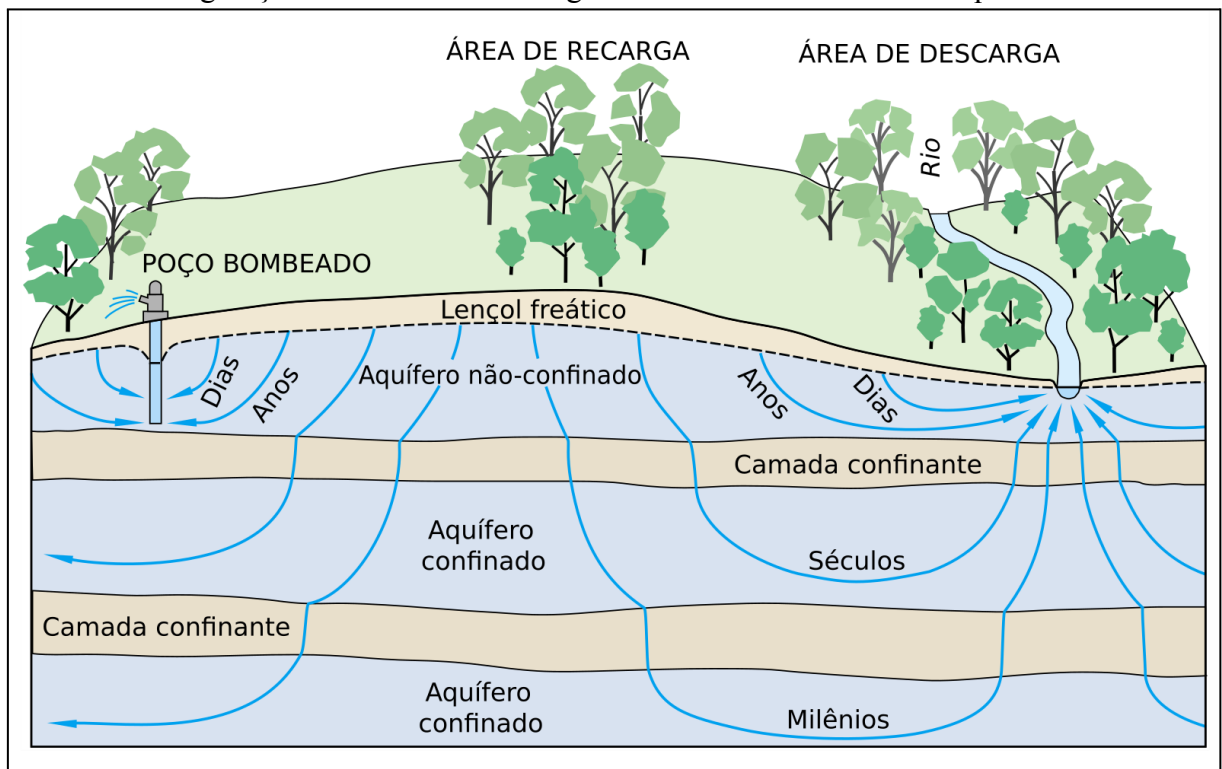


Fonte: Adaptado de FISRWG (1998, p. 94).

Como parte do ciclo hidrológico, as águas subterrâneas fluem desde uma zona de recarga, onde ocorre a infiltração das precipitações, até uma zona de descarga de águas,

formada por corpos hídricos superficiais, a exemplo de rios, lagos, áreas úmidas e os oceanos (HIRATA *et al.*, 2019). Existe um consenso de que o fluxo de base é proveniente, principalmente, das águas subterrâneas. Para tornar-se fluxo de base, é necessário que essa água se mova em direção à zona saturada, sob o lençol freático, a uma velocidade lenta (Figura 13), que pode durar desde alguns dias até milênios. Um lago ou um rio são as formas mais comuns do lençol freático interceptar a superfície, constituindo a descarga de águas dos aquíferos. Nem sempre o afloramento do fluxo de base é visível, como acontece com as nascentes e os cursos d'água (DAVIE, 2008). Além de ser condicionado pelas características hidrogeológicas dos aquíferos, o fluxo de base pode ser controlado por outras fontes de água, como por lagos e áreas úmidas, que auxiliam na retenção e liberação de águas ao longo de um tempo maior; bem como por processos antropogênicos, a exemplo da regulação artificial do escoamento fluvial e pelo lançamento de efluentes nos aquíferos (PIGGOTT, MOIN e SOUTHAM, 2005).

Figura 13 – Diferentes tempos de residência dos fluxos de águas no subsolo conforme a configuração estrutural e de litologia das camadas dos sistemas aquíferos.



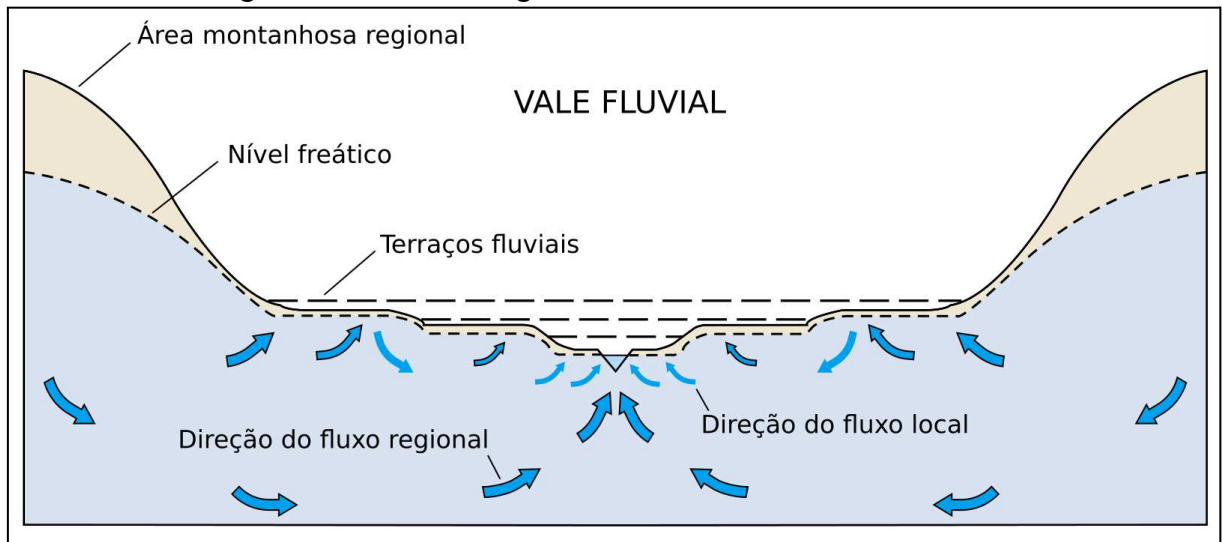
Fonte: Adaptado de Winter *et al.* (1998, p. 5).

Os rios servem como linhas de descarga ou “sumidouros” para a drenagem dos aquíferos, quando estes são cortados pelos cursos d'água. As águas subterrâneas estão

constantemente em circulação e os rios têm o seu papel no transporte delas em direção aos lagos e aos oceanos, onde retornarão à atmosfera por evaporação. Nos períodos secos, o escoamento de base mantém os rios fluindo e assim permanecem enquanto o nível freático estiver acima do leito do rio se o armazenamento nos aquíferos continuar disponível (LEAP, 2016). Assim, em áreas de relevo acidentado, ao passo que as águas disponíveis nos aquíferos diminuem em quantidade, o nível freático é rebaixado no relevo. Isso significa que quanto maior for a drenagem do aquífero pela descarga de águas do aquífero, maior será a redução, em proporção, do escoamento de base registrado em um local de monitoramento. O escoamento de base não aumentará até que ocorra um evento de recarga subterrânea que eleve o nível freático nos aquíferos (FETTER, 2001).

Por sua vez, em áreas de planície, comuns nos baixos cursos das bacias hidrográficas, a interação entre águas subterrâneas e superficiais torna-se mais complexa pela presença de fluxos locais de terraços, meandros, diques naturais, lagos e áreas úmidas (Figura 14). Nos cursos d'água de menor extensão, há o suprimento por fluxos locais de águas subterrâneas. Esses fluxos variam sazonalmente e podem ter momentos de ganho ou de perda de fluxo de base, conforme a magnitude das inundações, gerando o efeito de armazenamento das margens, por fluxo lateral ou infiltração; e evapotranspiração, havendo diretamente perdas das águas subterrâneas comparadas a bombeamentos de poços, uma vez que o lençol freático é próximo à superfície em planícies aluviais. Os fluxos de base podem também formar áreas úmidas e lagos (WINTER *et al.*, 1998). Normalmente, sob climas úmidos, as áreas planas têm uma abundância de lagos e de áreas úmidas, principais locais de ocorrência da descarga de águas. Nessas áreas, o aquífero mais próximo da superfície está conectado com aquíferos livres, constituídos por sedimentos do Quaternário (de origem aluvial, lacustre-aluvial, costeiro-marinho, glacial, dentre outros) que compõem os terraços aluviais das planícies de inundação ou das terras baixas (*lowlands*). Após os eventos de recarga subterrânea nos interflúvios, as situações de percolação variam conforme a estrutura das camadas e a profundidade do lençol freático (CHERPANSKY, VSEVOLOZHISKY e ZEKTSER, 2009).

Figura 14 – Fluxos de águas subterrâneas em um vale fluvial.

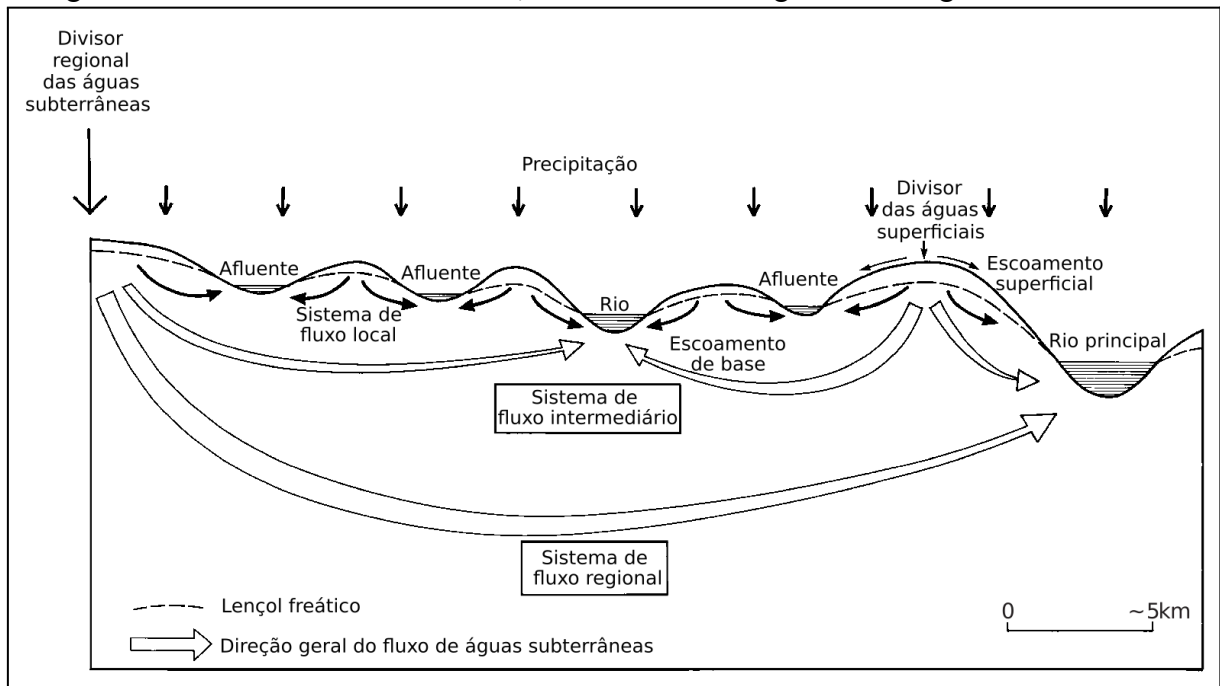


Fonte: Adaptado de Winter *et al.* (1998, p. 39).

Assim, apesar de que se parte do modelo conceitual de que as áreas topograficamente mais altas são de recarga e as mais baixas de descarga de águas subterrâneas para explicar a circulação no meio subterrâneo, a dinâmica de fluxos é mais complexa e não depende apenas da forma topográfica local (WINTER, 1999). A interação de águas subterrâneas e superficiais é influenciada também pelo controle geoestrutural, como plataformas, escudos cristalinos, maciços montanhosos dobrados e nos espaços entre montanhas (depressões ou planícies) (CHERPANSKY, VSEVOLOZHISKY e ZEKTSER, 2009).

Nesse contexto, os fluxos subterrâneos podem ocorrer de forma local, intermediária e regional (Figura 15). As áreas de recarga nos altos topográficos das bacias hidrográficas estão conectadas com as áreas de descarga nos vales, as quais estão junto a outras áreas de descarga contíguas e constituem o sistema de fluxo local. O sistema de fluxo intermediário abrange áreas de recarga com um ou mais altos topográficos e áreas de descarga com um ou mais baixos topográficos, entre as áreas de maior altitude e menor altitude. Já o sistema de fluxo regional consiste em áreas de recarga entre o divisor de águas subterrâneas e áreas de descarga no fundo das bacias hidrográficas de grandes rios. Quanto maior a profundidade do fluxo, mais lenta será a circulação até a sua descarga de águas. Nas elevações, como nas encostas dos vales, o sistema de fluxos locais é mais comum (TÓTH, 1963).

Figura 15 – Sistemas de fluxos locais, intermediários e regionais das águas subterrâneas.



Fonte: Adaptado de Tóth (1963 apud Hiscock e Bense, 2014, p. 75).

2.2.3 Conceitos e questões metodológicas na análise do escoamento de base

Ao se considerar a água no ciclo hidrológico, assume-se que a água está armazenada em diferentes reservatórios, como nos solos, nos glaciares, nos aquíferos, nos lagos, nas represas, dentre outros. O armazenamento das águas nesses reservatórios pode até parecer estático, mas apresenta um constante movimento, desde a sua entrada no reservatório até a sua saída para outro. Independentemente do tempo, haverá alguma água armazenada e a quantidade que sai nem sempre é igual à quantidade que entra. Assim, o que se compreende por água armazenada diz respeito ao fluxo lento contido nos diferentes reservatórios terrestres. Não é uma definição tão simples, uma vez que há questões imbricadas nela, o que a torna subjetiva, como o fato de poder incluir, além das águas subterrâneas, também os rios como áreas de armazenamento, ou mesmo, quais seriam as velocidades de passagem em cada reservatório (DAVIE, 2008).

Para determinados autores, como Nathan e McMahon (1990), o fluxo de base é mais uma conveniência conceitual do que uma descrição precisa, visto que os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica são mais complexos do que mostram as definições. No entanto, pode-se dizer que os conceitos de fluxo de base apresentam aspectos comuns (Quadro 7). Assim como é atribuída à função ecológica de perenização e a velocidade dos

fluxos de escoamento, os conceitos de fluxo de base, conforme Schwartz (2007) estão associados a três noções principais: drenagem a partir de um aquífero saturado; pela descarga de águas subterrâneas ou de outras fontes; ou, ainda, pela drenagem das bacias hidrográficas durante os períodos sem recarga. De todo o modo, a interpretação convencional do que é o fluxo de base reside na separação das componentes do escoamento: o fluxo rápido, ou fluxo de escoamento superficial; e o fluxo lento, ou fluxo de drenagem das águas subterrâneas. No entanto, há de se ressaltar que o tempo de fluxo é relativo às características das bacias hidrográficas, de tal forma que bacias hidrográficas poderão dispor de respostas hidrológicas próprias. A mesma interpretação aplica-se às distinções entre águas antigas e águas novas, para diferenciar entradas de água pela precipitação e do escoamento direto na subsuperfície.

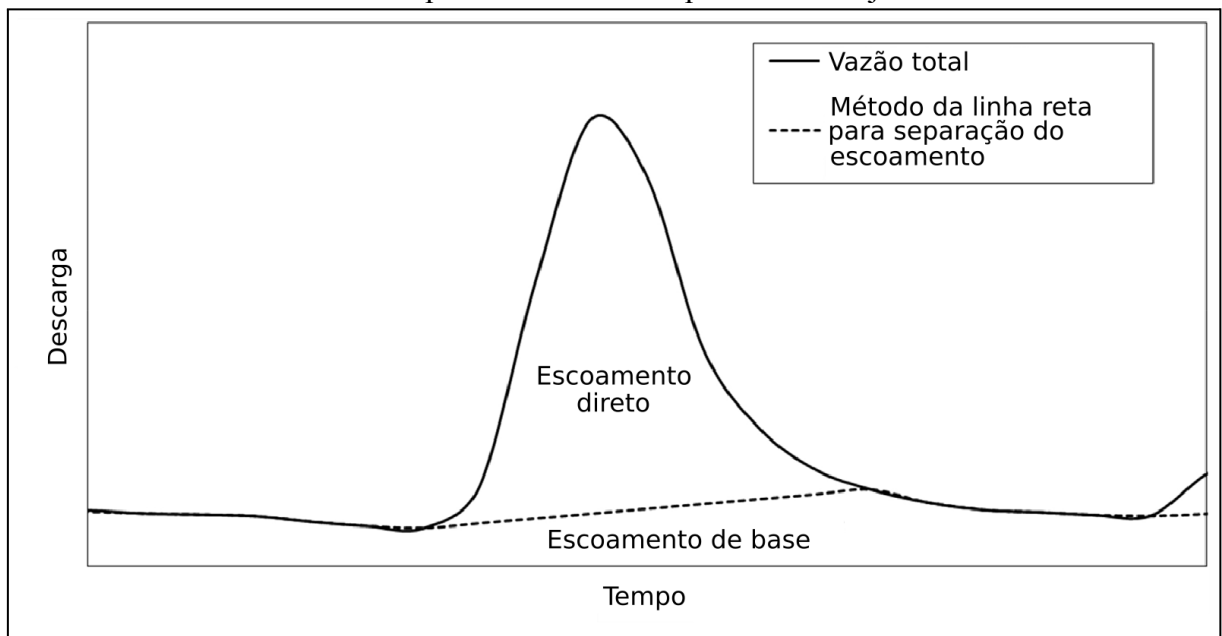
Quadro 7 – Conceitos de fluxo de base na literatura especializada.

Autores	Definição
Hewlett e Hibbert (1967)	O fluxo de base é compreendido como o fluxo de águas oriundo dos aquíferos ou como o fluxo deixado após cessar o escoamento superficial direto. O escoamento de base constitui um dos quatro componentes do volume de águas de um curso d'água perene, ao lado da interceptação do canal, o fluxo superficial e o interfluxo. A interceptação do canal é formada pela precipitação que incide diretamente nos cursos d'água. O fluxo superficial é a água da precipitação, ou do derretimento da neve, que não infiltra e escoo sobre o solo. Já o interfluxo representa o deslocamento subsuperficial da água no solo para os rios, sendo de período variável.
Hall (1968)	O fluxo de base é a parcela do volume de águas proveniente do armazenamento subterrâneo ou de fluxos de contribuição tardios aos cursos d'água. Os demais componentes da vazão fluvial são o escoamento superficial direto e o interfluxo, os quais não têm participação no volume dos rios durante os períodos sem chuva, ou seja, sem recarga. Além disso, há um conjunto de termos que são atribuídos ao escoamento de base, como, por exemplo, fluxo subterrâneo, fluxo baixo, fluxo de percolação, fluxo de infiltração e vazão sustentável.
Nathan e McMahon (1990)	O fluxo de base é um dos três principais componentes do fluxo de um rio, juntamente com o escoamento superficial e o interfluxo. Em uma análise do hidrograma, no entanto, a identificação da separação de escoamento gera incertezas quanto ao que seja fluxo de base e ao que seja interfluxo. Inclusive, o próprio fluxo de base pode ser formado de diversas contribuições, variar conforme as estações do ano e ter diferentes constantes de recessão, em função do comportamento não-linear.
Smakhtin (2001)	O fluxo de base é o que regula a descarga de águas em uma bacia hidrográfica, enquanto que, durante os períodos de precipitação, o escoamento superficial soma-se ao fluxo de base para formar o escoamento total.
OMM/ UNESCO (2012)	O fluxo de base corresponde à descarga de águas em um canal fluvial, podendo ser proveniente de águas subterrâneas, ou ainda, de lagos e glaciares, quando não há precipitação ou, quando for o caso, derretimento de neve por longos períodos.
Bosch <i>et al.</i> (2017)	A característica que costuma ser usada para diferenciar os fluxos de escoamento é a velocidade do seu deslocamento no ambiente, de modo que as águas subterrâneas formam o fluxo mais lento, o escoamento superficial constitui o fluxo mais rápido e o interfluxo é definido como mais rápido em relação ao fluxo subterrâneo e mais lento em relação ao escoamento superficial. O escoamento direto inclui o fluxo superficial propriamente dito, além do fluxo rápido proveniente do interfluxo ou fluxo subsuperficial. Já o escoamento de base, que mantém as águas fluindo nos rios por mais tempo, abrange o interfluxo, ou fluxo subsuperficial mais lento, e o fluxo das águas subterrâneas.
CNRH (2018)	O fluxo de base representa o “fluxo de água subterrânea responsável pela perenidade dos corpos de água superficial, exceto naqueles regularizados por contribuições de água de degelo e por reservatórios superficiais”.
Duncan (2019)	Em relação à vazão total de um rio para um determinado período, o fluxo de base pode ser descrito como a componente mais lenta e duradoura, proveniente de processos hidrogeológicos e não explicada por um único evento de precipitação. O fluxo de base pode ser estudado em suas duas fases, sendo uma durante os períodos com pouca ou nenhuma precipitação, ao se apresentar como uma curva de recessão suave no hidrograma, e outra durante os períodos de chuva mais intensa, com uma fase de recarga diferenciada.
Hirata <i>et al.</i> (2019)	O fluxo de base é a função ecológica mais importante dos aquíferos, haja vista que é a descarga de águas subterrâneas que garante a perenidade dos rios, lagos, pântanos e manguezais. A descarga de águas, em períodos de estiagem, permite a manutenção da biota terrestre e aquática; realiza o transporte de sedimentos; promove a diluição de fontes contaminantes; proporciona beleza cênica; impede o avanço da intrusão salina em áreas costeiras; e regula a salinidade dos manguezais.

Fonte: Elaboração própria.

Com base nas definições do Quadro 7, depreende-se que o fluxo de base é o que mantém o escoamento permanente de águas (escoamento de base), pelo maior tempo, nas bacias hidrográficas. Segundo Bosch *et al.* (2017), considera-se que os registros de vazão tardios nos hidrogramas dizem respeito às águas que se infiltraram no solo e, por isso, apresentam um fluxo mais lento ao longo dos caminhos da subsuperfície. Por ser impossível a identificação individualizada dessas três componentes da vazão pela separação do hidrograma, geralmente a vazão de um rio é analisada por apenas duas componentes (Figura 16), o escoamento superficial direto (*stormflow*) e o escoamento de base (*baseflow*).

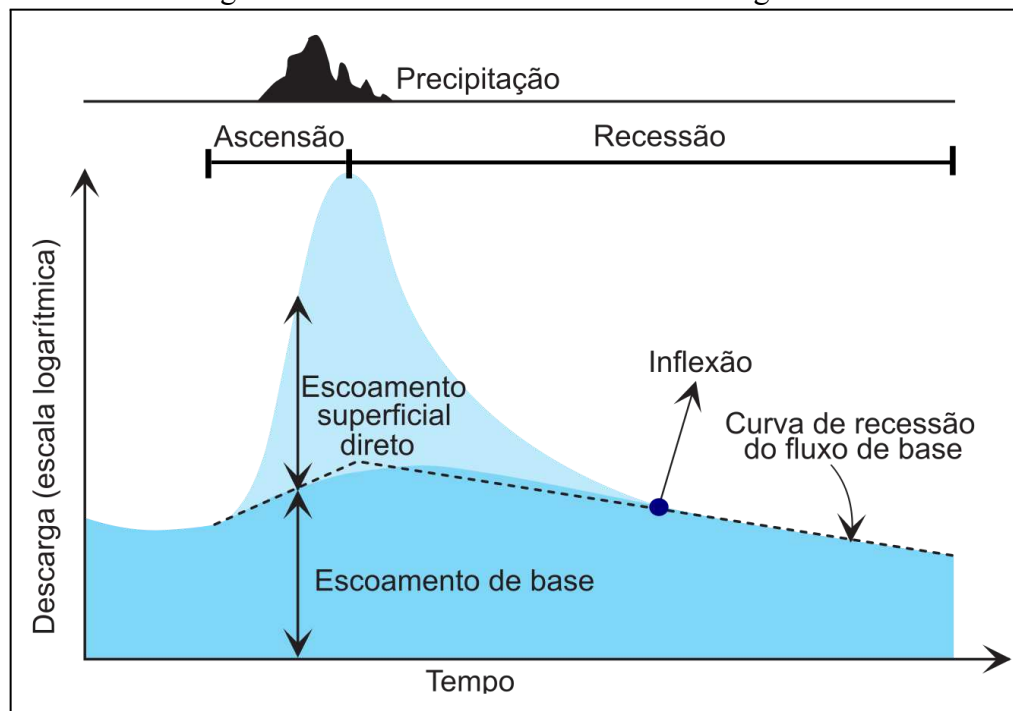
Figura 16 – Separação da vazão em fluxos no hidrograma, em linha reta, com o início e o fim do fluxo superficial delimitado por linha tracejada.



Fonte: Adaptado de Bosch *et al.* (2017, p. 111).

No hidrograma é mostrada e avaliada a história da sucessão de eventos de alternância entre precipitação e estiagens, ou de recarga e descarga de águas, que acontecem em uma bacia hidrográfica (LEAP, 2016). Os processos que envolvem a descarga de águas na bacia hidrográfica não ocorrem de maneira simultânea, apesar de serem percebidos durante os períodos secos ou sob pouca precipitação. De modo geral, a água armazenada nos solos e nos aquíferos pode ser evapotranspirada ou drenada. Quando drenada, apresenta uma gradual depleção chamada de recessão (Figura 17) e representada no hidrograma pela curva de recessão (TALLAKSEN, 1995).

Figura 17 – Curva de recessão em um hidrograma.



Fonte: Modificado de Fitts (2013, p. 139).

A curva de recessão é caracterizada por ter o seu início após o pico do hidrograma, quando há a queda da vazão com o passar do tempo pela ausência da recarga por meio da precipitação. Nesse momento, ocorre a contribuição combinada dos escoamentos superficial direto, subsuperficial e de base para a vazão total registrada em um ponto de um curso d'água. Permanecendo o cessamento da precipitação, anula-se o escoamento superficial direto e, seguidamente, o fluxo subsuperficial. Assim, a contribuição ao escoamento superficial do curso d'água passa a ser realizada principalmente pelo abastecimento dos aquíferos através dos fluxos de base (CUSTODIO e LIAMAS, 1983).

Por isso, a vazão do rio é formada inteiramente pelo fluxo de base somente após o fim da precipitação e do tempo de concentração da bacia hidrográfica. Quando representada em escala semilogarítmica, a vazão registrada passa a comportar-se com uma forma quase linear no hidrograma (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). A partir desse ponto, denominado de inflexão, a curva é chamada de esgotamento ou de decaimento e indica a diminuição do armazenamento dos aquíferos (CUSTODIO e LIAMAS, 1983), tornando a curva de recessão do fluxo de base a porção mais baixa da curva de um hidrograma (KARAMOUZ, AHMADI e AKHBARI, 2011). Em síntese, a curva de recessão é a relação entre o armazenamento e a descarga de águas em um rio (SMAKHTIN, 2001). A curva de depleção ou de esgotamento mostra que o aquífero não apresenta restituição significativa da

descarga natural por recarga subterrânea enquanto houver um período de ausência de chuvas, sendo evidente esse cenário, principalmente, em bacias hidrográficas de regime perene (GONÇALVES, SCUDINO e SOBREIRA, 2005).

Na análise da curva de recessão, é necessária precaução ao associar o escoamento de base como equivalente à descarga de águas subterrâneas. O escoamento de base de um rio pode ter diferentes reservatórios de armazenamento, como lagos, áreas úmidas, margens de cursos d'água e neve, cuja regularidade de tempo para a descarga é variável. A evaporação direta, a evapotranspiração e a extração da água dos rios e dos aquíferos para as atividades humanas são fatores que interferem na quantificação do escoamento de base, exigindo atenção ao se avaliar o balanço hídrico e ao considerar a gestão com base no regime das águas de uma bacia hidrográfica (BRODIE e HOSTETLER, 2005).

Os estudos da interação aquífero-rio, pela análise do escoamento de base, costumam associar a vazão do escoamento de base (Q) ao armazenamento subterrâneo (S). Essa associação parte de duas relações matemáticas, sendo uma de comportamento linear, com Q como função linear de S , e outra de comportamento não-linear, de modo que Q está condicionada a uma função de não-linearidade em relação a S (DOOGE, 1983 apud THOMAS *et al.*, 2013). Nos modelos conceituais de águas subterrâneas é representada a função de descarga, linear ou não-linear, de um ou mais reservatórios em um rio, conhecida como função de armazenamento-saída ou armazenamento-descarga (STOELZLE *et al.*, 2015). Assim, a curva de recessão de um hidrograma é interpretada pelo pressuposto usado no processo de recessão, podendo assumir uma ou outra abordagem matemática (SUJONO, SHIKASHO e HIRAMATSU, 2004).

As abordagens que consideram a relação de linearidade se referem ao comportamento do aquífero como o único reservatório de armazenamento (S), proporcionalmente linear ao seu escoamento de base, ou seja, a sua descarga subterrânea (Q). Em termos matemáticos, trata-se de uma função de decaimento exponencial, expressa na Equação 6. Na primeira forma, Q_t é o fluxo ao longo do tempo (t), Q_0 é o valor inicial de vazão da descarga subterrânea para o tempo correspondente a 0 e τ é o tempo de retorno do armazenamento subterrâneo. Essa equação é atribuída ao trabalho de Maillet (1905), aplicada também por Horton (1933) para diversos cursos d'água, em 1904, e parte da equação diferencial não-linear para aquíferos de Boussinesq (1877). Na segunda forma da Equação 6, estabelecida no trabalho de Barnes (1939), e também usual na literatura, o índice de recessão (k) é introduzido e substitui o termo exponencial (NATHAN e MCMAHON, 1990; CHAPMAN, 1999;

AKSOY e WITTENBERG, 2011).

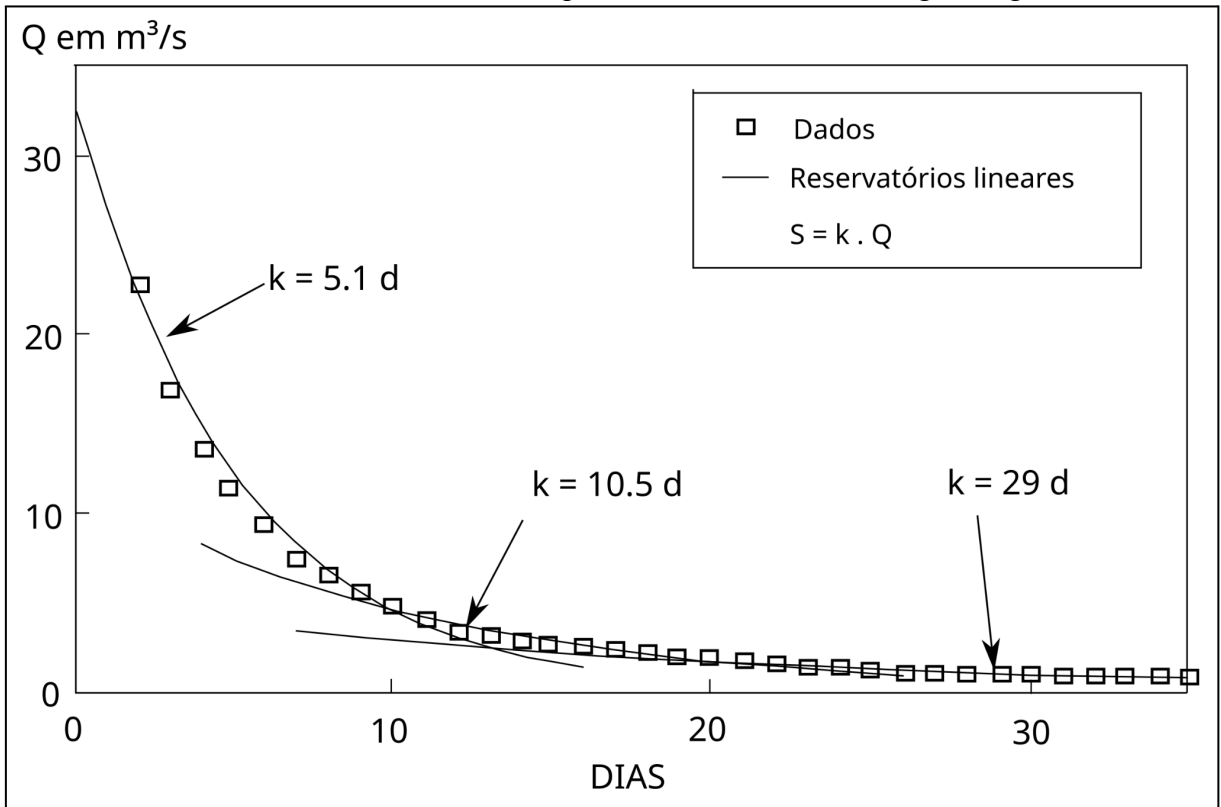
$$Q_t = Q_0 e^{-t/\tau} = Q_0 k^t \quad (6)$$

Apesar de representar uma linearidade, o fluxo de recessão não é percebido exatamente como uma linha reta nos gráficos semilogarítmicos, como apontava Barnes (1939), mas assemelha-se a uma forma côncava em grande parte das vezes, o que é um indicativo da sua não-linearidade. O decaimento exponencial da vazão (Q) ao longo do tempo, portanto, é explicado pelo armazenamento (S), da Equação 7, no qual o aquífero se comporta como reservatório linearmente proporcional à saída, isto é, ao escoamento de base (AKSOY e WITTENBERG, 2011).

$$S = kQ \quad (7)$$

O valor de k, compreendido como a constante de retenção, da água armazenada em um reservatório durante determinado tempo, como um aquífero, é estimado com base na inclinação do gráfico semilogarítmico de vazão pelo tempo. Considerando-se as curvas de um hidrograma durante os períodos de recessão, observa-se que a constante de recessão (k) aumenta o seu valor à medida que aumenta o período de descarga de águas (Figura 18). Dessa maneira, não existe um valor único de k para definir um comportamento constante para um reservatório, tornando necessária a combinação de diferentes valores para a sua caracterização como recessão linear (WITTENBERG, 1994), ao mesmo tempo em que fica evidenciada a sua não-linearidade (WITTENBERG, 1999). O comportamento geral não-linear se deve ao fato de que a curva de recessão é formada por diferentes fontes, com escalas de depleção distintas, e de se esgotarem aquelas de tempo mais curto, levando a curva a ser decrescente. Como ocorre a transição de um segmento de recessão para outro gradualmente, torna-se difícil, por vezes, identificar a curva e os seus pontos de mudança (FIOROTTO e CARONI, 2013). A curva mestra de recessão desempenha esse papel pela construção de uma curva principal e os métodos mais utilizados para a sua elaboração são o de correlação, o *matching strip*, o método gráfico e o método da tabulação (SUJONO, SHIKASHO e HIRAMATSU, 2004; VAFAKHAH, ESLAMIAN e BOZCHALOEI, 2014).

Figura 18 – Exemplos de diferentes valores de K para três curvas de recessão provenientes de um mesmo reservatório com comportamento linear de descarga de águas.



Fonte: Adaptado de Wittenberg (1994, p. 62).

A maioria dos reservatórios apresenta comportamento não-linear do armazenamento e da retenção (WITTENBERG, 1994). Em um modelo de não-linearidade, explicando que a relação de armazenamento-descarga é a adição de um expoente adimensional (n) (AKSOY e WITTENBERG, 2011) e a troca da constante de recessão (k) por a, de modo que $a = 1/\tau$. Essa relação (Equação 8) foi definida no trabalho de Coutagne (1948) (CHAPMAN, 1999).

$$S = aQ^n \quad (8)$$

Quando não ocorre a entrada de águas nos reservatórios durante os períodos sem precipitação, o armazenamento pode seguir a Equação 9, pela combinação com a equação de continuidade das águas subterrâneas (WITTENBERG, 1999; SCHWARTZ, 2007; AKSOY e WITTENBERG, 2011).

$$\frac{dS}{dt} = -Q \quad (9)$$

A Equação 9 resulta na Equação 10, encontrada por Coutagne (1948), que trata da

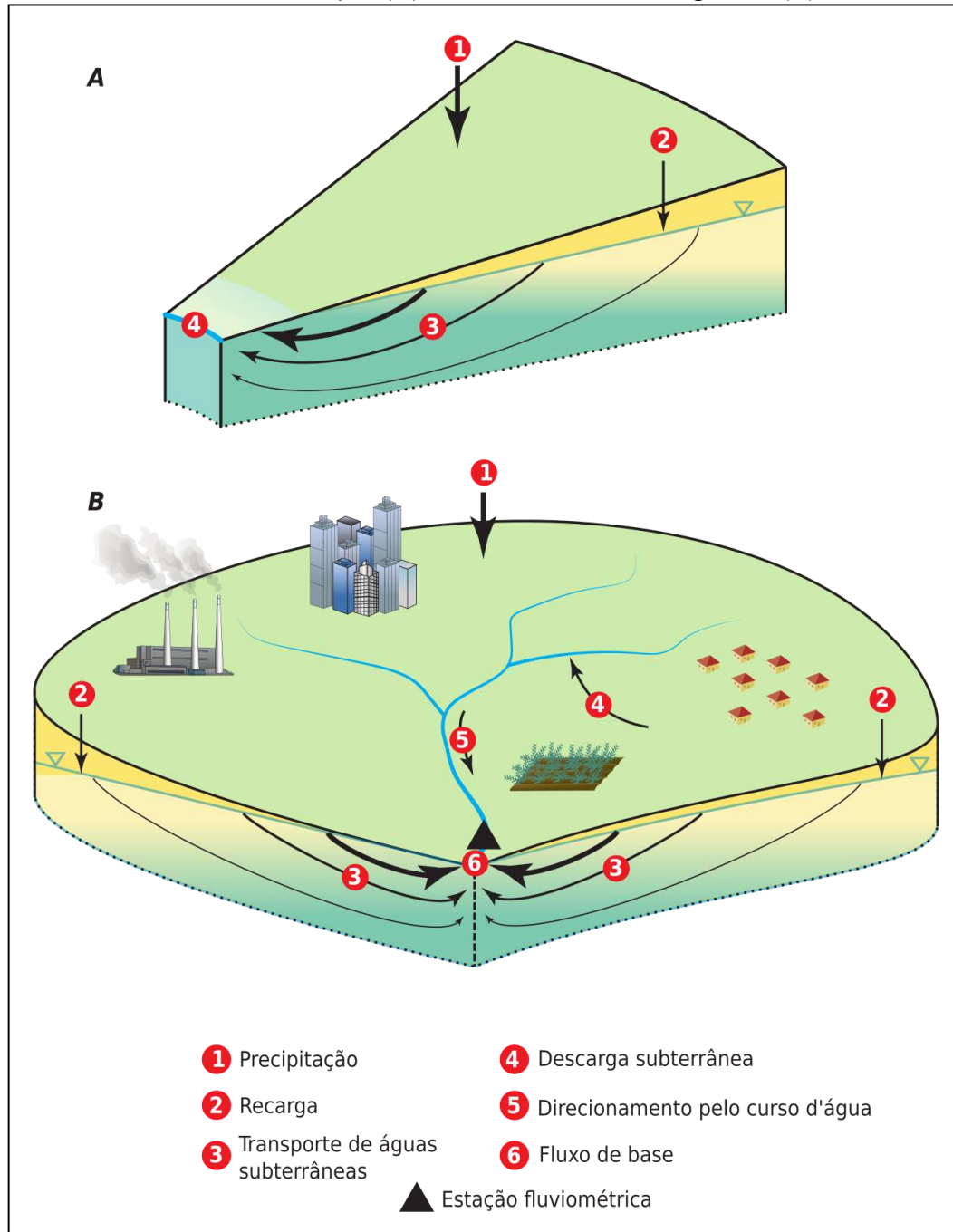
formulação função de recessão para reservatórios não-lineares, em que $\tau_0 = S_0/Q_0$ para o tempo inicial zero. Nas situações em que n for igual a 1, a Equação 6, de decaimento exponencial, será aplicada (CHAPMAN 1999; WITTENBERG, 1999; AKSOY e WITTENBERG, 2011).

$$Q_t = Q_0 [1 + (n-1)t/\tau_0]^{-n/(n-1)} \quad (10)$$

Acrescenta-se que os estudos de fluxos de base procuram responder questões sob duas perspectivas: uma temporal e outra espacial. A primeira é sobre o fluxo em si, como a duração dos eventos de vazões mínimas, a variabilidade da vazão de base e a intensidade do fluxo baixo. A outra perspectiva se refere à distribuição das características observadas das vazões mínimas e a estimativa delas para bacias hidrográficas sem dados. Para essa interpretação, são considerados o clima e os fatores fisiográficos em que se encontram as vazões mínimas, como geologia, solo, dentre outros, e as influências de modificações antropogênicas no ambiente (SMAKHTIN, 2001).

Conforme Raffensperger *et al.* (2017), duas escalas espaciais de análise se sobressaem nos estudos de fluxo de base (Figura 19). Na escala de trecho de um rio (situação A), onde se tem o divisor de águas subterrâneas, a área de contribuição do trecho deve considerar todos os escoamentos envolvidos na área topográfica delimitada. A depender do tamanho da área de contribuição, certos atributos, como a circulação das águas subterrâneas, a precipitação ou o uso e cobertura da terra, podem ser considerados homogêneos para explicar o escoamento de base. De forma expandida, a escala de bacia hidrográfica (situação B) considera todas as áreas de contribuição dos diferentes trechos fluviais situados à montante de um ponto de análise, que se estendem desde o seu exutório (saída) ou uma estação fluviométrica, até os divisores de águas superficiais. Nessa escala, a circulação pela rede hidrográfica e os atributos relacionados às áreas de contribuição podem ser heterogêneos e afetar significativamente a análise dos resultados, como é o caso, por exemplo, da configuração com diferentes coberturas do solo.

Figura 19 – Escalas espaciais de análise do fluxo de base: escala de trecho de um rio ou de área de contribuição (A) e escala de bacia hidrográfica (B).



Fonte: Adaptado de Raffensperger *et al.* (2017, p. 03).

A avaliação de processos hidrológicos requer a aplicação da abordagem do balanço hídrico, no qual é necessário incluir a conexão entre águas subterrâneas e superficiais e identificar o seu comportamento ao longo do tempo (RUMSEY *et al.*, 2020). Os métodos de separação do escoamento de base podem ser agrupados em métodos baseados em traçadores, ou diretos, e não-traçadores, ou indiretos. Traçadores hidroquímicos e isótopos ambientais,

que fazem parte da abordagem do balanço de massa, estão incluídos neste primeiro grupo (GONZALES *et al.*, 2009). Outros métodos diretos ou de campo para inferência do escoamento de base são o monitoramento da infiltração com lisímetros, o nível freático dos aquíferos através de poços ou piezômetros, e correlações pela temperatura da água com traçadores. Em grandes bacias hidrográficas, porém, os métodos diretos podem apresentar um custo elevado em função da quantidade de amostras e pode haver incertezas pelo fato dos processos hidrogeológicos serem espacialmente heterogêneos (VASCONCELOS, MARTINS JUNIOR e HADAD, 2013b). Como o escoamento de base não costuma ser analisado diretamente, métodos indiretos realizam a estimativa do seu comportamento, sendo difundida a separação de hidrograma (RAFFENSPERGER *et al.*, 2017). A separação e quantificação do escoamento de base a partir de um hidrograma (gráfico de vazão pelo tempo) é uma das principais preocupações para a compreensão das interações aquífero-rio (NEJADHASHEMI *et al.*, 2008).

Dentre os métodos indiretos, ou não-traçadores, de separação do hidrograma estão os métodos gráficos, do hidrograma unitário (GONZALES *et al.*, 2009) e o automático. O método automático é dividido em método de filtragem (por exemplo, *Hydrograph Separation Program* - HYSEP, *Partitioning Computer Program* - PART, e o *UK Institute of Hydrology's method* - UKIH), e método do filtro digital recursivo, como, por exemplo, o filtro de Eckhardt. O método automático é o mais utilizado para a estimativa do escoamento de base. Isso porque algoritmos podem ser usados em aplicativos computacionais e reproduzir a separação manual com base na filtragem ou análise de sinais digitais dos dados de vazão disponíveis (SHAO *et al.*, 2020).

Os filtros digitais recursivos transformam uma série de dados diários de vazão de um rio em sinais digitais. A separação do escoamento, com a identificação da contribuição do fluxo de base para rio, acontece com a aplicação de um filtro, diferenciando os sinais de alta frequência, atribuídos ao escoamento superficial direto, dos sinais de baixa frequência, reconhecidos como o escoamento de base (LIU *et al.*, 2019). Na literatura, o fluxo de base é geralmente mencionado como de baixa frequência, e, sendo assim, a tentativa de isolar esses sinais é o intuito da separação do escoamento de um rio pelo uso de filtros digitais recursivos (SPONGBERG, 2000). Os filtros digitais recursivos, portanto, removem da série de dados os sinais de alta frequência do escoamento superficial direto para extrair os sinais de baixa frequência do fluxo de base. Os filtros são robustos e simples, porém, requerem calibração de

dados para serem válidos numericamente, os resultados são sensíveis aos parâmetros de cada filtro e muitos não incluem os processos hidrológicos (BRODIE e HOSTETLER, 2005).

Boussinesq, em 1877, e Maillet, em 1905, estão entre os primeiros trabalhos que tratam da análise da recessão com soluções matemáticas para explicar o movimento do fluxo subterrâneo. Ainda hoje, a análise da curva de recessão do escoamento de base é importante e possibilita a obtenção de informações acerca das características do armazenamento das águas subterrâneas e dos aquíferos que alimentam os cursos d'água. Essas informações são usadas na gestão de águas, para abastecimento de residências e indústrias, irrigação, diluição de efluentes, como fonte de energia pelo setor elétrico (TALLAKSEN, 1995) e para recreação (SMAKHTIN, 2001).

A avaliação do comportamento de escoamento de base é imprescindível para o gerenciamento de situações críticas que ocorrem nas bacias hidrográficas, especialmente durante as estações secas e os períodos de estiagem, quando aumentam os conflitos hídricos (VASCONCELOS, MARTINS JUNIOR e HADAD, 2013b) pela intensificação do uso das águas superficiais, mantidas essencialmente pela descarga dos aquíferos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Nesse sentido, as estratégias de gestão de águas, principalmente em circunstâncias de períodos secos, requerem a estimativa da disponibilidade de águas, a qualidade, o balanço hídrico, análise das relações dos ecossistemas aquáticos, dentre outros (SMAKHTIN, 2001). Para isso, a avaliação do comportamento do escoamento de base ocorre, por exemplo, com a separação de componentes que constituem o fluxo total em um hidrograma, na análise de frequência de vazões mínimas e em estudos de armazenamento de águas das bacias hidrográficas, exigindo também o seu uso para a calibração de modelos chuva-vazão (TALLAKSEN, 1995).

2.2.4 Dinamismo do escoamento de base nas bacias hidrográficas: fatores de influência na circulação de águas

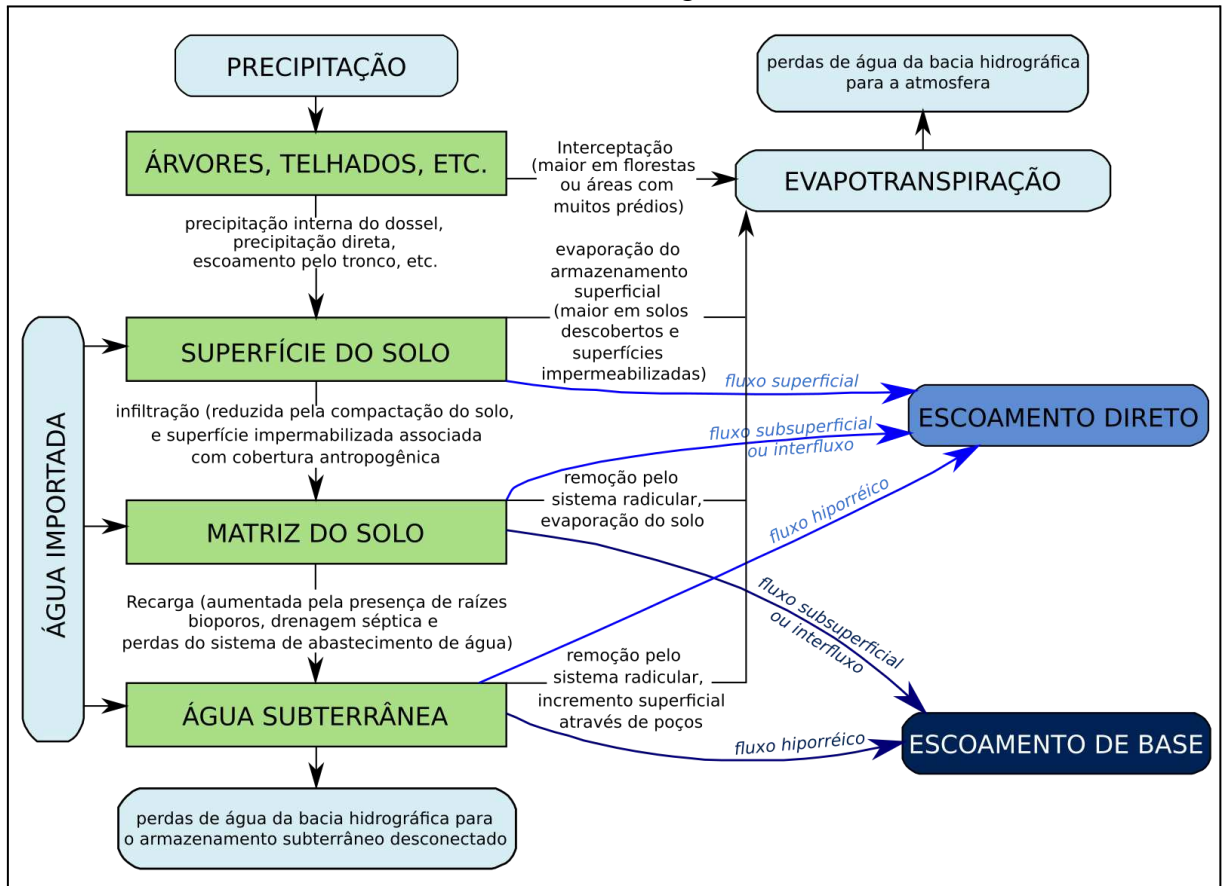
O emprego do termo “dinamismo” para o fluxo de águas diz respeito à variação temporal e espacial do armazenamento e deslocamento das águas, nos diferentes reservatórios, e nas diferentes bacias hidrográficas. A ênfase é aqui mostrada para apresentar os fatores que levam à geração do escoamento de base, com a sua passagem no ciclo hidrológico pela descarga de águas nos cursos fluviais das bacias hidrográficas.

Uma bacia hidrográfica pode ser compreendida como um sistema constituído por reservatórios interligados, nos quais ocorre a recarga subterrânea (dependente da precipitação), o armazenamento e a descarga de águas, comandados pelas características fisiográficas. A evapotranspiração na bacia hidrográfica; a distribuição da vegetação e dos solos; a infiltração; as propriedades hidráulicas dos aquíferos e sua extensão; a topografia; o clima; a frequência, a quantidade e a taxa de recarga são os fatores que regulam o comportamento do regime das vazões mínimas de um rio, assim como os seus ganhos e perdas. São esses processos naturais que exercem controle sobre o movimento do fluxo de águas desses reservatórios para um rio, durante uma estação seca, especialmente com ocorrência nas áreas próximas dos cursos d'água. Enquanto isso, nas outras áreas da bacia hidrográfica, atuam processos de infiltração e de armazenamento de águas, durante os períodos de precipitação, que retornarão posteriormente como fluxos de base. Além dos fatores naturais, a ação de processos antropogênicos também influencia o regime de escoamento de base de um rio, na sua análise e na própria gestão (SMAKHTIN, 2001).

Em um modelo conceitual do escoamento de base, considerando-se o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica (Figura 20), as componentes de entrada são as águas provenientes da precipitação ou outras fontes de recarga, como, por exemplo, fossas sépticas, irrigação, ou vazamentos da rede de abastecimento de água, as quais são denominadas de águas importadas. As componentes constituintes do escoamento de base são o fluxo subsuperficial e o fluxo hiporreico⁴, que tem origem no armazenamento freático. Fatores que implicam na perda de águas do escoamento de base incluem a evapotranspiração, com a perda de águas para atmosfera; a geração de fluxo superficial e subsuperficial; e o deslocamento do fluxo de águas subterrâneas para outra bacia hidrográfica, com armazenamento desconectado da bacia hidrográfica de origem da recarga. Por outro lado, o uso e cobertura da terra e as mudanças climáticas são fatores que podem aumentar ou diminuir a intensidade dos processos de infiltração e recarga e, portanto, do escoamento de base (PRICE, 2011).

⁴ A zona hiporreica tem sua origem de uma abordagem ecológica e indica a área em torno das massas d'água, a partir da qual as águas subterrâneas suprem as águas superficiais e tem-se a presença de ecossistemas subterrâneos e ribeirinhos (GARDNER, 1999).

Figura 20 – Modelo conceitual do escoamento de base no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.



Fonte: Adaptado de Price (2011, p. 467).

Cada curva de recessão de um hidrograma é única, de modo que existem fatores de influência quantitativa no escoamento de base que provocam essa irregularidade e podem ser classificados em estáticos e dinâmicos. Os fatores estáticos são aqueles que permanecem constantes ao longo do tempo, como as propriedades dos aquíferos, dos solos ou da morfologia das bacias hidrográficas, como a declividade. Os fatores dinâmicos são conhecidos por serem dependentes do tempo, como o clima e a recarga de águas; o grau de saturação da água nas rochas e nos solos; e impactos antropogênicos, como bombeamento de água ou mudanças na cobertura do solo (GREGOR e MALÍK, 2012).

Assim, o clima, a hidrogeologia, o regolito, a morfologia, a cobertura florestal e os impactos antropogênicos são fatores que explicam a variabilidade de ocorrência do escoamento de base em bacias hidrográficas. Esses fatores são mencionados nos trabalhos de Brunke e Gonser (1997), Lacey e Grayson (1998), Smakhtin (2001), Mwakalila, Feyen e Wyseure (2002), Costa (2005), Silva (2009), Cherepansky, Vsevolozhsky e Zektser (2009), Price (2011) e Vafakhah, Eslamian e Bozchaloei (2014). Para efeito comparativo, o Quadro 8

apresenta uma relação de estudos que usaram diferentes preditores ambientais para explicar o escoamento de base através do Índice do Fluxo de Base (BFI). Observa-se que a qualidade do ajuste nos modelos de regressão é desigual, apresentando diferentes variáveis que podem estar relacionadas ao BFI de bacias hidrográficas de diferentes países ou regiões do mundo.

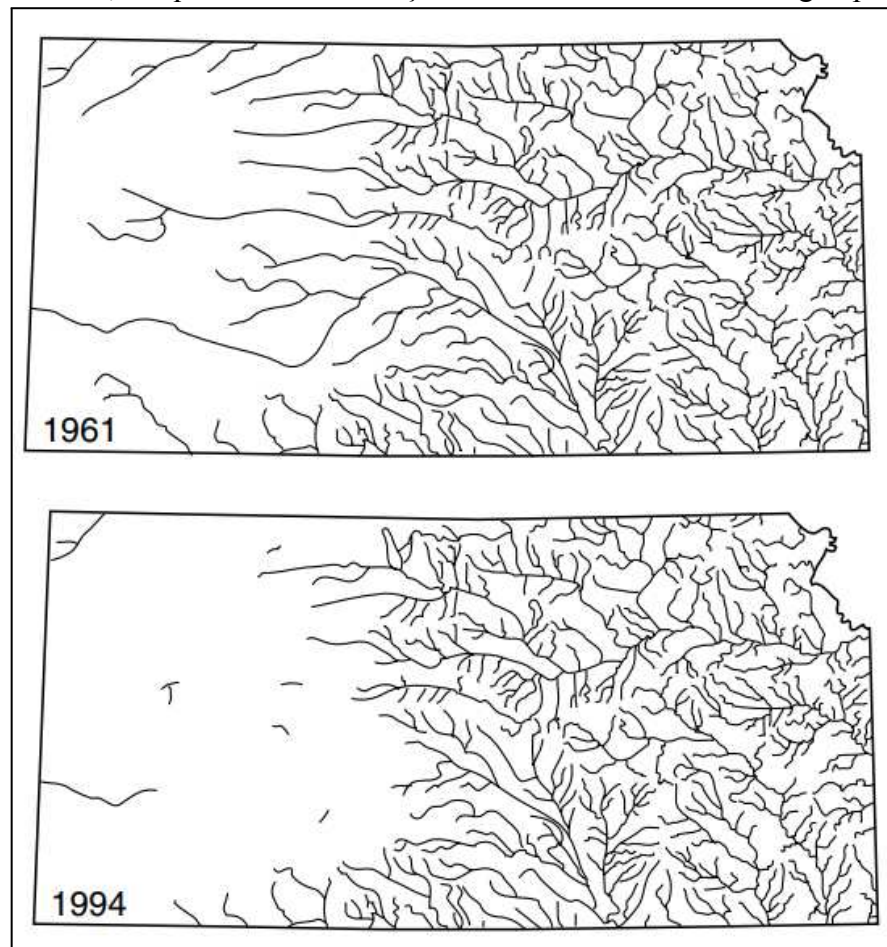
Quadro 8 – Variáveis ambientais usadas como preditoras do Índice do Fluxo de Base (BFI).

Referência	País ou região	Modelo de regressão	R ²	Preditores ambientais
Gustard e Irving (1994)	Europa	Linear	0,46	Fração de 9 classes de solos
Boorman <i>et al.</i> (1995)	Reino Unido	Linear	0,79	Fração de 29 classes de solos
Lacey e Grayson (1998)	Austrália	Linear	0,72	Área da bacia hidrográfica, altitude média, fração de florestas, evapotranspiração potencial, fração da bacia hidrográfica sob rochas sedimentares, precipitação anual média, comprimento do canal fluvial
Haberlandt <i>et al.</i> (2001)	Alemanha	Linear	0,87	Declividade média da superfície, índice topográfico de umidade, condutividade hidráulica do solo e precipitação anual média
Mwakalila <i>et al.</i> (2002)	Tanzânia	Linear	0,89	Índice de umidade e fração da bacia hidrográfica contendo geologia permeável
Mazvimavi <i>et al.</i> (2005)	Zimbábue	Linear	0,75	Precipitação anual média, densidade de drenagem, percentil 75 das declividades da bacia hidrográfica
		Rede Neural Artificial	0,77	Precipitação anual média, densidade de drenagem, percentil 10 das declividades da bacia hidrográfica
Neff <i>et al.</i> (2005)	América do Norte	Exponencial	0,53	Superfície geológica e fração de superfície aquática
Schneider <i>et al.</i> (2007)	Europa	Linear	-	Fração de 29 classes de solos
Longobardi e Villani (2008)	Itália	Linear	0,68	Fração da bacia hidrográfica contendo geologia permeável
		Linear	0,80	Fração da bacia hidrográfica contendo geologia permeável, precipitação anual média, declividade, fração de florestas, altitude média
Santhi <i>et al.</i> (2008)	Estados Unidos da América	Linear	0,79	Porcentagem de areia média, intervalo altimétrico da bacia hidrográfica
Bloomfield <i>et al.</i> (2009)	Reino Unido	Linear	0,89	Fração de 6 classes hidrogeológicas
Van Dijk (2010)	Austrália	Exponencial	0,34	Evapotranspiração potencial
Ahiablame <i>et al.</i> (2013)	Estados Unidos	Logarítmico	0,91	Fração de superfície aquática, fração da capacidade de infiltração de dois tipos de solo
Beck <i>et al.</i> (2013)	Global	Rede Neural Artificial	0,74	Índice de umidade, precipitação anual média, precipitação sazonal, evapotranspiração anual média, correlação sazonal entre suprimento e demanda hídrica, temperatura anual média do ar, profundidade equivalente de neve, altitude média, declividade média da superfície, fração de superfície aquática, fração de florestas, Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), permeabilidade média das rochas, fração média de cascalho, areia, silte e argila

Fonte: Adaptado de Beck *et al.* (2013, p. 16).

Anteriormente à modificação antropogênica da cobertura superficial, o sistema de águas subterrâneas é condicionado a um equilíbrio de longo prazo, sendo constante a recarga e a descarga de águas ao longo dos anos, oscilado apenas pelas variações climáticas de longo prazo (ALLEY, REILLY e FRANKE, 1999). No entanto, as modificações antropogênicas podem converter rios perenes em intermitentes, alterando o regime do escoamento de base (SMAKHTIN, 2001). Um exemplo conhecido dos efeitos da depleção do armazenamento subterrâneo é o do estado do Kansas, nos Estados Unidos. O aquífero Ogallala, ou aquífero das *High Plains*, teve o rebaixamento de 30 metros para o período de apenas três décadas, entre 1961 e 1994, e ocasionou o comprometimento do fluxo de base e a perenização das bacias hidrográficas (Figura 21). Isso indica que a descarga de águas por poços provoca perturbações no estado de equilíbrio das condições naturais de armazenamento e de fluxo (SOPHOCLEOUS, 2000).

Figura 21 – Mapa dos cursos d’água perenes no estado do Kansas, nos EUA, nos anos de 1961 e 1994, no qual se nota a redução da extensão dos cursos d’água perenes.



Fonte: Angelo (1994 apud Sophocleous, 2000, p. 29).

Imagens de satélite do Rio Uruguai, no município de Itapiranga, situado na região Extremo Oeste de Santa Catarina, levantadas pela EPAGRI (2020) (Figura 22), mostram que no período entre abril/2019 e abril/2020, o escoamento de base cessou e o leito rochoso do rio apareceu. Em Santa Catarina, o Rio Uruguai tem uma área de contribuição que abrange toda a vertente do interior do estado. Esse fato sinaliza que a intermitência do escoamento de base de determinados rios já é uma realidade.

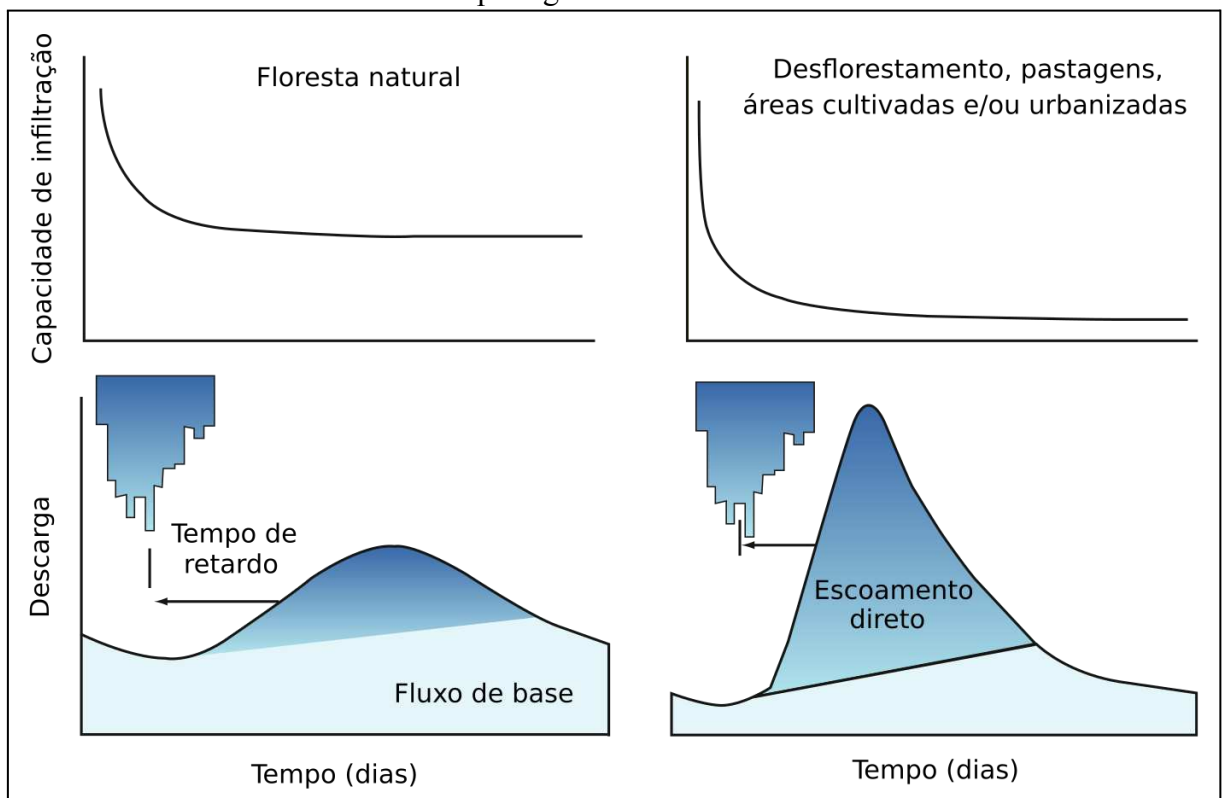
Figura 22 – Imagens de satélite do Rio Uruguai, no município de Itapiranga/SC, no período entre abril de 2019 e abril de 2020.



Fonte: EPAGRI (2020).

A identificação da resposta hidrológica às mudanças de uso e cobertura da terra pode ser visualizada no formato do hidrograma (Figura 23). Uma bacia hidrográfica em condições naturais costuma apresentar um formato suave, com vazão de pico baixa e sustentada pelo fluxo de base, que cobre grande parte da área do gráfico. Em contrapartida, essa mesma bacia hidrográfica urbanizada, sob a mesma quantidade de precipitação, apresenta a capacidade de infiltração reduzida em comparação ao primeiro cenário. O desflorestamento e a coexistência de áreas cultivadas, pastagens e adensamentos urbanos realizam a impermeabilização do solo e proporcionam a concentração da descarga de águas na linha do tempo, com pico mais elevado e menor tempo de retardo. Nessa última situação, à medida que diminui a infiltração com o desflorestamento, amplia-se o fluxo superficial na área do hidrograma, indicando a redução no volume do escoamento de base em relação ao cenário com condições naturais (JAMES e LECCE, 2013).

Figura 23 – Curvas de infiltração e hidrogramas de bacias hidrográficas em paisagem natural e paisagem modificada.



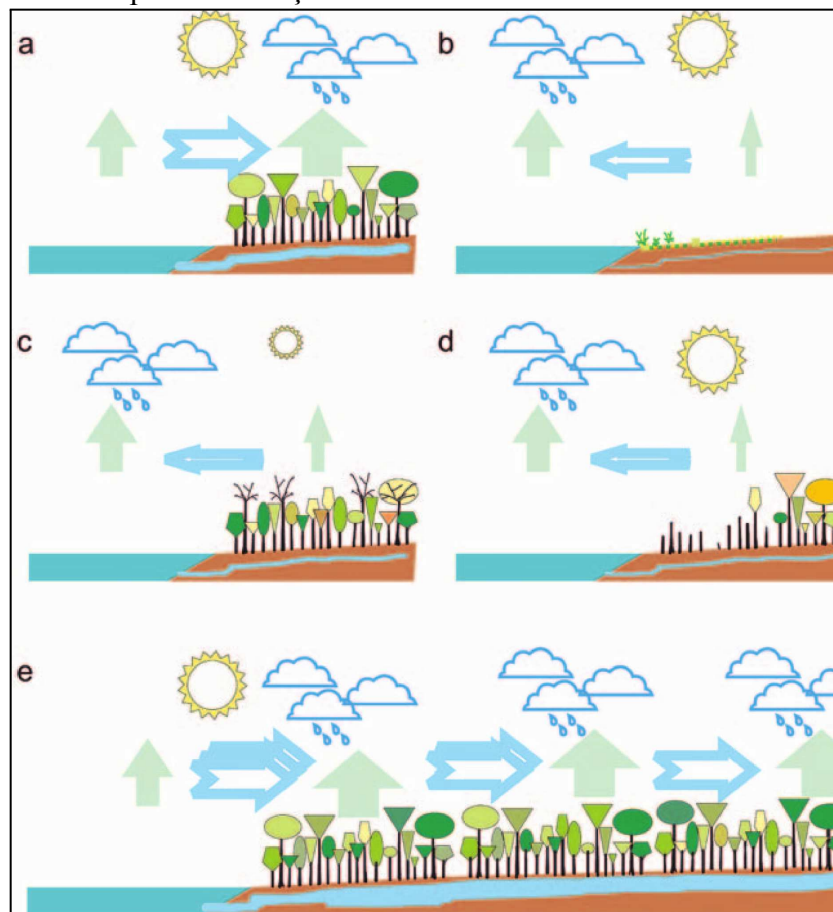
Fonte: Adaptado de James e Lecce (2013, p. 772).

Considerando a evapotranspiração realizada pelas florestas, os padrões atmosféricos de direcionamento da umidade no ciclo hidrológico - locais, regionais e continentais - entre o

oceano e continente podem ser modificados em função do desflorestamento. Assim, áreas desflorestadas podem ter, pela restauração florestal, aumento da precipitação local e melhoria no transporte de umidade dos oceanos em direção aos continentes. A evapotranspiração produzida pelas florestas gera sistemas de baixa pressão com a capacidade de extrair a umidade dos oceanos e levá-la aos continentes (MAKARIEVA *et al.*, 2014), sendo o princípio da teoria da bomba biótica como condutora do ciclo hidrológico nos continentes. À medida que se distanciam dos oceanos, mais áreas continentais tornam-se dependentes da bomba biótica. Sem a cobertura florestal, elas ficam mais suscetíveis às secas, às inundações e aos incêndios (MAKARIEVA e GORSHKOV, 2007).

A Figura 24 mostra o funcionamento da bomba biótica, de maneira que nos locais onde há mais água vaporizada, mais umidade adicional de áreas adjacentes é atraída e distribuída por fluxos horizontais de umidade em escala continental. A situação (A) mostra que, sob o sol, as florestas produzem mais umidade do que os oceanos e atraem mais correntes de ar úmido. Por outro lado, nos desertos (B), a evaporação é naturalmente muito baixa em comparação com o oceano e o ar é puxado na direção dos oceanos. Nos climas sazonais, a evapotranspiração da floresta pode tornar-se reduzida pela baixa incidência solar, favorecendo o direcionamento da umidade para o oceano (C), invertendo essa dinâmica no verão. Os desflorestamentos provocam a redução da evapotranspiração em terra e o gradiente de pressão do oceano atrai a umidade em terra, deixando, ao longo do tempo, o continente mais árido e dificultando a sustentação das florestas (D). A última situação (E) representa os locais onde a cobertura florestal natural ainda é contínua, atraindo o aporte de umidade dos oceanos para as áreas mais distantes da costa pela transferência entre áreas florestais contíguas (MAKARIEVA e GORSHKOV, 2007; SHEIL e MURDIYARSO, 2009).

Figura 24 – Exemplos de situações do efeito da bomba biótica ou da sua ausência.



Fonte: Sheil e Murdiyarso (2009, p. 343).

A escassez hídrica não pode ser apenas atribuída como um fenômeno natural, ou mesmo ser naturalizada socialmente (MEHTA, 2005). Nessa perspectiva, pode ser mencionada a reidratação da paisagem, um conceito desenvolvido na Austrália e aplicado particularmente à produção agroecológica. Esse conceito recria uma aproximação às condições originais do ambiente natural pelo manejo da circulação das águas a partir do uso da terra (BOWYER e O'BREE, 2021) aplicado ao ciclo hidrológico local. A desidratação, ou o ressecamento da paisagem, significa, portanto, a perda de águas disponíveis para suprir o escoamento de base das bacias hidrográficas, estando relacionado, dessa forma, ao enfraquecimento das bombas bióticas.

A restauração das florestas possibilita aumentar a precipitação local e, regionalmente, intensifica o transporte de umidade do oceano para o continente nos processos de larga escala (MAKARIEVA *et al.*, 2014). Simultaneamente, ocorre também a restauração dos serviços ecossistêmicos, dentre eles, o mecanismo “efeito esponja florestal”, com o armazenamento sendo restituído nos aquíferos para o suprimento do escoamento de base

durante as estações secas, principalmente em ambientes tropicais (CHENG *et al.*, 2018). Portanto, a gestão das paisagens é imprescindível à sustentabilidade hídrica como abordagem emergente na gestão de águas. A reidratação das paisagens pode restabelecer funções e processos biofísicos naturais a partir da proteção da biodiversidade em áreas que se encontram historicamente degradadas. Do mesmo modo, permite a resiliência aos extremos climáticos e maior lucratividade à produção rural (HURDITCH, 2019).

2.3 DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS

Um número limitado de aquíferos armazenam boa parte das águas subterrâneas do planeta e apenas estudos hidrogeológicos conseguem dar visibilidade às extensões espaciais. Para determinados propósitos ou conveniência, unidades espaciais são usadas para a apresentação das informações coletadas, costumeiramente por sistemas aquíferos ou por países. Do ponto de vista hidrogeológico, os limites ou fronteiras político-administrativas não são satisfatórias para a análise de processos relacionados à circulação das águas subterrâneas. Por isso, os hidrogeólogos usam uma unidade espacial amplamente aceita no seu campo de conhecimento, que tenha uma identidade intrínseca, inclusive com um nome próprio, e que seja possível o intercâmbio de informações no mesmo nível conceitual, como os aquíferos. Para o propósito de identificação das águas subterrâneas, na escala de um país, a regionalização por critérios hidrogeológicos foi introduzida inicialmente pelo conceito de “províncias hidrogeológicas”, de Meinzer (1923), para os Estados Unidos da América (EUA). A aplicação forneceu uma imagem das grandes áreas de águas subterrâneas para um país continental, a qual depois foi adaptada às particularidades da Austrália e da América do Sul (MARGAT e VAN DER GUN, 2013).

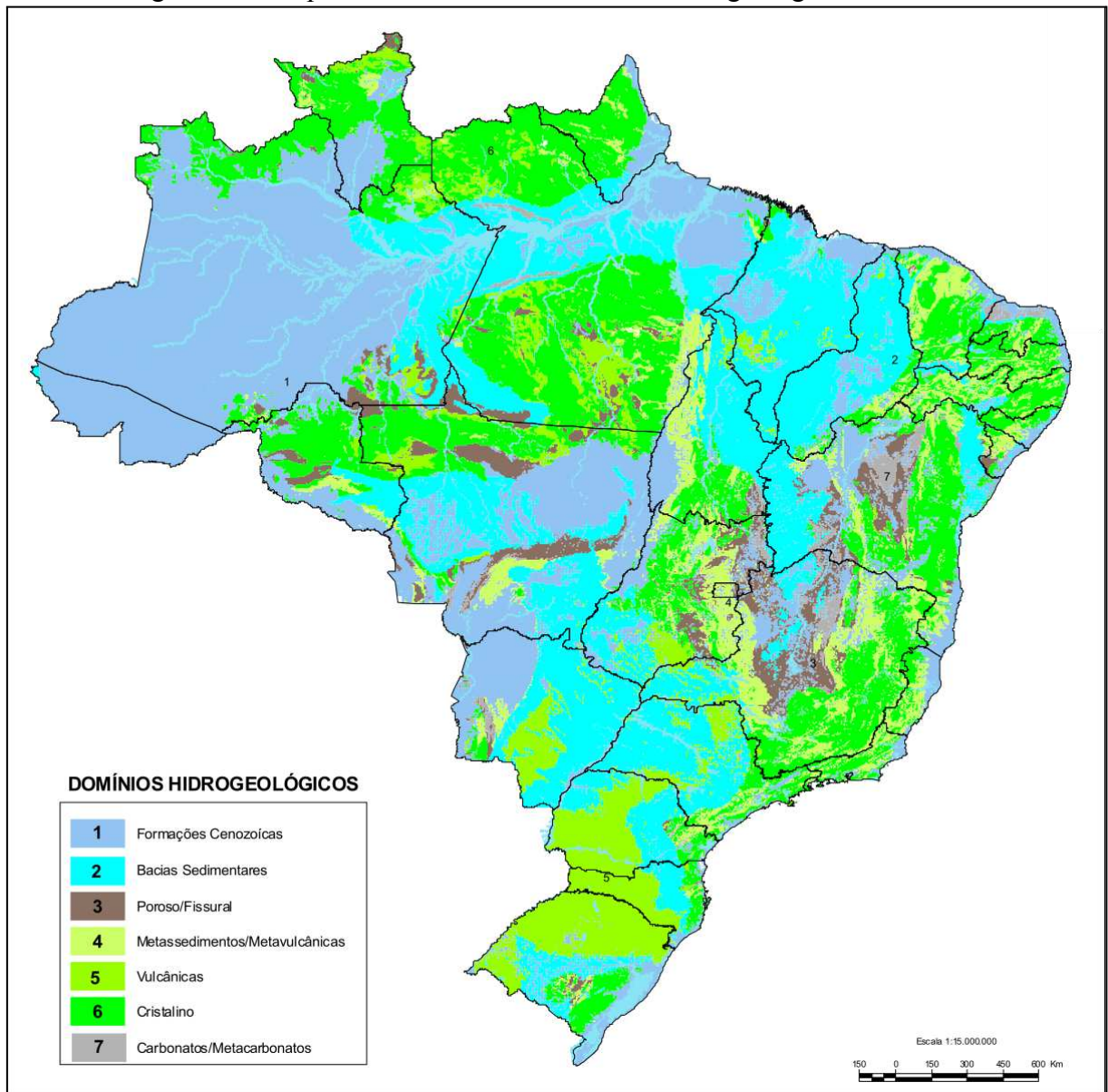
2.3.1 Classificação hidrogeológica do Brasil

O termo “domínio hidrogeológico” utilizado no Brasil, pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), atual Serviço Geológico do Brasil (SGB), remonta ao trabalho de Pessoa, Mente e Leal (1980), que estabeleceu a primeira regionalização do país em “províncias hidrogeológicas”, na escala 1:2.500.000. A província hidrogeológica, conceito proposto oficialmente pela CPRM, é uma área que possui similaridade das características gerais de ocorrência das águas subterrâneas. A regionalização dessas águas no Brasil foi

inspirada na abordagem norte-americana, com base nos trabalhos de Meinzer (1923) e Thomas (1952), realizadas durante o século XX. Conforme Pessoa, Mente e Leal (1980), a descrição das regiões hidrogeológicas dos Estados Unidos considerou uma combinação de critérios particulares a cada região, dentre eles, os tipos de litologia, morfologia, tectônica, clima, paleoclima e outros aspectos geográficos, os quais poderiam ser aplicados a outras áreas de grande extensão territorial, tal como no Brasil.

Em 2007, foi lançado pela CPRM o Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, na escala 1:2.500.000. Esse mapa foi elaborado com a generalização e reclassificação da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, de 2004 (CPRM, 2007). O conceito de domínio hidrogeológico foi concebido para a produção do Mapa de Domínios Hidrogeológicos da Bahia, em 2004. Mais tarde, o mapeamento foi estendido para outros estados da federação em escala nacional (Figura 25). Diferentemente das províncias hidrogeológicas, que consideravam, além de fatores geológicos, os fatores fisiográficos como critério de classificação regional das águas subterrâneas (CPRM, 1982), os domínios hidrogeológicos são compreendidos como “entidades resultantes do agrupamento de unidades geológicas com afinidades hidrogeológicas, tendo como base principalmente as características litológicas das rochas” (BOMFIM, 2010, p. 4).

Figura 25 – Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil.



Fonte: CPRM (2007).

No Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, as unidades geológicas mais próximas da superfície⁵ da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, de 2004, foram agrupadas pelo critério de afinidades hidrogeológicas em 7 domínios (Figura 25): Formações Cenozoicas, Bacias Sedimentares, Poroso/Fissural, Metassedimentos/Metavulcânicas, Vulcânicas, Cristalino, e Carbonatos/Metacarbonatos (BOMFIM, 2010).

O conceito de domínio hidrogeológico também integra o sistema de classificação francês de entidades hidrogeológicas. Estas são caracterizadas pelo comportamento

⁵ Observa-se, por exemplo, que o Sistema Aquífero Guarani (SAG) ocupa área muito maior do que a que consta do mapa, já que está sotoposto ao Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), e mesmo ao Sistema Aquífero Bauru, em toda a área de afloramento destes.

hidrogeológico e pela idade de parte do espaço geológico, podendo ser aquíferas ou não-aquíferas. As entidades hidrogeológicas estão agrupadas em três níveis de escala e quanto ao potencial aquífero. No primeiro nível, há o grande sistema aquífero e o grande domínio hidrogeológico. No segundo nível, tem-se o domínio hidrogeológico e o sistema aquífero. As entidades que fazem parte do último nível são a unidade aquífera, a unidade semipermeável e a unidade impermeável. Enquanto o grande domínio hidrogeológico é uma entidade espacial de referência com diversos terrenos, caracterizados pela litologia e estratigrafia, o domínio hidrogeológico está em um nível hierárquico menor. O domínio hidrogeológico pode estar situado em um grande domínio hidrogeológico, bem como de um grande sistema aquífero (sistema físico de conexão hidráulica entre um ou mais unidades aquíferas demarcado por limites litoestratigráficos e/ou estruturais), de modo que a subdivisão pode ocorrer pela litologia, potenciometria, estrutura, hidráulica, geoquímica e estratigrafia (PETIT *et al.*, 2003 apud MACHADO, 2005). Como não há uma nota explicativa para o Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, uma eventual influência do sistema francês na sua elaboração não foi explicitada.

A publicação mais recente de hidrogeologia no país, o Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo, de 2014, na escala 1:5.000.000 (CPRM, 2014), traz o termo domínio hidrogeológico como sendo correspondente ao termo unidade hidrolitológica, incorporado a uma nova metodologia de representação proposta pela CPRM. O Manual de Cartografia Hidrogeológica (DINIZ *et al.*, 2014) inovou com uma uniformização das nomenclaturas referentes às classificações das águas subterrâneas através da apresentação de uma estrutura de taxonomia hidrogeológica (Figura 26). Até então havia diferentes formas de classificação e representação hidrogeológica, mas que não esclareciam a sua concepção. Nessa proposta, a unidade básica de referência para o sistema de classificação é o aquífero⁶ (formação geológica), denominado de unidade litológico-estratigráfica. Mesmo um aquífero pode conter variações locais ou regionais de produtividade e não coincidir com os limites das unidades estratigráficas. Assim, pelo fato de um aquífero poder ser subdividido, considera-se que a

⁶ Conforme Diniz *et al.* (2014, p. 43), o aquífero (do latim *acqua* = água e *fero* = conduzir) diz respeito “a um estrato ou formação geológica capaz de armazenar e transmitir água em seus poros ou vazios, de forma que a mesma possa ser economicamente aproveitada pelo homem para suprir suas necessidades”. O aquífero diferencia-se do aquícludo (do latim *claudere* = conter), que “é definido como uma formação geológica que contém água em seu interior até a saturação, sendo incapaz de transmiti-la”, como as unidades formadas por argilas. Se houver unidades com argilas siltosas ou arenosas, é provável que haja um aquífero (do latim *tardare* = retardar), o qual “refere-se a formações geológicas que, embora contendo apreciáveis quantidades de água, a transmitem muito lentamente”. Já um aquífugo (do latim *fugere* = fugir) indica “formações geológicas que não contêm nem transmitem água” a exemplo de maciços graníticos (pouco fraturados).

menor unidade da taxonomia hidrogeológica é a unidade hidroestratigráfica, a qual é caracterizada por “grupos de formações geológicas, temporalmente relacionadas, que armazenam e transmitem águas subterrâneas de forma semelhante e com produtividades da mesma ordem de grandeza”. Ao contrário da unidade hidrolitológica, ela tem uma delimitação objetiva, ao ser constituída por uma litologia singular ou agrupamento similar de hidrolitologias, e características hidrodinâmicas que possibilitam a sua individualização em relação ao conjunto total (DINIZ *et al.*, 2014, p. 50).

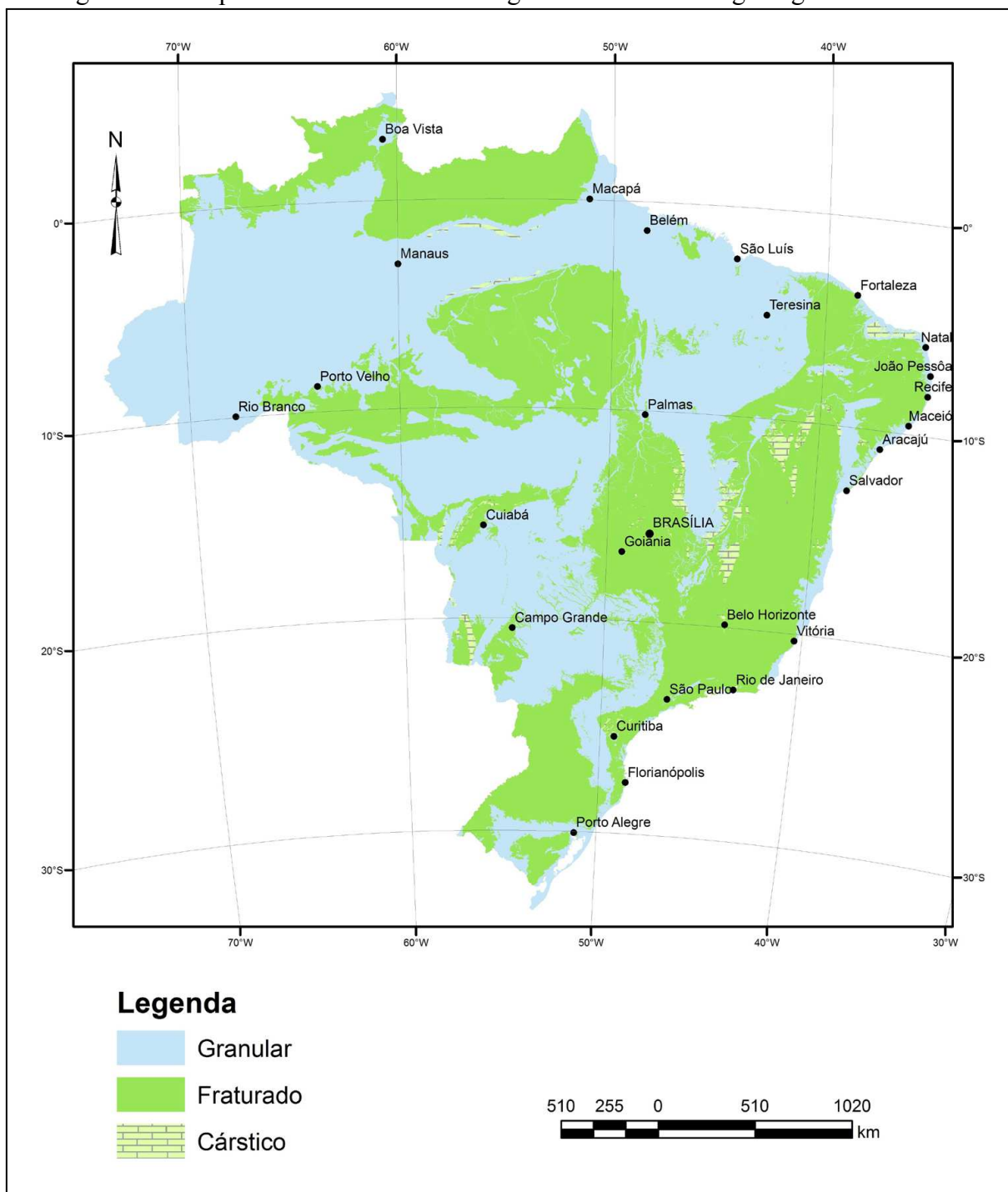
Figura 26 – Ilustração da taxonomia hidrogeológica proposta pela CPRM.



Fonte: Diniz *et al.* (2014, p. 49).

A classe taxonômica superior ao aquífero é o sistema aquífero, sendo a unidade prática de exploração e pesquisa. O sistema aquífero é formado por dois ou mais aquíferos que podem estar, ou não, relacionados entre si. Por sua vez, o domínio hidrogeológico, aqui chamado de unidade hidrolitológica, é a maior classe hierárquica taxonômica e está acima do sistema aquífero. Ela engloba “grupos de unidades geológicas que armazenam e transmitem águas subterrâneas de forma semelhante” e é tridimensional. Seus limites não são concretos, havendo superposição com outras unidades da sua mesma classe hierárquica e dimensões arbitrárias. As unidades hidrolitológicas têm como referência a litologia predominante e estão categorizadas em (Figura 27): granular/poroso, fraturado e cárstico (DINIZ *et al.*, 2014, p. 50).

Figura 27 – Mapa das unidades hidrolíticas/domínios hidrogeológicos do Brasil.



Fonte: Diniz *et al.* (2014, p. 103).

2.3.2 Classificação hidrogeológica do estado de Santa Catarina

As águas subterrâneas do estado de Santa Catarina apresentam uma distribuição espacial diferenciada em virtude da diversidade de rochas que possibilitam a sua retenção e/ou

circulação. Originalmente, o estado de Santa Catarina foi subdividido por Brito Neves *et al.* (1973) em quatro províncias hidrogeológicas: Cristalina, Paleozoica, Mesozoica e Cenozoica. Os critérios geológico e fisiográfico foram utilizados para essa classificação. Na Província Cristalina, as águas subterrâneas eram caracterizadas por circularem por fraturas e juntas das rochas pré-cambrianas e eo-paleozoicas, situadas na área geomorfológica do planalto cristalino e das serras litorâneas. A sequência de camadas da Bacia Sedimentar do Paraná, a qual estrutura o planalto sedimentar e é delimitada a oeste pelas escarpas basálticas, faz parte da província Paleozoica, cujas unidades funcionam eventualmente como aquífero e que, via de regra, têm ocorrência de anisotropia. A Província Mesozoica compreende os contrafortes da Serra Geral e o planalto basáltico da área centro-ocidental de Santa Catarina. Essa província seria formada por dois aquíferos de litologias diferentes, mas que apresentam comportamento estrutural e disposição fisiográfica interdependente: o Botucatu e o Serra Geral. Por último, a Província Cenozoica é referente à área de abrangência da planície costeira, formada por sedimentos litorâneos e fluviais espriados.

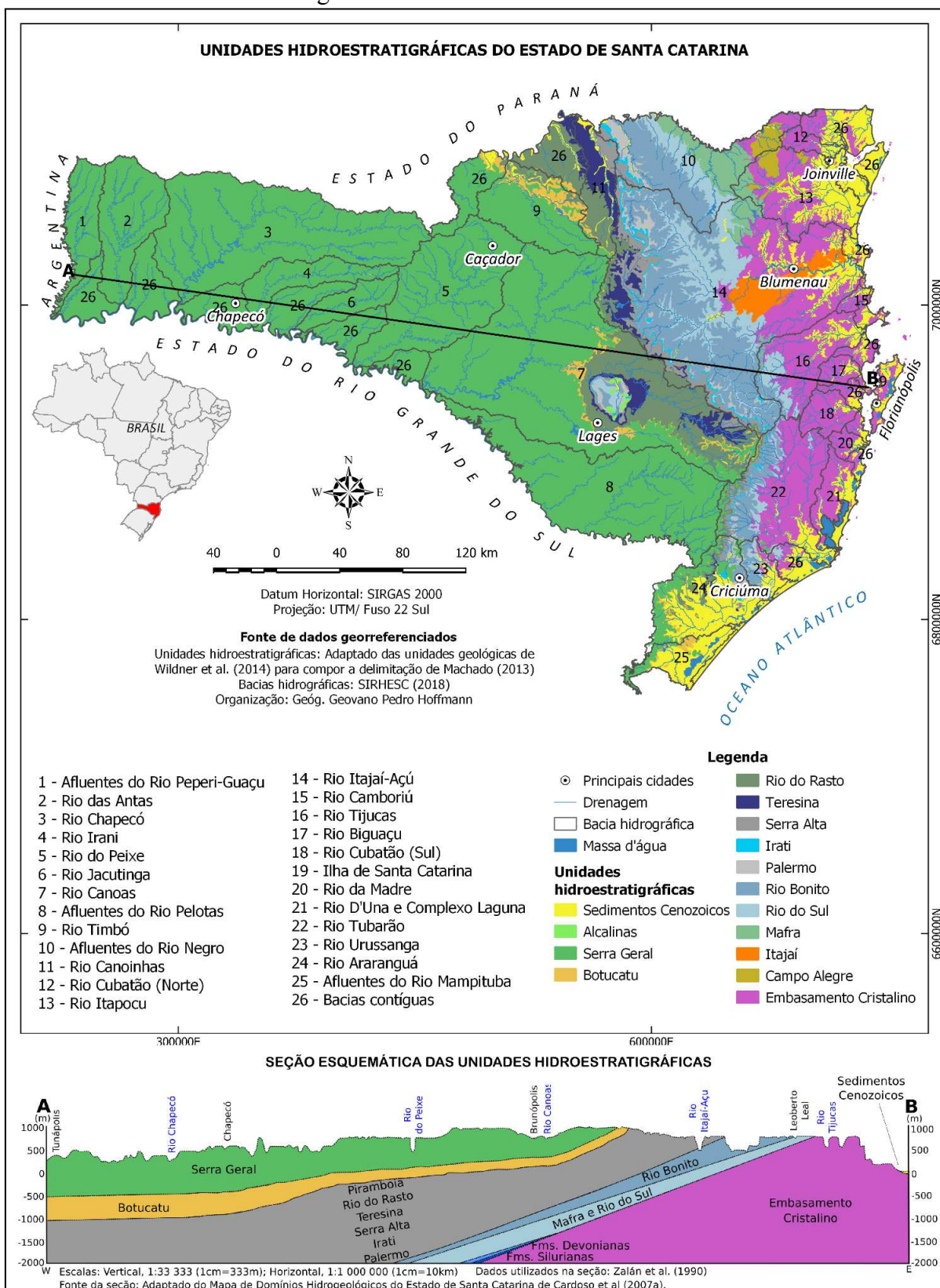
O critério de regionalização de Santa Catarina em províncias hidrogeológicas é condizente com o esboço geológico do Atlas Geográfico de Santa Catarina, de 1958, em quatro regiões geológicas (TAKEDA, 1958): embasamento cristalino, faixa sedimentar ou do *Gondwana*, planalto de lavas e zonas de sedimentação recente. Essa classificação hidrogeológica de Santa Catarina foi publicada, com mais detalhes, por Brito Neves *et al.* (1979), em um momento em que já se discutia sobre as províncias hidrogeológicas do Brasil (PESSOA, MENTE e LEAL, 1980), que deu origem, em 1983, ao Mapa Hidrogeológico do Brasil.

A partir do Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, em 2007, a ANA, em parceria com a Diretoria de Recursos Hídricos da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável, publicou o Mapa de Domínios Hidrogeológicos do Estado de Santa Catarina (STALLBAUM *et al.*, 2018), na escala de 1:1.000.000. Na sua elaboração foram considerados os limites das unidades geológicas da Carta Geológica do Brasil, de 2004; do Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina, na escala 1:500.000, de 1986; e dados de poços tubulares (CARDOSO *et al.*, 2007b).

O mais recente estudo hidrogeológico com abrangência para o estado de Santa Catarina é o de Machado (2013). Esse trabalho seguiu a proposta do Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo, de 2014, em classificar as águas subterrâneas somente pela menor classe da taxonomia hidrogeológica, ou seja, em unidades hidroestratigráficas. Essas unidades

não estão agrupadas por unidades hidrolitológicas, conceito oficialmente adotado para os domínios hidrogeológicos pela CPRM. Na Figura 28, estão representadas as unidades hidroestratigráficas mapeadas no estado de Santa Catarina: Embasamento Cristalino, Campo Alegre, Itajaí, Mafra, Rio do Sul, Rio Bonito, Palermo, Irati, Serra Alta, Teresina, Rio do Rasto, Botucatu, Serra Geral, Alcalinas e Sedimentos Cenozoicos. A Unidade Hidroestratigráfica Piramboia, não aflorante, é a única que não pode ser representada. O mapa da Figura 28 foi elaborado a partir da reclassificação das feições aflorantes das unidades geológicas do Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina, na escala 1:500.000 (WILDNER *et al.*, 2014) com base na representação individual de cada unidade hidroestratigráfica, apresentada no trabalho de Machado (2013).

Figura 28 – Mapa das unidades hidroestratigráficas aflorantes e das principais bacias hidrográficas no estado de Santa Catarina.



Fonte: Seção esquemática adaptada de Zalán *et al.* (1990, apud Cardoso *et al.*, 2007a); Organização do mapa para fins do presente estudo com a adaptação das unidades geológicas de Wildner *et al.* (2014) para compor a delimitação das unidades hidroestratigráficas de Machado (2013), sobrepostas pela divisão hidrográfica estadual em bacias hidrográficas de SIRHESC (2018).

Por essa última classificação, os aquíferos do estado de Santa Catarina dividem-se em dois tipos principais quanto à porosidade: 1) intergranulares (algumas das unidades hidroestratigráficas da Bacia Sedimentar do Paraná, como Mafra, Rio do Sul, Rio Bonito, Rio do Rasto, Piramboia e Botucatu; e a unidade hidroestratigráfica Sedimentos Cenozoicos); e 2) fraturados (unidades hidroestratigráficas Embasamento Cristalino, Campo Alegre, Serra Geral e Alcalinas). De menor abrangência, o aquífero do tipo carste, com porosidade por fraturamento e dissolução, relacionado ao Grupo Brusque, faz parte da unidade hidroestratigráfica Embasamento Cristalino. As outras unidades hidroestratigráficas (como Itajaí e algumas das unidades que fazem parte da Bacia Sedimentar do Paraná - como Palermo, Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto) podem comportar-se tanto como aquíferos intergranulares quanto como aquíferos fraturados, a depender das condições locais e regionais de diagênese e compactação em que se encontram. Por isso, nem sempre o fato de um aquífero ser intergranular ou fraturado é um indicador de sua disponibilidade (MACHADO, 2013).

Com base na produtividade dos poços, verifica-se que os aquíferos que apresentam melhor armazenamento das águas subterrâneas são aqueles das unidades hidroestratigráficas Serra Geral, Botucatu e de alguns dos aquíferos da unidade hidroestratigráfica Sedimentos Cenozoicos. Em contrapartida, os aquíferos menos favoráveis ao armazenamento estão relacionados à unidade hidroestratigráfica Embasamento Cristalino, às rochas sedimentares eo-paleozoicas (unidades hidroestratigráficas Campo Alegre e Itajaí) e a determinadas formações permianas situadas em áreas de relevo desfavoráveis à recarga. No Quadro 9 são apresentadas as principais características geológicas e hidrogeológicas de cada unidade hidroestratigráfica representada na Figura 28 (MACHADO, 2013).

Quadro 9 – Síntese das características geológicas e hidrogeológicas das unidades hidroestratigráficas do estado de Santa Catarina: das mais antigas até as mais recentes no tempo geológico.

Unidade hidro-estratigráfica	Porosidade	Síntese das características geológicas e hidrogeológicas
Embasamento Cristalino	Poroso por fraturamento	Formado por um complexo conjunto de rochas ígneas e metamórficas, como, por exemplo, granitos, granitoides, gnaisses, mármore, xistos e granulitos. Os principais grupos geológicos e complexos que apresentam características hidrogeológicas semelhantes são o Complexo Granulítico de Santa Catarina, as rochas granito-gnáissicas e migmatíticas do Cráton Itapema-Camboriú e o cinturão granítico Dom Feliciano (Suíte Serra do Mar, Suíte Granítica Guabiruba/Valssungana e Batólito de Florianópolis). No geral, a circulação de águas ocorre através dos mantos de alteração superficial e das fraturas. As altitudes caracterizam um relevo acidentado, com altitudes que podem variar de 200 a 1000 metros. Por isso, funciona predominantemente como área de recarga. Geralmente, a captação é por aproveitamento de fontes de encostas. Pela elevada profundidade dos níveis potenciométricos, os poços tendem a ser profundos a ponto de serem antieconômicos.
Campo Alegre	Poroso por fraturamento	Formada pelas subunidades Bateias (fácies conglomerática e arenítica grossa), Campo Alegre (porção basal da sequência vulcânica constituída principalmente por basaltos e andesitos; porção intermediária formada de rochas piroclásticas e sedimentos epiclásticos finos; e porção superior com rochas vulcânicas ácidas e básicas associadas aos fluxos traquítico e riolítico) e Rio Turvo (em contato transicional com as rochas piroclásticas subjacentes e intercalação entre tufos de grão fino com rochas epiclásticas). Esse conjunto litológico faz parte da Bacia Vulcanossedimentar de Campo Alegre e é semelhante ao Gráben de Corupá. Comporta-se como um aquífero poroso intergranular nas bordas da Bacia de Campo Alegre, de modo que a compactação local das litologias pode favorecer o armazenamento por fraturamento. Por outro lado, a porosidade por fraturas é predominante na área dos derrames vulcânicos ácidos e básicos, e sedimentos de origem vulcânica, do interior da bacia. Assim como na Unidade Hidroestratigráfica Embasamento Cristalino, há menor armazenamento de águas nas áreas de maior declividade e relevo localmente montanhoso, mesmo com a presença de fraturas nas áreas de rochas vulcânicas.
Itajaí	Poroso intergranular e/ou por fraturamento	Formada pela sucessão de quatro sequências deposicionais de arenitos e siltitos, com origem de sistemas deltaicos e turbidíticos, havendo rochas vulcânicas sedimentares e levemente metamorfizadas que recobrem o Complexo Granulítico. Possui duas subunidades basais: Gaspar (inferior) e Campo Alegre (superior). É um aquífero multicamadas, podendo ser classificado como poroso intergranular pela sua litologia; contudo, o baixo grau de metamorfismo pode induzir o armazenamento por fraturas. As condições de recarga e transmissão de água assemelham-se ao embasamento cristalino pela influência do relevo, de modo que a maior potencialidade do aquífero encontra-se em planícies e mantos de alteração.
Mafra	Poroso intergranular	Formado por arenitos, diamictitos, varvitos, siltitos e argilitos. Faz parte do Grupo Itararé, sendo localizado entre as Formações Campo do Tenente e Rio do Sul, recobrendo a Unidade Hidroestratigráfica Embasamento Cristalino. Nas áreas aflorantes tem espessura de 50 a 200 metros, sendo inviável a sua captação quando em subsuperfície, em razão da elevada profundidade e à intensa mineralização. A captação dos poços é variável devido às diferenças litológicas e estruturais do aquífero. Apresenta grande produtividade quando está confinada por um conjunto, em grande parte, pelítico. Supõe-se que a entrada de águas ocorre por fraturamento tectônico ou pelas camadas arenosas, tendo em vista que a composição predominante é de folhelhos e

Unidade hidroestratigráfica	Porosidade	Síntese das características geológicas e hidrogeológicas
		argilitos.
Rio do Sul	Poroso intergranular	Formado por rochas areno-argilosas, como folhelhos e siltitos, conglomerados, diamictitos, ritmitos, varvitos e arenitos. Integra a parte intermediária do Grupo Itararé, recobrando as unidades hidroestratigráficas Rio do Sul e Embasamento Cristalino. Tem uma faixa aflorante que varia entre 2 e 15 quilômetros. A capacidade dos poços varia conforme as condições de sedimentação de cada litologia e da estruturação tectônica. Apesar de ter na sua composição litologias de granulometria fina, como argilitos e folhelhos, a produção de poços é considerada mais elevada do que o esperado, possivelmente pela entrada de águas por fraturamento tectônico.
Rio Bonito	Poroso intergranular	Formado pelas subunidades basal Triunfo (arenitos e, secundariamente, folhelhos, argilitos, siltitos e camadas de carvão), subunidade intermediária Paraguaçu (siltitos e folhelhos) e subunidade superior Siderópolis (arenitos intercalados com siltitos, folhelhos e carvão, cuja principal camada é denominada de Barro Branco). Assenta-se, em grande parte, sobre a Unidade Hidroestratigráfica Rio do Sul e, na região carbonífera do estado, encontra-se sobre a Unidade Hidroestratigráfica Embasamento Cristalino. A subunidade Triunfo é conhecida por sustentar o relevo do tipo tabuliforme entre Ituporanga e Rio do Sul. Comparada às outras unidades hidroestratigráficas gondwânicas, é a que tem as melhores produtividades hídricas especialmente a subunidade Siderópolis. Tem graus variados de potencialidade, devido às características litológicas e de deposição das suas subunidades, havendo também diferenças entre as áreas aflorantes e as confinadas. A subunidade Paraguaçu é considerada um aquícluído e confina a subunidade Triunfo, o que a leva a condições de produtividade baixa.
Palermo	Poroso intergranular e/ou por fraturamento	Formado por rochas siltico-argilosas e recobre a Unidade Hidroestratigráfica Rio Bonito, com faixa de extensão regional que varia de 0,5 a 10 quilômetros e espessura média de 100 metros nas áreas aflorantes. É um aquífero pouco significativo em razão da predominância de granulometria fina. Os fraturamentos, provocados pela alta consolidação da litologia, são locais secundários de armazenamento e condutores hidráulicos que promovem a recarga natural. Nas áreas de afloramento, constitui um sistema junto com os arenitos da Unidade Hidroestratigráfica Rio Bonito.
Irati	Poroso intergranular e/ou por fraturamento	Formada pelas subunidades inferior Taquaral (argilitos, siltitos e folhelhos) e superior Assistência (folhelhos cinza-escuro intercalados com folhelhos pirobetuminosos e calcários), aflorando em uma faixa entre 0,5 e 3 quilômetros de largura. Recobre exclusivamente a Unidade Hidroestratigráfica Palermo. Os <i>sills</i> de diabásio são comuns nessa Unidade e fazem variar a espessura entre 10 e 30 metros. É um aquífero que normalmente tem as suas águas misturadas com as de outras unidades hidroestratigráficas, sendo de difícil caracterização. Possui um sistema de fraturas provocadas pela consolidação da litologia e pelas intrusões de diabásio (<i>sills</i> e diques fraturados), que auxilia na condutividade hidráulica. Nos contrafortes da Serra Geral, essa Unidade tem recarga e armazenamento insignificantes, funcionando como aquícluído por causa da declividade.
Serra Alta	Poroso intergranular e/ou por fraturamento	Formado por folhelhos e siltitos com fratura conchoidal, recobrando exclusivamente a Unidade Hidroestratigráfica Irati. Nas áreas de afloramento, a espessura média é de 90 metros. Por ser predominantemente pelítica, estar em área de encostas com elevadas declividades e ter baixa produtividade, é uma unidade que pode ser caracterizada como um aquícluído ou um aquícluído. Localmente pode ser um aquífero significativo, em razão de descontinuidade nas estratificações ou fraturamentos, como nos municípios de Bom Retiro e Três Barras.

Unidade hidroestratigráfica	Porosidade	Síntese das características geológicas e hidrogeológicas
Teresina	Poroso intergranular e/ou por fraturamento	Formada por argilitos, siltitos e folhelhos, apresentando intercalação rítmica de arenitos, além de lentes e concreções carbonáticas. Recobre exclusivamente a Unidade Hidroestratigráfica Serra Alta. Tem pouca importância hidrogeológica quando confinado, dado que suas águas apresentam intensa mineralização e estão sob elevada profundidade. A espessura nas áreas de afloramento varia entre 80 e 100 metros. Assim como outras unidades hidroestratigráficas gondwânicas, as descontinuidades, os fraturamentos e os falhamentos das camadas influenciam a condutividade hidráulica. A captação é realizada com águas misturadas de outras unidades hidroestratigráficas. No geral, é um aquífero com baixa produtividade, com exceção do Domo de Lages (entre os municípios de Otacílio Costa e Lages) e entre os municípios de Papanduva e Canoinhas.
Rio do Rasto	Poroso intergranular	Formado pelas subunidades Serrinha (arenitos finos e bem selecionados intercalados com argilitos e siltitos amarronzados, avermelhados, bordôs ou cinza-esverdeados, podendo conter lentes de calcário margoso) e Morro Pelado (arenitos finos avermelhados e intercalados com argilitos e siltitos arroxeados). Recobre a Unidade Hidroestratigráfica Teresina de modo transicional e tem contato exclusivo e abrupto, no seu topo com a Unidade Hidroestratigráfica Botucatu. Cada subunidade tem uma espessura que varia de 100 a 250 metros. Onde aflora, age como aquífero poroso e fraturado, devido à consolidação dos arenitos e com comportamento livre a semiconfinado. Sob confinamento pelo Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral, comporta-se como aquífero poroso intergranular e com armazenamento reduzido. Tanto nas áreas aflorantes como nas áreas de confinamento tem comportamento de aquífero multicamadas. Sua potencialidade é variável, podendo ser aproveitado por nascentes ou poços de moderada profundidade.
Piramboia	Poroso intergranular	Formado por arenitos siltico-argilosos com intercalações de siltitos e argilitos. Recobre, com contato abrupto, a Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto, indicando a mudança da deposição por mares para ventos, e também contato brusco com a Unidade Hidroestratigráfica Botucatu. É encontrado apenas sob confinamento, com uma espessura média de 70 metros, mas não é contínuo em sua extensão, estando ausente nas áreas de afloramento da unidade Botucatu no estado. Constitui um sistema aquífero com a Unidade Hidroestratigráfica Botucatu e suas águas são captadas conjuntamente.
Botucatu	Poroso intergranular	Formado por arenitos e está confinado pela Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral. Não é completamente contínuo, de modo que perfurações indicam que pode haver o contato direto da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral com a Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto. Nas áreas de afloramento tem espessura entre 50 e 120 metros, enquanto que não ultrapassa 70 metros sob confinamento. Juntamente com a Unidade Hidroestratigráfica Piramboia, constitui o Sistema Aquífero Guarani (SAG), de alta permeabilidade e porosidade, homogêneo e de grandes dimensões, sendo um dos mais importantes sistemas aquíferos do planeta e com alta potencialidade hídrica.
Serra Geral	Poroso por fraturamento	Formado por basaltos e, na porção médio-superior, intercala com manifestações ácidas, como riolitos e riodacitos. Tem até aproximadamente 1500 metros de espessura e estende-se por cerca de metade da área territorial do estado de Santa Catarina, correspondendo ao teto do platô gondwânico em Santa Catarina. Não há níveis-guia para a sua subdivisão, porém, no Oeste do estado, diferencia-se em: Fácies Chapecó, Fácies Caxias, Fácies Campo Erê, Fácies Esmeralda, Fácies Gramado, Formação Parapanema e Formação Serra Geral - indivisa. Tem estrutura concordante com a Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, por ela recoberta, e discordante com as demais

Unidade hidroestratigráfica	Porosidade	Síntese das características geológicas e hidrogeológicas
		<p>unidades hidroestratigráficas da Bacia do Paraná. Juntamente com a unidade Botucatu, é uma das mais importantes fontes de águas subterrâneas do estado. As águas ocorrem de forma livre, mas podem estar sob confinamento em elevadas profundidades. A boa condutividade hidráulica e porosidade ocorrem pelas intercalações de zonas amigdaloides, leitos de paleossolos, contatos entre derrames ou de zonas com intemperismo avançado. O fraturamento é ocasionado por fraturas e falhas nas direções NE e NW. Possui a maior quantidade de poços perfurados, pela menor profundidade da captação, menor custo econômico e maior disponibilidade hídrica. Inclusive, apresenta poços jorrantes em conformidade com a variação de nível potenciométrico.</p>
Alcalinas	Poroso por fraturamento	<p>Formada pelo evento de magmatismo ígneo intrusivo (rochas alcalinas leucocráticas, rochas ultrabásicas alcalinas, brechas vulcânicas intrusivas e carbonatitos) posterior à constituição da sequência de rochas sedimentares gondwânicas. É aflorante na estrutura do Domo de Lages, ao numa área de 50 km², situada no Planalto Centro-Oriental. Os agrupamentos de rochas funcionam como uma unidade hidroestratigráfica única, com circulação de águas por fraturamento. O armazenamento de água e o fluxo subterrâneo são desfavoráveis nessa unidade. A captação de águas por poços é inviável, mas há captação de fontes de pequena vazão.</p>
Sedimentos Cenozoicos	Poroso intergranular	<p>Formada pelo sistema de leques aluviais (lamas, areias, cascalhos, blocos e matacões depositados ao longo da rede de drenagem em depósitos de fundo de canal, rompimento de diques marginais, meandros e planícies de inundação); pelos depósitos flúvio-deltaicos-marinhos (lentes e leitos de sedimentação clástica com interdigitação, como na região entre Tubarão e Laguna); pelas barreiras pleistocênicas (sedimentos praias marinhos recobertos por sedimentação eólica, como no município de Ibituba); e pelos depósitos paleolagunares (turfas e depósitos de lama com bastante matéria orgânica). A Unidade ocorre ao longo de toda a faixa litorânea do estado, sendo interrompida, em determinados pontos, especialmente pela Unidade Hidroestratigráfica Embasamento Cristalino. Sua constituição remete a processos que ocorreram no Terciário e continuam no Quaternário, de modo que recobre unidades hidroestratigráficas do pré-cambriano e gondwânicas. A Unidade apresenta até 60 metros de espessura e comporta-se como aquífero livre, com nível d'água próximo da superfície, mas pode encontrar-se semiconfinada quando há camadas e lentes de argila no seu perfil litológico. Os poços costumam ser produtivos e a condutividade hidráulica é elevada. O fácies arenoso de praia lagunar é o mais produtivo, pela sua litologia de granulometria fina a muito fina, enquanto que o fácies arenoso de fundo lagunar é semelhante, mas a presença de argilas e matéria orgânica prejudicam a sua qualidade. O fácies areno-lamoso é o menos produtivo, de forma que possui níveis estáticos profundos e inviabiliza a perfuração de poços ponteiros. A barreira marinha pleistocênica está situada entre os municípios de Araranguá e Garopaba e é o sistema aquífero mais explorado da planície costeira. Apresenta poços com vazões diversas e nível estático variável, com vazões de 5m³/h até 60m³/h.</p>

Fonte: Adaptado de Machado (2013).

Uma mesma unidade hidroestratigráfica pode conter aquíferos, aquíferos e aquíclides, impossibilitando a designação de um comportamento único para cada unidade. Da mesma forma, unidades contíguas podem ter um comportamento hidráulico semelhante

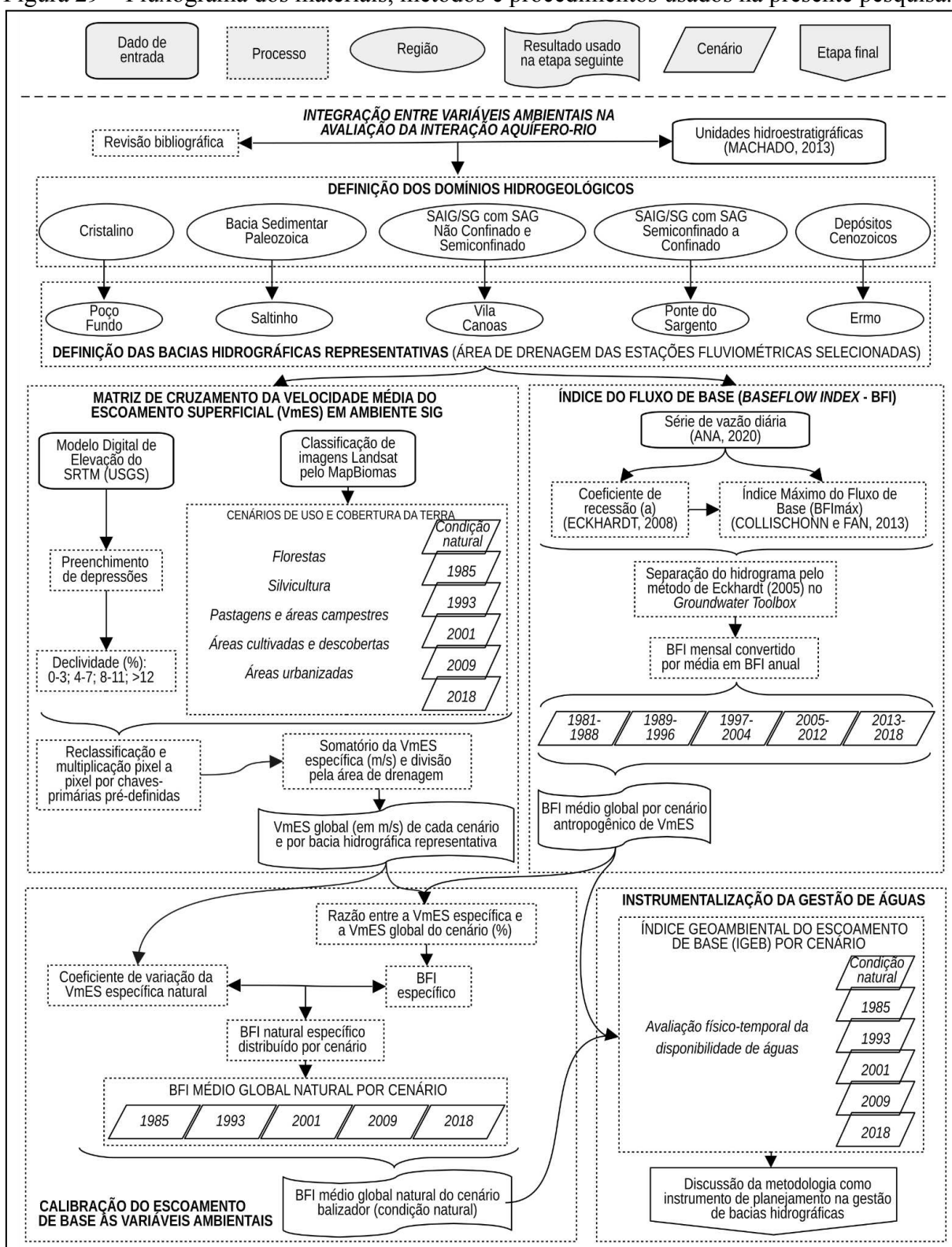
(MACHADO, 2013). Em razão disso, as 16 unidades hidroestratigráficas do estado de Santa Catarina foram reclassificadas por Machado (2013) em três zonas aquíferas: 1) aquíferos intergranulares (contendo aquíferos extensos e altamente produtivos; e aquíferos produtivos locais ou descontínuos ou aquíferos extensos e produtividade moderada); 2) aquíferos fraturados (contendo aquíferos extensos e altamente produtivos; e aquíferos produtivos locais ou descontínuos ou aquíferos extensos e produtividade moderada); e 3) Camadas intergranulares ou rochas fraturadas com águas subterrâneas locais limitados ou isentas dessas águas (contendo camadas/rochas com recursos limitados de água subterrânea local; e camadas/rochas praticamente isentas de recursos de água subterrânea).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente proposta metodológica consistiu em avaliar a situação de disponibilidade de escoamento de base em função dos impactos provocados pela ação antropogênica no decorrer do tempo nas paisagens. Trata-se da definição de um cenário balizador, ou nível de medida máximo, de disponibilidade de águas nas bacias hidrográficas representativas dos cinco domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina pela calibração do escoamento de base às variáveis ambientais.

A integração entre variáveis ambientais (Figura 29) exigiu a revisão bibliográfica sobre os temas da gestão de águas no Brasil e em Santa Catarina; da interação aquífero-rio; e ainda sobre os domínios hidrogeológicos. Usando o estado de Santa Catarina como recorte espacial, foram definidos os domínios hidrogeológicos a partir do trabalho de levantamento das unidades hidroestratigráficas de Machado (2013). As bacias hidrográficas representativas de cada domínio hidrogeológico referem-se à área de drenagem à montante das estações fluviométricas elencadas. Como critério, foi selecionada uma estação fluviométrica em cada domínio hidrogeológico que apresentasse séries longas de vazão para cursos d'água de regime perene, e com o mínimo de interferências antropogênicas na regulação da vazão, como obras de engenharia artificiais ou massas d'água.

Figura 29 – Fluxograma dos materiais, métodos e procedimentos usados na presente pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

Foram escolhidas variáveis ambientais (Quadro 10) que permanecem estáticas no tempo de vida das gerações humanas, como a variável domínios hidrogeológicos, variável

área das bacias hidrográficas representativas e a variável declividade. Por outro lado, as variáveis com oscilação de comportamento ao longo do tempo de vida humana são o Índice Máximo do Fluxo de Base anual médio (*Base Flow Index* - BFI) e o uso e cobertura da terra. As variáveis ambientais do Quadro 10 foram propostas com base em trabalhos desenvolvidos anteriormente por Hoffmann e Nanni (2017) e Hoffmann *et al.* (2022) compreendendo a Velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES) pela combinação do uso e cobertura da terra, área do uso na bacia hidrográfica e declividade.

Quadro 10 – Variáveis ambientais utilizadas no presente estudo para a calibração do Índice de Fluxo de Base (BFI) estimado para as bacias hidrográficas de domínio hidrogeológico.

Variável ambiental	Tipo de variável	Nível de medida
Domínio hidrogeológico	Hidrogeológica	Similaridade entre unidades hidrogeológicas
Área da bacia hidrográfica representativa (km ²)	Hidrológica	Definição das bacias hidrográficas representativas
Índice do Fluxo de Base (<i>Baseflow Index</i> - BFI)		Vazão (m/s)
Declividade (%)	Geomorfológica	Modelo Digital de Elevação
Uso e cobertura da terra (%)	Antropogênica	Florestas (%)
		Silvicultura (%)
		Pastagens e áreas campestres (%)
		Áreas cultivadas e descobertas (%)
		Áreas urbanizadas (%)

Fonte: Elaboração própria.

O comportamento das condições de recessão do escoamento de base nas bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico foi analisado pela estimativa do BFI anual médio. O período de análise compreendeu dados observados de vazão entre 1981 e 2018⁷. Outros estudos usaram, pelo menos, 30 anos (AHIABLAME *et al.*, 2013), 32 anos (WEI *et al.*, 2023), 37 anos (ABOELNOUR, GITAU e ENGEL, 2020) e 40 anos (SOUZA-FILHO *et al.*, 2016) de dados de vazão observada como período de longo prazo de detecção da influência das transformações na paisagem na resposta hidrológica dos aquíferos, através do escoamento de base. Dessa forma, a calibração do presente estudo, que contou com

⁷ Informações adicionais sobre a escolha do ano são apresentadas no item 3.2 ÍNDICE DO FLUXO DE BASE (BASEFLOW INDEX - BFI), dos Materiais e Métodos.

um intervalo de tempo total de 37 anos de dados de vazão em cada bacia hidrográfica representativa, foi considerado suficiente para a verificação do aumento ou redução do escoamento de base liberado pelos aquíferos subjacentes em condição livre, ou semiconfinada, das bacias hidrográficas representativas mediante às mudanças de uso e cobertura da terra.

Em correspondência ao BFI médio global dos cenários de modificação antropogênica (anos de 1985, 1993, 2001, 2009 e 2018), foi estimada a VmES global da bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico por meio de uma matriz de cruzamento da VmES no ambiente do SIG QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2023). Nela, dados do Modelo Digital de Elevação (MDE), do Projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), foram cruzados com classificações de imagens de satélite Landsat, do Projeto MapBiomas, para os cenários observados de uso e cobertura da terra.

O BFI médio global do cenário balizador de disponibilidade de águas (condição natural) ocorreu pela calibração do escoamento de base às variáveis ambientais da bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico. Cada cenário de VmES (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018) foi usado para a distribuição proporcional do BFI médio global na bacia hidrográfica representativa, na forma da razão entre a VmES específica e a VmES global do cenário, a fim de obter o BFI anual médio específico, ou simplesmente, BFI específico.

Ao ser criado um cenário de condição natural simulada de uso e cobertura da terra, tornou-se possível mensurar, usando o Coeficiente de variação da VmES específica natural (CVmES), o quanto do BFI era máximo em disponibilidade na condição natural (BFI médio global do cenário balizador), quando a VmES era mínima na bacia hidrográfica representativa, ou seja, considerando-se um nível de medida inversamente proporcional entre essas duas variáveis. Partiu-se do princípio de que a VmES aumenta com a conversão de cenário de condição natural para cenários modificados de uso e cobertura da terra (pastagens, áreas cultivadas, silvicultura e áreas urbanizadas), enquanto o BFI diminui por consequência. O somatório do BFI natural específico estimado por cada cenário antropogênico de VmES da bacia hidrográfica representativa resultou em um BFI médio global natural por cenário (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018). A média dos cinco valores do BFI médio global natural por cenário de dados observados de VmES resultaram na estimativa do BFI médio global natural do cenário balizador (condição natural simulada) em cada bacia hidrográfica representativa.

Posteriormente, propôs-se um diagnóstico físico-temporal da disponibilidade de águas com o Índice Geoambiental do Escoamento de Base (IGEB) para a instrumentalização

da gestão de águas, que realiza o comparativo dos dados do BFI médio global de cada cenário antropogênico de VmES com o BFI médio global natural do cenário balizador (condição natural simulada) da bacia hidrográfica representativa. Essa avaliação envolve uma interpretação semaforica das variações do *déficit* ou do excedente das águas na paisagem induzida pelas modificações antropogênicas nas bacias hidrográficas. Dentro disso, a metodologia desenvolvida é discutida como instrumento de planejamento no âmbito da gestão de águas por bacia hidrográfica. Por fim, são discorridos sobre os pressupostos que permitem incorporar a abordagem geossistêmica a outra forma de pensar a gestão de águas, tornando-a integrada, integradora e participativa em bacias hidrográficas.

A seguir, os métodos e os procedimentos envolvidos na presente pesquisa são discutidos em maior detalhe, a saber: definição dos domínios hidrogeológicos; Índice do Fluxo de Base (BFI); velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES); calibração do escoamento de base às variáveis ambientais das bacias hidrográficas representativas; e avaliação físico-temporal da disponibilidade do escoamento de base em bacias hidrográficas.

3.1 DEFINIÇÃO DOS DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS

Os domínios hidrogeológicos possibilitam a ocorrência diferenciada da descarga de águas subterrâneas, na forma de escoamento de base, nos sistemas de drenagem. Nesse sentido, o conjunto de unidades hidroestratigráficas da CPRM (MACHADO, 2013) com similaridades geológicas e de arranjo estrutural em que há a conexão hidráulica em escala regional é considerado um domínio hidrogeológico. O conceito de domínio hidrogeológico adotado no presente trabalho tem como características: apresentar aquíferos aflorantes, com a condição de pressão do tipo livre a semiconfinada, em razão da dificuldade de identificação da contribuição do fluxo de base pelos aquíferos confinados; de as águas subterrâneas dos sistemas de fluxos locais, intermediários e regionais se misturarem através dos sistemas de falhas, inclusive com águas de aquíferos confinados; e haver a contribuição para formar o escoamento de base das bacias hidrográficas (MACHADO, 2013).

Os domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina definidos para o desenvolvimento da presente proposta metodológica são: Cristalino; Bacia Sedimentar Paleozoica; Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Não Confinado e Semiconfinado; SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado; e Depósitos Cenozoicos.

3.1.1 Caracterização dos domínios hidrogeológicos para o estado de Santa Catarina

A classificação em cinco domínios hidrogeológicos do presente trabalho corresponde à proposta de províncias hidrogeológicas de Brito Neves *et al.* (1973) e à sinopse geológica do estado de Santa Catarina de Scheibe (1986). A denominação dos domínios hidrogeológicos assumida no presente trabalho (Quadro 11) difere, contudo, da nomenclatura de Brito Neves *et al.* (1973), tendo em vista que a macro-divisão geológica do estado de Santa Catarina costuma ser agrupada em quatro áreas aflorantes: Depósitos Cenozoicos, Escudo Cristalino, Bacia Sedimentar do Paraná e Rochas Vulcânicas (SCHEIBE, 1986). Particularmente, optou-se por dividir as áreas aflorantes das rochas vulcânicas do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG - SCHEIBE e HIRATA, 2008) em dois domínios hidrogeológicos, pela diferenciação quanto ao confinamento.

Quadro 11 – Correspondência da extensão geográfica entre as classificações hidrogeológicas propostas para o estado de Santa Catarina.

Província hidrogeológica (BRITO NEVES <i>et al.</i> , 1973)	Domínios hidrogeológicos do Brasil (CPRM, 2007)	Domínio/Subdomínio hidrogeológico (CARDOSO <i>et al.</i> , 2007a)	Unidade hidroestratigráfica (MACHADO, 2013)	Domínio hidrogeológico (presente trabalho)
Cristalina	Cristalino; e Carbonatos/ Metacarbonatos	Fraturado / Cristalino	Embasamento Cristalino	Cristalino
			Alcalinas	
	Metassedimentos/ Metavulcânicas; e Poroso/Fissural	Fraturado / Vulcanossedimentar	Itajaí	
			Campo Alegre	
Paleozoica	Bacias Sedimentares	Poroso / Grupo Itararé	Mafra	Bacia Sedimentar Paleozoica
			Rio do Sul	
		Poroso / Formação Rio Bonito	Rio Bonito	
			Poroso / Formações Permo-Triássicas	
		Irati		
		Serra Alta		
		Teresina		
		Poroso / Guarani	Rio do Rasto	
			Piramboia	
		Mesozoica	Vulcânicas	Fraturado / Serra Geral 1
Fraturado / Serra Geral 2	SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado			
				Cenozoica
Poroso / Depósitos Costeiros				

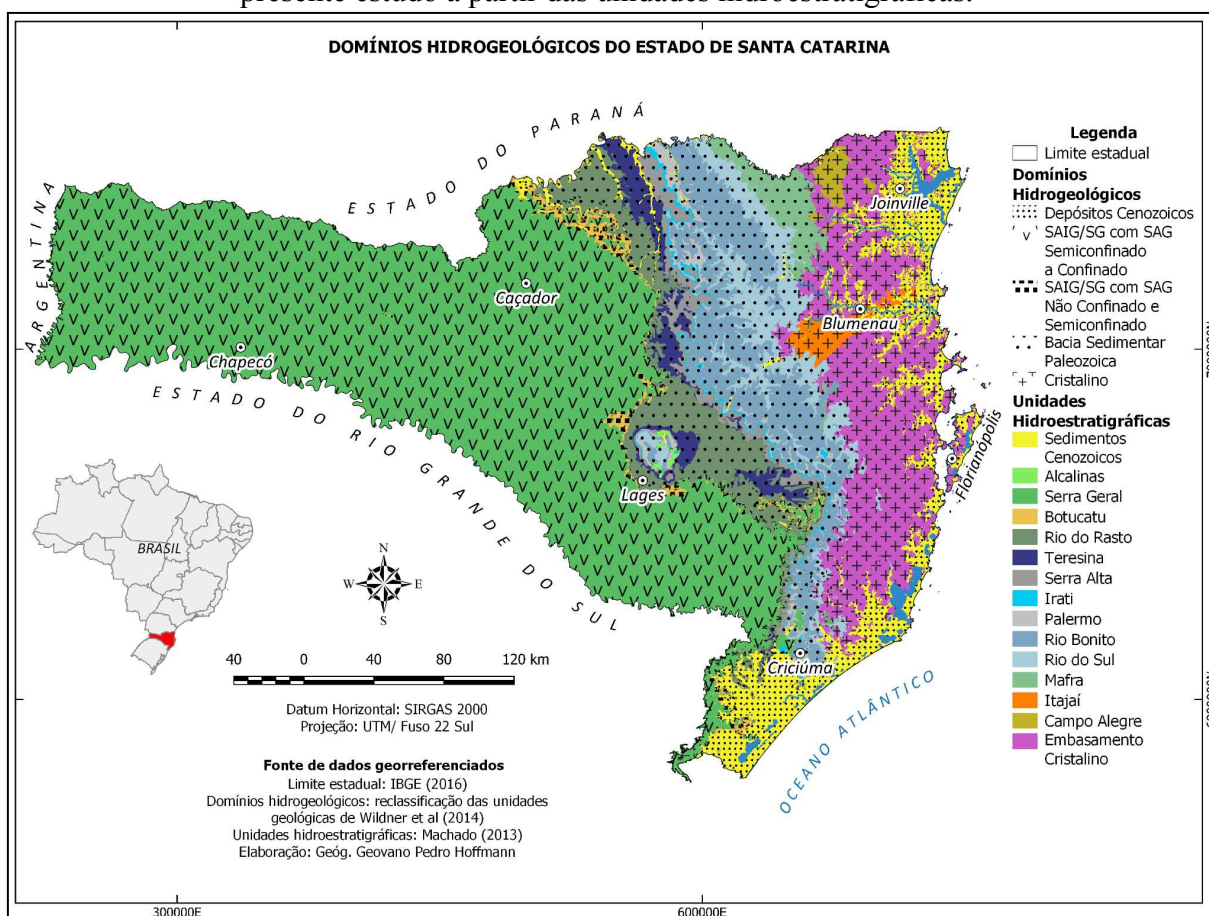
Fonte: Elaboração própria.

Na proposta de classificação em domínios e subdomínios hidrogeológicos, Cardoso *et al.* (2007b) mencionam as mesmas províncias hidrogeológicas de Brito Neves *et al.* (1973) para Santa Catarina, porém agrupando-as em domínios porosos e fraturados, com hierarquia em subdomínios. Isso ocorreu também no mapa de domínios hidrogeológicos do Brasil, da CPRM (2007), distinguindo-se pelo fato de detalhar a Província Cristalina de Brito Neves *et al.* (1973), dividindo-a em Cristalino; Carbonatos/ Metacarbonatos; Metassedimentos/ Metavulcânicas; e Poroso/Fissural.

No Quadro 11, as propostas de classificação das águas subterrâneas do estado de Santa Catarina em províncias hidrogeológicas (BRITO NEVES *et al.*, 1973), domínios e subdomínios hidrogeológicos (CARDOSO *et al.*, 2007a), domínios hidrogeológicos do Brasil (CPRM, 2007) e unidades hidroestratigráficas (MACHADO, 2013) estão sistematizadas pelos

limites da extensão geográfica das suas regionalizações com as cinco unidades dos domínios hidrogeológicos adotadas para o presente trabalho. A Figura 30 mostra a representação dos domínios hidrogeológicos que serão referidos no presente trabalho e as suas respectivas unidades hidroestratigráficas, conforme a classificação mais recente, de Machado (2013). A seguir, os domínios hidrogeológicos do presente estudo são apresentados segundo a idade geológica, da mais antiga para a mais recente na estratigrafia do estado.

Figura 30 – Mapa dos domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina, definidos no presente estudo a partir das unidades hidroestratigráficas.



Fonte: Elaboração própria.

No Domínio Hidrogeológico Cristalino, que compreende rochas do embasamento, estão presentes rochas de estruturas extensas e maciças, de porosidade secundária, com fraturas e fendas que o caracterizam como aquífero fissural. Apresenta-se em reservatórios aleatórios descontínuos de águas subterrâneas, considerado o domínio com aquíferos de menor potencial hidrogeológico, com vazões pequenas em poços tubulares (BOMFIM, 2010). Em Santa Catarina, o domínio compreende as unidades hidroestratigráficas Alcalinas, Campo Alegre, Itajaí e Embasamento Cristalino, que envolve o Complexo Granulítico de Santa

Catarina (rochas metamórficas de fácies granulito e anfibolito), rochas metassedimentares e metavulcânicas do Grupo Brusque, Suíte Granitoide Guabiruba/Valsungana, Complexo Granito-Gnáissico e Complexo Camboriú (MACHADO, 2013).

Por sua vez, as sequências de rochas sedimentares constituem o Domínio Hidrogeológico da Bacia Sedimentar Paleozoica. De modo geral, as suas unidades apresentam alta porosidade e permeabilidade, elevado potencial hidrogeológico e podem conter importantes reservatórios de águas subterrâneas, com características que dependem da litologia de suas camadas (BOMFIM, 2010). Em Santa Catarina, este domínio tem a sua ocorrência como a Bacia Geológica do Paraná, cujas unidades hidroestratigráficas são Mafra, Rio do Sul, Rio Bonito, Palermo, Irati, Serra Alta, Teresina, Rio do Rasto, Piramboia e Botucatu (MACHADO, 2013).

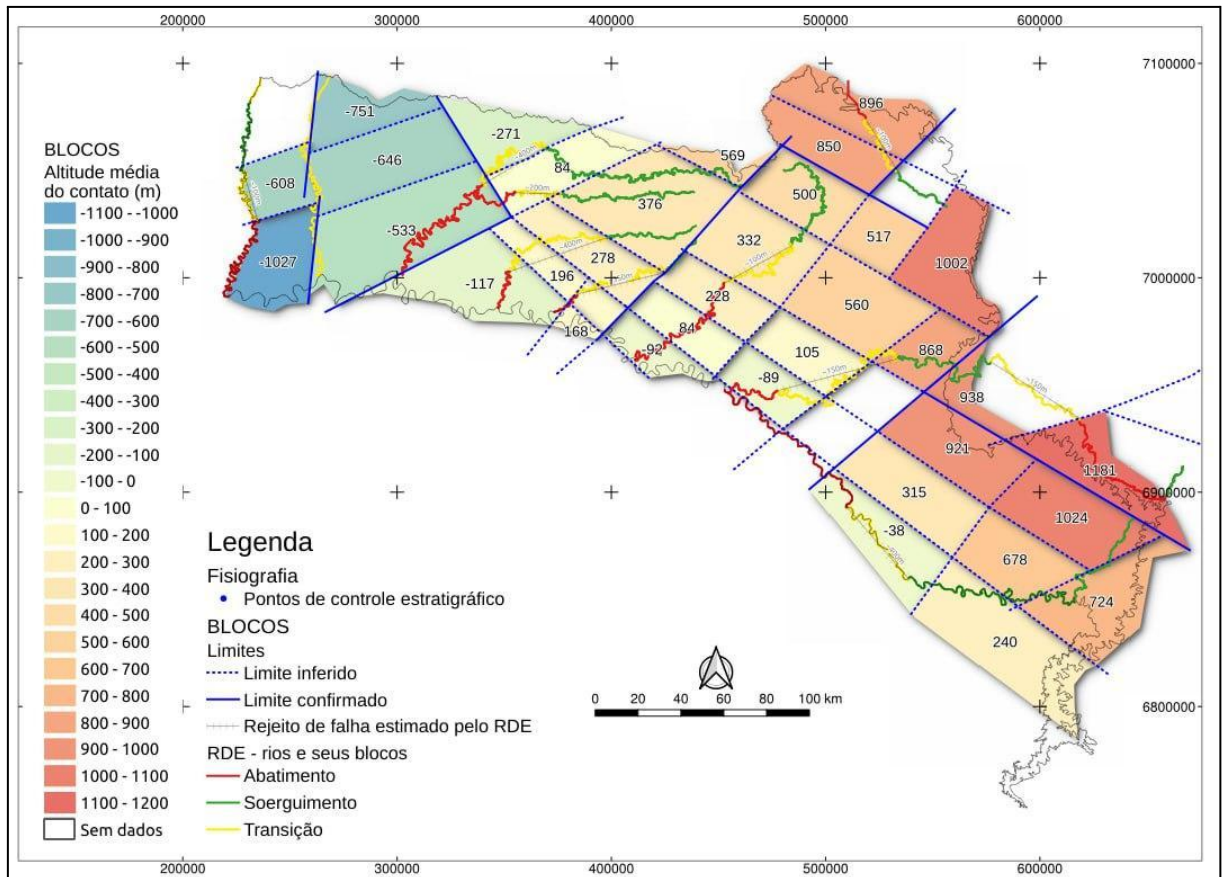
A identificação de evidências da conectividade hidráulica entre o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e o Sistema Aquífero Guarani (SAG – Unidades Piramboia e Botucatu) (BONGIOLO *et al.*, 2011; NANNI *et al.*, 2013; ATHAYDE *et al.*, 2014), permitem que o seu conjunto, cobrindo quase metade do estado de Santa Catarina, seja denominado de Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) (SCHEIBE e HIRATA, 2008).

A presente pesquisa separa essa área de cobertura do SAIG/SG em Santa Catarina em dois domínios hidrogeológicos distintos quanto ao confinamento, para abranger, de um lado, bacias hidrográficas onde o escoamento de base é suprido quase exclusivamente pela Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral (denominada no presente trabalho como Domínio Hidrogeológico do “SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado”); de outro lado, abrange as bacias hidrográficas supridas pela conectividade desta unidade hidroestratigráfica com a unidade Botucatu/Piramboia, chamado de Domínio Hidrogeológico do “SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado”. A mistura de águas do SAG e do SASG acontece nas áreas de grandes falhamentos regionais e permite a circulação dessas águas em direção à superfície, por surgências espontâneas (descarga) onde a superfície potenciométrica do SAG intercepta o relevo em áreas mais baixas, conferindo o caráter de semiconfinamento do SAG, como constatado por Blank (2017) nos municípios de Quilombo e Águas Frias.

É importante e inovador considerar que, como sugerido por Descovi Filho (2015), o SAIG/SG estaria dividido em blocos hidrogeológicos descontínuos, nos quais a espessura média do SASG varia desde zero metro, nas áreas aflorantes do SAG no leste do estado, alcançando até 1132 metros no extremo oeste. Estudo mais recente, realizado por Amaral (2018) para a mesma área, mostra que o SAIG/SG está disposto em 25 blocos

hidrogeológicos, enquanto RGSG (2020 apud Nanni e Scheibe, 2022) mostra que o SAIG/SG está estruturado em porções ainda menores a partir dos limites inferidos (Figura 31).

Figura 31 – Altitude média do contato entre a base do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e o topo do Sistema Aquífero Guarani (SAG) nos principais blocos hidrogeológicos do SAIG/SG em Santa Catarina.



Fonte: RGSG (2020, apud Nanni e Scheibe, 2022, p. 01).

Para fins metodológicos, o Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado inclui as rochas vulcânicas da unidade geológica Serra Geral, que se comportam como aquífero fissural, com porosidade secundária em fendas e fraturas pela sua estrutura em camadas, mas pode ter porosidade primária em derrames básicos, o que a enquadra com potencial hidrogeológico variável (BOMFIM, 2010). A Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral representa o domínio das Rochas Vulcânicas no estado de Santa Catarina, constituídas por derrames basálticos e de ocorrência livre próximo à superfície, sendo considerada a unidade hidroestratigráfica mais importante, em função do fácil acesso e da abundância de poços perfurados (MACHADO, 2013). Neste domínio hidrogeológico a área de descarga/afloramento do nível potenciométrico do SAG ocorre de forma localizada, geralmente abaixo de altitudes da ordem de 350m (BLANK, 2017). Há

ocorrência de interações com o SASG por recarga ascendente, como no estado do Rio Grande do Sul (NANNI *et al.*, 2013) e do Mato Grosso do Sul (LASTORIA *et al.*, 2006).

Considera-se que o Domínio Hidrogeológico do SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado está restrito à área de afloramentos agrupados das unidades hidroestratigráficas Botucatu e Formação Serra Geral situados a leste da região de abrangência do SAIG/SG no estado de Santa Catarina. A área de descarga/afloramento do nível freático e potenciométrico do SAG dá-se lateralmente vinculada à dissecação geomorfológica do terreno, que faz aflorar nas escarpas e encostas a unidade hidroestratigráfica Botucatu. Nesse ambiente, as recargas são praticamente nulas devido à pequena extensão lateral do SAG na superfície.

Seguindo a coluna estratigráfica, o Domínio Hidrogeológico dos Depósitos Cenozoicos refere-se aos pacotes sedimentares do Terciário e Quaternário que recobrem rochas de idade mais antiga e considerados, pela porosidade primária e elevada permeabilidade, como aquíferos porosos (BOMFIM, 2010). Cascalhos, areias e lamas têm a sua ocorrência em aquífero livre quase contínua ao longo do litoral, apresentando-se na forma de sistemas de leques aluviais, depósitos flúvio-deltaicos-marinhos, dunas e barreiras praias-marinhas, os quais integram a Unidade Hidroestratigráfica Sedimentos Cenozoicos (MACHADO, 2013).

3.1.2 Bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos

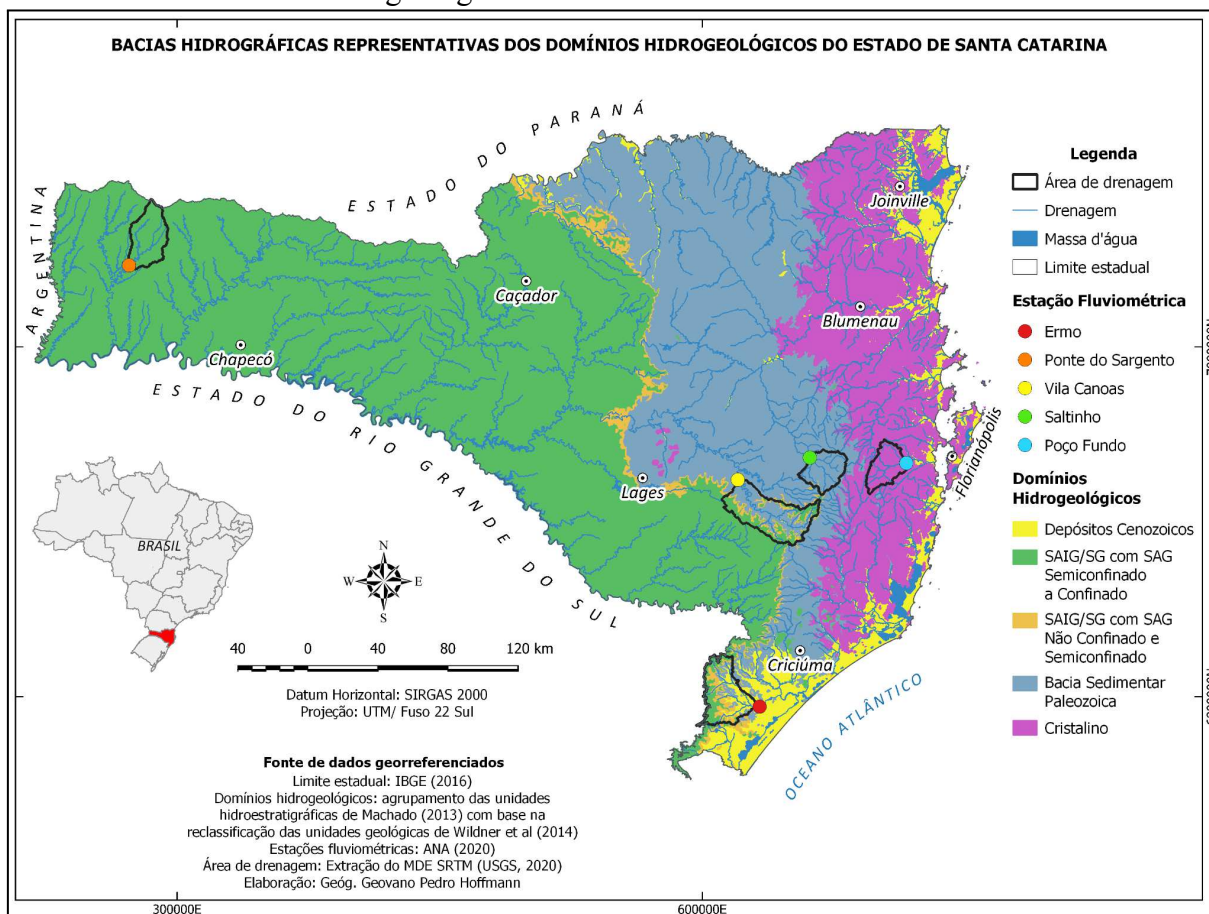
As bacias hidrográficas consideradas na presente proposta metodológica são representativas dos cinco domínios hidrogeológicos elencados para o estado de Santa Catarina. Para a realização da avaliação foi escolhida uma bacia hidrográfica representativa de cada domínio. Cada bacia hidrográfica foi definida e representada pela sua área de drenagem, que compreende desde os divisores topográficos até um posto fluviométrico da ANA (2020), assumido como ponto exutório.

A necessidade das bacias hidrográficas representativas ocorre pelo fato das bacias hidrográficas no estado apresentarem poucas estações pluviométricas e fluviométricas em funcionamento e com séries históricas longas e completas que pudessem servir de modelo para outras situadas em cada domínio hidrogeológico; e a configuração hidrogeológica regional diferenciada, o que permite calibrar a metodologia em consonância com as especificidades ambientais de cada domínio. As bacias hidrográficas representativas usadas na

proposta metodológica da presente pesquisa foram definidas pela área de drenagem das estações fluviométricas Poço Fundo, Saltinho, Vila Canoas, Ponte do Sargento e Ermo (Figura 32). Os critérios usados para a seleção das bacias hidrográficas representativas foram os seguintes:

1. apresentar localização completa, ou em grande parte, no domínio hidrogeológico a ser avaliado;
2. existência de estação fluviométrica e pluviométrica em funcionamento com série histórica de dados diários registrados, de modo que a estação pluviométrica seja a mesma do ponto exutório ou esteja posicionada na área de drenagem a ser avaliada, conforme (ANA, 2020); e
3. não conter reservatórios, usinas hidrelétricas, pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) ou barragens de contenção de enchentes que interfiram na regulação, bem como na avaliação do escoamento de base, conforme distribuição espacial das estações fluviométricas da ANA (2020) e situação de funcionamento dos empreendimentos junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023).

Figura 32 – Localização das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina.



Fonte: Elaboração própria.

Cada área de drenagem foi obtida por extração automática de cenas do modelo digital de elevação (MDE), da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 metros, fornecidos gratuitamente pelo portal do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2020), a saber: S27-W053-1ARC-V3, S27-W054-1ARC-V3, S28-W049-1ARC-V3, S28-W050-1ARC-V3, S29-W050-1ARC-V3, S29-W051-1ARC-V3, S30-W050-1ARC-V3, S30-W051-1ARC-V3. O preenchimento de depressões em cada MDE ocorreu pela interpolação “Preencher sem dados”, também conhecida como “Fill nodata”, da ferramenta GDAL⁸ integrada ao QGIS, com a distância máxima de 100 *pixels* configurada no algoritmo. Por sua vez, houve o mosaico de cenas contíguas e a reprojeção das cenas do sistema de coordenadas geográficas (WGS84 - EPSG: 4326) para o sistema projetado de coordenadas (SIRGAS 2000 UTM 22S - EPSG: 31982).

⁸ Conforme o Projeto QGIS (2023), o GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*) é uma biblioteca usada para a tradução de dados geoespaciais raster e vetoriais, contendo algoritmos de estrutura de processamento provenientes de programas raster GDAL e programas vetoriais GDAL.

Por meio de módulos do sistema de informações geográficas livre GRASS⁹ integradas ao QGIS 3.10 (*r.watershed* e *r.water.outlet*) houve a delimitação automática das bacias hidrográficas representativas a partir da posição geográfica das estações fluviométricas. O Quadro 12 apresenta características das estações fluviométricas e pluviométricas das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos usadas na proposta metodológica. O cálculo da área de drenagem se deu pelo sistema de informações geográficas QGIS, em *datum* SIRGAS 2000 e sistema de projeção UTM Zona 22 Sul (EPSG: 31982). Um modelo sombreado de relevo, usado para facilitar a percepção morfológica em cada bacia hidrográfica representativa, foi também derivado das mesmas cenas SRTM, definindo-se o exagero vertical no valor de 1, o azimute de insolação em 315° e a altitude de insolação em 45°.

Quadro 12 – Informações das estações fluviométricas das bacias hidrográficas representativas de cada domínio hidrogeológico de Santa Catarina.

Domínio hidrogeológico	Cristalino	Bacia Sedimentar Paleozoica	SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado	SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado	Depósitos Cenozoicos
Bacia hidrográfica	Rio Cubatão do Sul	Rio Itajaí do Sul	Rio Canoas	Rio Sargento	Rio Itoupava
Nome da estação fluviométrica	Poço Fundo	Saltinho	Vila Canoas	Ponte do Sargento	Ermo
Código da estação fluviométrica	84100000	83105000	71200000	74320000	84949800
Município da estação	Santo Amaro da Imperatriz	Alfredo Wagner	Bocaina do Sul	Romelândia	Ermo
Latitude/Longitude	716586,38E/ 6933631,24N	661517,07E/ 6936752,92N	620324,66E/ 6924019,48N	272525,71E/ 7046712,05N	632781,62E/ 6794249,19N
Responsável	ANA	ANA	ANA	ANA	ANA
Operadora	EPAGRI/SC	EPAGRI/SC	CPRM	CPRM	EPAGRI/SC
Período de registro	1950-2022	1974-2022	1957-2022	1965-2022	1978-2018
Área de drenagem da ANA (2020) (km²)	400	434	1021	609	863
Área de drenagem calculada (km²)	401,09	434,53	1014,64	607,15	833,43
Escala cartográfica da área de drenagem calculada	1:220.000	1:180.000	1:260.000	1:280.000	1:300.000

Fonte: Sistema de informações HidroWeb (ANA, 2020).

A caracterização a seguir das bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos de Santa Catarina usou como referência o Mapa hidrogeológico do Estado de Santa Catarina, na escala 1:500.000 (MACHADO, 2013) e para descrever a litologia foi

⁹ Conforme o Projeto QGIS (2023), o GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) é um Sistema de Informações Geográficas de código aberto, que apresenta integração de componentes para possibilitar o uso de suas ferramentas no QGIS.

usado o Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina, na escala 1:500.000 (WILDNER *et al.*, 2014). A disponibilidade de armazenamento nos aquíferos pela produtividade de poços usou a categorização em muito baixa, baixa, média e alta do Mapa Hidrogeológico — Região Sul, na escala 1:1.700.000, do IBGE (2015) para a categorização do arquivo vetorial no formato *shapefile* (SHP) das unidades hidrogeológicas de Machado (2013) pela vazão dos poços cadastrados no Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), conforme o Quadro 13.

Quadro 13 – Correspondência entre a classificação da vazão subterrânea no estado de Santa Catarina por Machado (2013) e a classificação da produtividade de poços do IBGE (2015).

Classificação da vazão de poços (MACHADO, 2013)	Classificação da produtividade de poços (IBGE, 2015)
Vazões insignificantes em poços - pequenas vazões em nascentes	Muito baixa (vazões < 3 m ³ /h)
Poços que raramente ultrapassam 3,0 m ³ /h	
Variam entre 1,0 e 3,0 m ³ /h, raramente valores próximos a 10m ³ /h	
Vazões entre 1,0 e 3,0 m ³ /h	
Variam entre 1,0 e 4,0 m ³ /h	Baixa (vazões entre 3 e 10 m ³ /h)
Geralmente entre 2,0 e 9,0 m ³ /h	
Variam entre 3,0 e 10,0 m ³ /h	
Vazões entre 3,0 e 10,0 m ³ /h	
Vazões entre 2,0 e 15,0 m ³ /h	Média (vazões entre 10 e 40 m ³ /h)
Variam entre 5,0 e 25,0 m ³ /h	
Vazões entre 5,0 e 40,0 m ³ /h	Alta (vazões entre 40 e 100 m ³ /h)
Vazões entre 5,0 e 80,0 m ³ /h	
Vazões entre 20,0 e 90,0 m ³ /h	

Fonte: Elaboração própria.

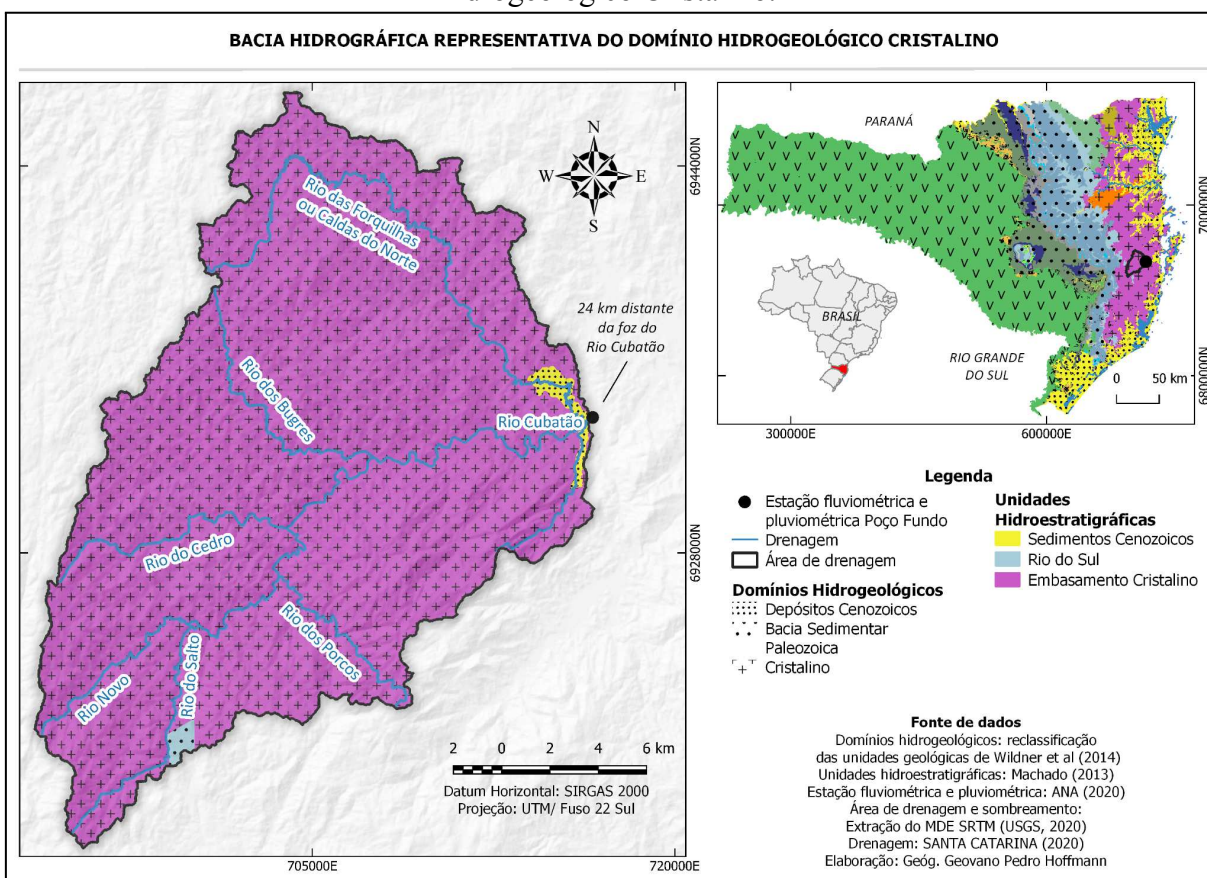
O relevo foi descrito com base na Nota Explicativa do Mapa Geomorfológico do Estado de Santa Catarina, na escala 1:1.000.000, de Santa Catarina (1986) e o capítulo “Geomorfologia” do Atlas Geográfico de Santa Catarina (LUIZ, 2016). Por sua vez, a descrição dos solos usou como referência o Mapa de Solos do Estado de Santa Catarina, na escala 1:250.000, de Potter *et al.* (2004). Quando relevantes para a caracterização da recessão, informações de estudos de caso foram incorporadas.

3.1.2.1 *Cristalino*

A bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino é a área de drenagem da estação fluviométrica Poço Fundo (Figura 33), localizada na bacia

hidrográfica do Rio Cubatão do Sul, no município de Santo Amaro da Imperatriz, na Grande Florianópolis. A área de drenagem calculada é de 401 km² e as estações fluviométrica e pluviométrica têm dados diários desde o ano de 1950 até os dias atuais. O Embasamento Cristalino é a unidade hidroestratigráfica predominante e aparece subordinadamente às unidades Sedimentos Cenozoicos e Rio do Sul.

Figura 33 – Mapa de localização da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino.



Fonte: Elaboração própria.

As rochas aflorantes que ocorrem nessa bacia hidrográfica representativa são das unidades geológicas (Quadro 14) Granitoide Santo Antônio, Complexo Águas Mornas, Granito Rio das Antas, Granito Serra do Tabuleiro, Tonalito Forquilha, Granodiorito Alto da Varginha, Formação Queçaba, Formação Taciba e Depósitos Aluvionares (WILDNER *et al.*, 2014). Grande parte dessas rochas faz parte da unidade hidroestratigráfica Embasamento Cristalino, que detém a maior extensão (98,8%), seguida de pequena participação das unidades hidroestratigráficas Rio do Sul (0,4%) e Sedimentos Cenozoicos (0,8%).

Quadro 14 – Unidades geológicas aflorantes na bacia hidrográfica representativa do Cristalino.

Domínio Geológico	Grupo	Unidade	Litologia/Ambiente
Complexos Granito-Gnáissico-Migmatíticos	Complexos Granito-Gnáissico-Migmatíticos no Terreno Florianópolis	Complexo Águas Mornas	“Associação de ortognaisses polifásicos constituídas por paleossoma de natureza básica a intermediária (ortoanfíbolitos, metagabros, metabasitos e metadioritos); ortognaisses quartzo-monzoníticos, resultantes da fusão parcial da fração crustal primitiva; e uma fração neossomática caracterizada por uma massa monzogranítica que envolve os componentes anteriores, em diferentes proporções. Calcissilicáticas restritas, cinza-escuro esverdeado, com bandamento fino, contínuo e regular”
Complexos Metavulcanos-sedimentares	Metassedimentares no Terreno Florianópolis	Formação Queçaba	“Metassedimentos constituídos por uma alternância de quartzitos (metarenitos) de coloração bege, com quartzo-xistos, micaxistos e fílitos (metapelitos), eventualmente carbonosos, de coloração cinza-escuro. Metavulcânicas restritas. Metamorfismo da fácies xisto-verde inferior”
Batólito Florianópolis - Granitoides Sin a Tardi-transcorrentes	Suíte Intrusiva Paulo Lopes	Granitoides Santo Antônio	“Monzogranitos e subordinadamente tipos mais potássicos, mesocráticos de coloração cinza a cinza-escuro, de textura porfirítica, com fenocristais de feldspatos envolvidos por uma matriz fina a grossa, com foliação bem desenvolvida. Englobam xenólitos máficos”
Batólito Florianópolis - Granitos Alcali-cálcicos Pré a Sin-colisionais - Tipo I	Suíte Intrusiva Maruim	Tonalito Forquilha	“Tonalitos, quartzo-dioritos e quartzo-monzodioritos, melanocráticos de coloração cinza-escuro, com sutil lineamento de fluxo ígneo, equigranulares de granulação fina a grossa. Fácies de granulação média a grossa, melanogrática com cores cinza e branca, com cristais bem desenvolvidos de hornblenda. Xenólitos anfíbolíticos fluidais”.
		Granodiorito Alto da Varginha	“Granodioritos, subordinadamente quartzo-monzogranitos, quartzo-monzodioritos e monzogranitos, mesocráticos de coloração cinza, equigranulares de granulação média a fina, com orientações de fluxo magmático marcado por trilhas de máficos. Frequentes enclaves microgranulares máficos”
		Granito Rio das Antas	“Monzogranitos e sienogranitos, subordinadamente quartzo-monzonitos e quartzo-sienitos, leucocráticos de coloração cinza, inequigranulares levemente porfiríticos com fenocristais de feldspatos em matriz de granulação média”
Batólito Florianópolis - Granitos alcalinos tardi a pós-colisionais - Tipo A	Suíte Pedras Grandes	Granito Serra do Tabuleiro	“Biotita sienogranitos e leucossienogranitos de coloração rósea, equigranulares médios a grossos, homogêneos e isotropos”
Sedimentação Gondwuânica (Bacia do Paraná) - Supergrupo Tubarão	Grupo Itararé	Formação Taciba	“Conglomerados polimíticos com matriz arenosa. Arenitos finos a grossos com estratificação cruzada, plano-paralela e maciça, localmente conglomeráticos. Alternância de folhelhos e siltitos com grânulos, seixos e matações pingados. Ambiente deposicional na interface continente-plataforma marinha com influência glacial”
Coberturas Sedimentares do Cenozoico	-	Depósitos Aluvionares	“Areias grossas a finas, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos, em calhas de rios e planícies de inundação”

Fonte: Wildner *et al.* (2014).

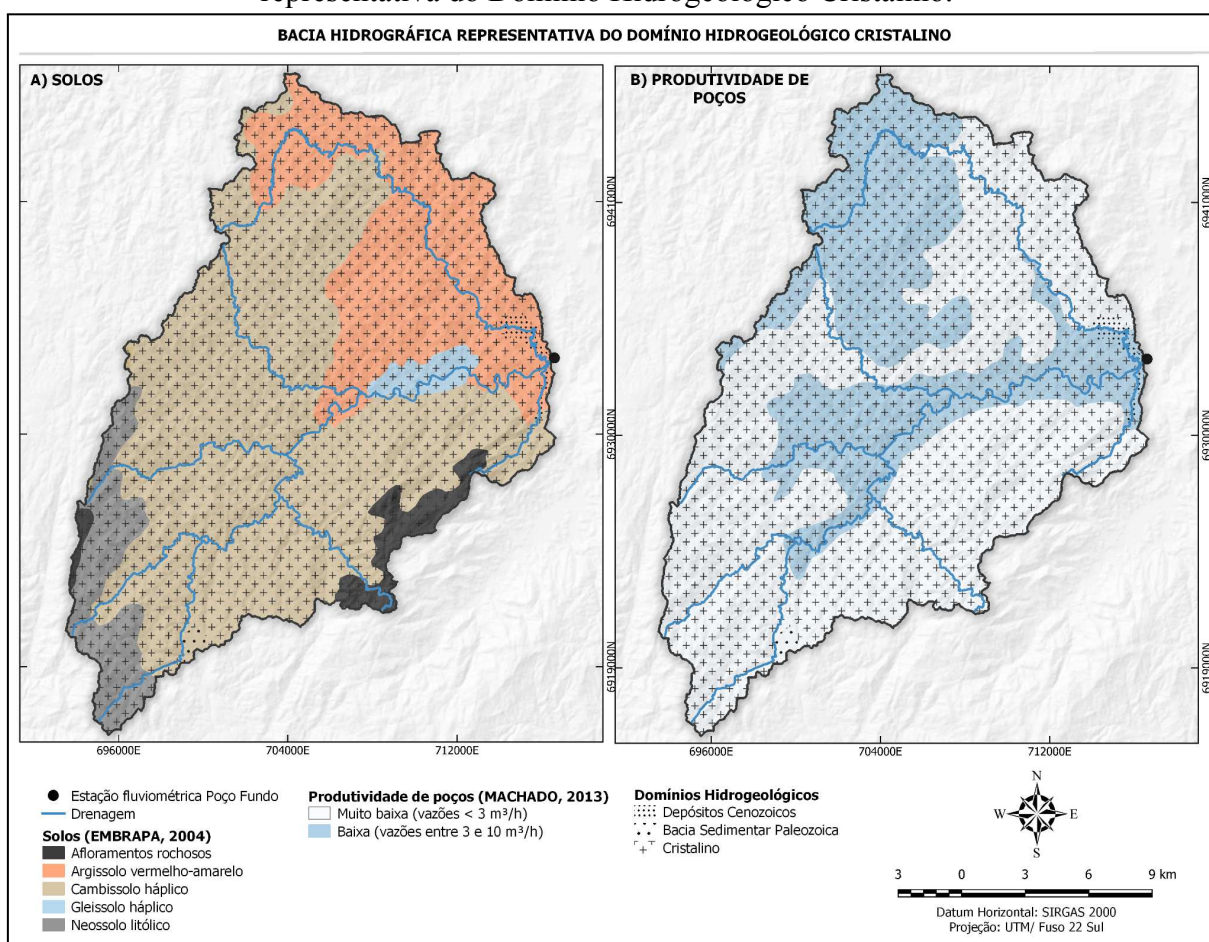
A litologia dominante das rochas do Embasamento Cristalino caracteriza-se pelo relevo que conforma as Serras do Leste Catarinense ou Serras do Tabuleiro-Itajaí, que, na Grande Florianópolis, diferencia-se em dois setores geomorfológicos: no sul, pela serra do Tabuleiro; e no norte, pelo conjunto de serras que se estendem até a calha do Rio Tijucas. A serra do Tabuleiro é um planalto cristalino que contém granitos e riolitos, proporcionando uma esculturação em modelado montanhoso, com cotas topográficas que atingem mais de 1000 metros de altitude, sendo que na bacia hidrográfica representativa a variação altimétrica está entre 57 e 1.270 metros. Os cursos d'água seguem os lineamentos estruturais, em vales muito encaixados, com encostas íngremes e bem dissecadas. Esse planalto tem a sua extensão em direção ao sul de Santa Catarina e também acompanha topograficamente a unidade geomorfológica Patamares do Alto Rio Itajaí a oeste. Já o conjunto de serras do setor geomorfológico que se estende ao norte da Serra do Tabuleiro apresenta altitudes mais baixas. Nas proximidades da linha do litoral (unidade geomorfológica Planícies Litorâneas), os morros e serras formados por rochas granitoides possuem topos angulosos, encostas íngremes e mais dissecadas, enquanto para o oeste, o relevo torna-se mais suavizado, com encostas menos íngremes e topos convexos, ocasionado pela esculturação em áreas com gnaisses, migmatitos ou granitoides alcalinos (LUIZ, 2016).

O fraturamento do conjunto litoestratigráfico e a porosidade, identificada em menor escala nas rochas, como em planos de estratificação nos gnaisses e em laminações tectônicas nos granitos, são os melhores locais de ocorrência e circulação de águas subterrâneas no embasamento cristalino. Apesar disso, a produtividade de extração é baixa, visto que no embasamento as rochas são estruturalmente maciças, a anisotropia é imperante e a permeabilidade é quase nula (COITINHO, 2000).

Na bacia hidrográfica representativa, o setor sul da unidade geomorfológica Serras do Leste Catarinense ou Serras do Tabuleiro-Itajaí são consideradas áreas praticamente sem aquíferos, onde geralmente tem-se aquícludes e aquíferos raramente localizados. Como mostrado na Figura 34, essas áreas estão situadas em regiões serranas e montanhosas de embasamento cristalino (com gnaisses, granulitos, granitoides e granitos), com picos que vão desde 300 até 1.000 metros de altitude. Nesse caso, considera-se que é melhor o aproveitamento por nascentes pelo fato das vazões em poços serem muito baixas ($< 3 \text{ m}^3/\text{h}$). No setor norte e também no entorno do talvegue do rio principal (o Rio Cubatão do Sul) da bacia hidrográfica representativa, o relevo é suavizado onde são encontrados gnaisses, granitoides, granitos e xistos, mas ainda montanhoso, constituindo aquíferos fraturados de

menor potencialidade. A condição desse último setor geomorfológico de aquífero livre a semiconfinado, do tipo regional e fraturado, permite a captação local por poços, porém, sob baixas vazões em poços (entre 3 e 10 m³/h) (MACHADO, 2013).

Figura 34 – Composição pedológica e produtividade de poços da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino.



Fonte: Adaptado de Embrapa (2004) e Machado (2013).

Os solos dessa bacia hidrográfica representativa (Figura 34) consistem em 26,8% de argissolo vermelho-amarelo ao norte (de textura argilosa, moderadamente drenado e com profundidade entre 60 a 150 centímetros); em 60% de cambissolo háplico (de textura argilosa, moderadamente drenado e com profundidade de 60 a 150 centímetros) e de 1,9% de gleissolo háplicos no centro (de textura argilosa, de mal a muito mal drenado e com profundidade < 60 centímetros); e ao sul, em 7,5% de neossolo litólico (de textura média, moderadamente drenado e com profundidade < 60 centímetros) e em 3,7% de afloramentos rochosos.

A circunstância do embasamento cristalino ser aflorante e localizado junto ao litoral de Santa Catarina faz com que esteja condicionado a um clima regional úmido. Por

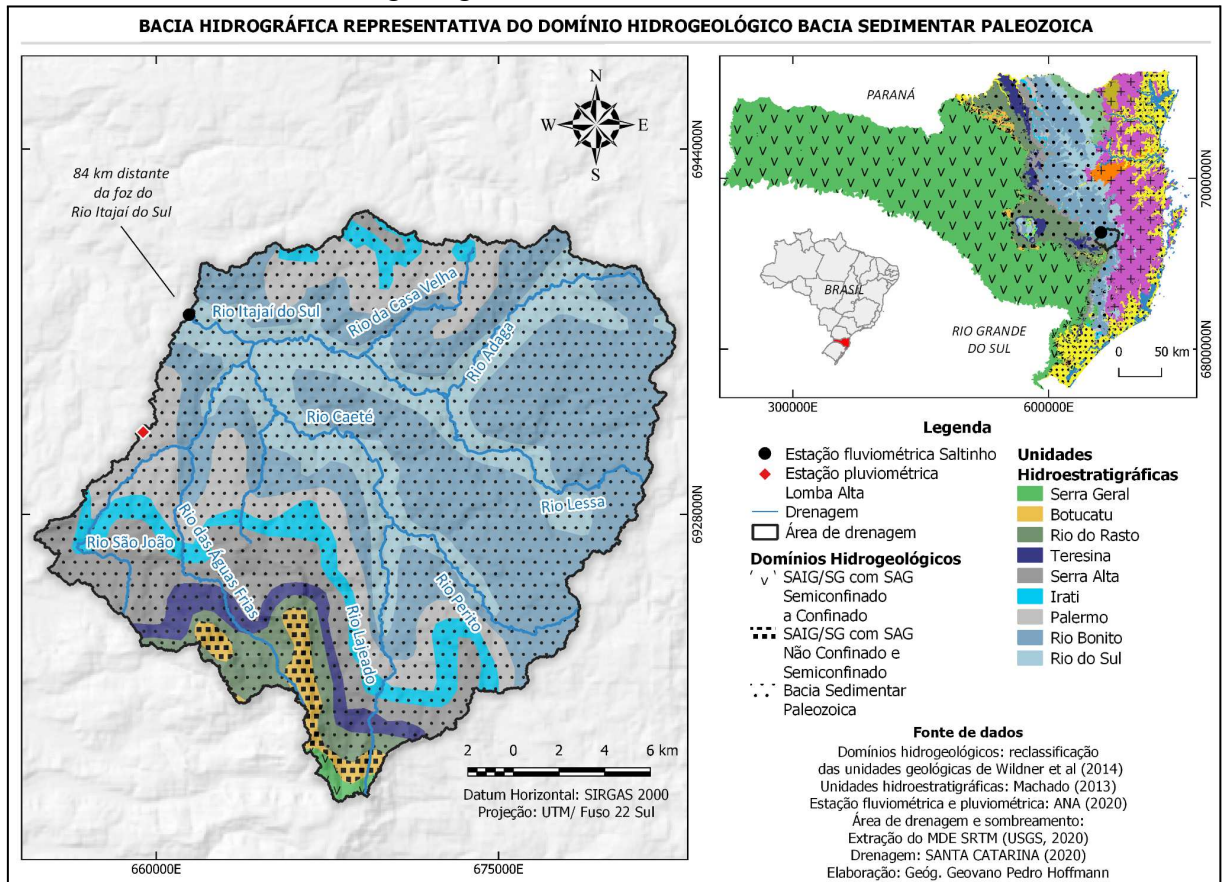
consequência, tem-se uma superfície espessa que recobre as rochas, ocasionada pela intensa e profunda intemperização química (HERRMANN, MENDONÇA e CAMPOS, 1993). O manto de intemperismo pode atingir até 20 metros de espessura nessas serras (SANTA CATARINA, 1986), sendo que em áreas adjacentes à bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino podem ser encontrados valores superiores, de até 26 metros, como medido por Fortes (1996) em um elúvio situado na Grande Florianópolis.

O armazenamento subterrâneo em áreas de embasamento cristalino decorre da recarga que acontece pela infiltração das chuvas ou das águas dos próprios rios nos fraturamentos das rochas, por aluviões ou pelo manto de intemperismo. Como aquífero livre, a descarga é sustentada pela interceptação do nível freático em superfície, onde as nascentes surgem no contato do manto de intemperismo com a rocha sã nas áreas de encostas das bacias hidrográficas (BRITO NEVES *et al.*, 1979 apud COITINHO, 2000).

3.1.2.2 *Bacia Sedimentar Paleozoica*

No Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica, a bacia hidrográfica representativa é a área de drenagem da estação fluviométrica Saltinho (Figura 35), localizada na bacia hidrográfica do Rio Itajaí do Sul, no município de Alfredo Wagner, na Grande Florianópolis. A estação fluviométrica tem dados desde 1974 e a estação pluviométrica desde 1976. A área de drenagem calculada é de 435 km². As unidades hidroestratigráficas aflorantes compreendidas pela bacia representativa do Domínio Bacia Sedimentar Paleozoica são Rio do Sul, Rio Bonito, Palermo, Irati, Serra Alta, Teresina, Rio do Rasto, Botucatu e Serra Geral.

Figura 35 – Mapa de localização da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.



Fonte: Elaboração própria.

Boa parte da litologia dessa área é constituída por rochas sedimentares heterogêneas, com exceção de uma pequena parcela formada por rochas basálticas. Estão arranjadas estruturalmente pela Bacia Sedimentar do Paraná, de modo que as rochas mais antigas localizam-se no fundo de vale e as de formação mais recente estão situadas nas escarpas e nos topos dos morros (FUCK *et al.*, 2014). As unidades geológicas que compõem a bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica (Quadro 15) são Formação Taciba, Formação Rio Bonito, Formação Palermo, Formação Irati, Formação Serra Alta, Formação Teresina, Formação Rio do Rasto e, em menor extensão, Formação Botucatu e Grupo Serra Geral (WILDNER *et al.*, 2014). No que diz respeito às unidades hidroestratigráficas, apresentam maior área as unidades Rio Bonito (41,3%), na maioria dos topos dos patamares e encostas; Rio do Sul (18,3%), situada nos fundos de vales; e Palermo (13,5%), que cobre encostas altimetricamente acima da unidade Rio Bonito. Em menor proporção, afloram nas áreas mais altas as unidades Serra Alta (9,8%), Irati (6,9%), Rio do Rasto (3,9%), Teresina (3,5%), Botucatu (2,3%) e Serra Geral (0,5%).

Quadro 15 – Unidades geológicas aflorantes na bacia hidrográfica representativa da Bacia Sedimentar Paleozoica.

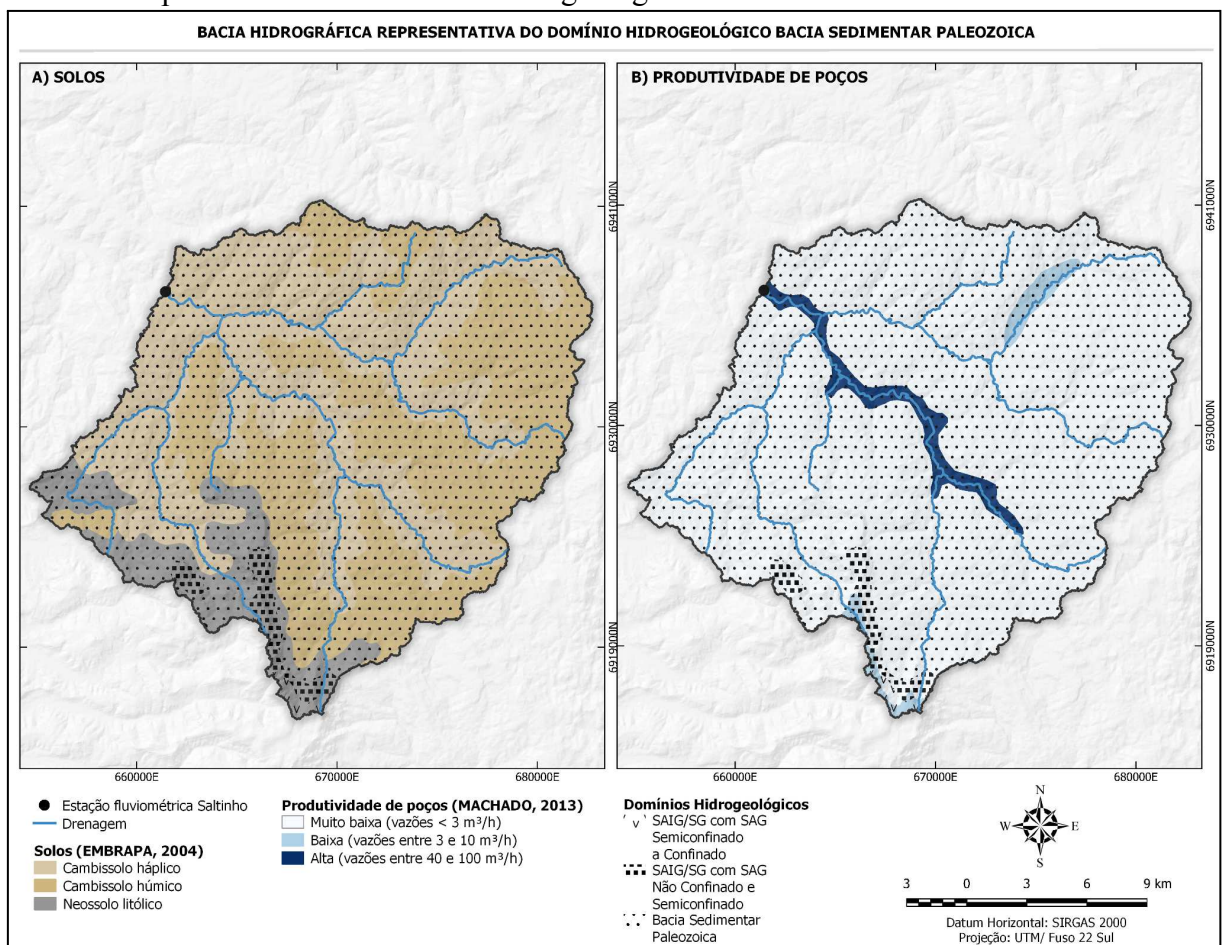
Domínio Geológico	Grupo	Unidade	Litologia/ambiente
Sedimentação Gondwânica (Bacia do Paraná) - Supergrupo Tubarão	Itararé: “Sedimentação periglacial, subglacial glácio-marinha e glacial”	Formação Taciba	“Conglomerados polimíticos com matriz arenosa. Arenitos finos a grossos com estratificação cruzada, plano-paralela e maciça, localmente conglomeráticos. Alternância de folhelhos e siltitos com grânulos, seixos e matacões pingados. Ambiente deposicional na interface continente-plataforma marinha com influência glacial”
	Guatá: “sedimentação plataformal costeira, marinho de costa-afora e flúvio-deltaico”	Formação Rio Bonito	“Arcóseo, siltito, siltito carbonoso e quartzo-arenito, folhelho carbonoso e carvão, <i>tonstein</i> , diamictito com matriz carbonosa e marga, ambiente flúvio-deltaico, litorâneo e marinho plataformal”
		Formação Palermo	“Siltito, siltito arenoso, arenito fino a muito fino e folhelho, lente de arenito grosso e conglomerado com seixos discoides, ambiente marinho de costa-afora com influência de tempestades”
Sedimentação Gondwânica (Bacia do Paraná)	Passa Dois: “Sedimentação fluvial a lagunar gradando a plataformal costeiro raso e costa-afora”	Formação Irati	“Folhelho, siltito e argilito, calcário, marga e folhelho betuminoso portador de répteis mesossaurídeos, ambiente marinho de costa-afora, deposição por decantação em águas calmas abaixo do nível de ação de ondas; períodos de estratificação da coluna de água com influência de tempestades”
		Formação Serra Alta	“Depósitos marinhos compreendendo argilitos, folhelhos e siltitos cinza-escuro, com lentes e concreções calcíferas”
		Formação Teresina	“Depósitos marinho rasos representados pela alternância de argilitos e folhelhos cinza-escuro com siltitos e arenitos muito finos cinza-claro, apresentando laminação <i>flaser</i> , com ocorrência de calcários, por vezes oolíticos e leitos de coquina intercalados na porção superior”
		Formação Rio do Rasto	“Pelito e arenito com dominância de camadas tabulares ou lenticulares muito estendidas, ambiente lacustre (Mb. Serrinha); siltito tabular, arenito fino tabular ou lenticular, ambiente lacustre, deltaico, eólico e raros depósitos fluviais (Mb. Morro Pelado)”
Sedimentação Gondwânica (Bacia do Paraná)	-	Formação Botucatu	“Arenitos eólicos de ambiente desértico, avermelhados, finos a médios, com estratificações cruzadas de médio a grande porte; localmente, arenitos argilosos mal selecionados de ambiente lacustre, mais frequentes na base da formação”
Magmatismo Serra Geral (Bacia do Paraná) - Supergrupo São Bento	Serra Geral	-	“Basaltos, basalto andesitos, riocacitos e riolitos, de filiação tholeiítica, com arenitos intertrápicos Botucatu na base e litarenitos e sedimentos vulcanogênicos da porção mediana no topo da sequência”

Fonte: Wildner *et al.* (2014).

Há três tipos de solo nesta bacia hidrográfica representativa (Figura 36): 46,8% de cambissolo háplico nos fundos de vales (de textura argilosa, moderadamente drenado e com

profundidade de 60 a 150 centímetros); 41,2% de cambissolo húmico nos topos dos interflúvios formados pelos patamares (de textura argilosa, moderadamente drenado e com profundidade de 60 a 150 centímetros); e 12% de neossolo litólico (de textura média, moderadamente drenado e com profundidade < 60 centímetros). Por situar-se nos interflúvios, o cambissolo húmico seria o mais favorável como área de recarga em detrimento do cambissolo háplico. Contudo, ambos são argilosos, dificultando a infiltração.

Figura 36 – Composição pedológica e produtividade de poços da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.



Fonte: Adaptado de Embrapa (2004) e Machado (2013).

As altitudes nessa bacia hidrográfica representativa variam entre 443 e 1.747 metros. Regionalmente, ela engloba a porção do alto curso do Rio Itajaí do Sul e é controlada especialmente pelos processos de desgaste e erosão, com os cursos d'água seguindo as linhas estruturais da Bacia Sedimentar do Paraná (SANTA CATARINA, 1986). As camadas, principalmente aquelas de arenitos da Formação Rio Bonito, estão dispostas na forma de relevos tabulares de chapadas, compreendidos pela unidade geomorfológica Patamares do

Alto Rio Itajaí. As camadas mais resistentes de arenito apresentam-se em patamares estruturais, conhecidos como degraus, enquanto nas encostas os afloramentos de arenitos configuram linhas de cornijas. Também são encontradas *cuestas*, no sul, no contato com o compartimento Planalto dos Campos Gerais, com o basalto da Formação Serra Geral como cornija e reverso. O desnível nas escarpas deste compartimento pode alcançar até 500 metros, dada a dissecação dos rios em vales profundos (LUIZ, 2016). A rede de drenagem varia de paralela e semiparalela a montante até aproximadamente dentrítica a jusante em função do controle exercido pelos falhamentos da Bacia Sedimentar do Paraná (FUCK *et al.*, 2014).

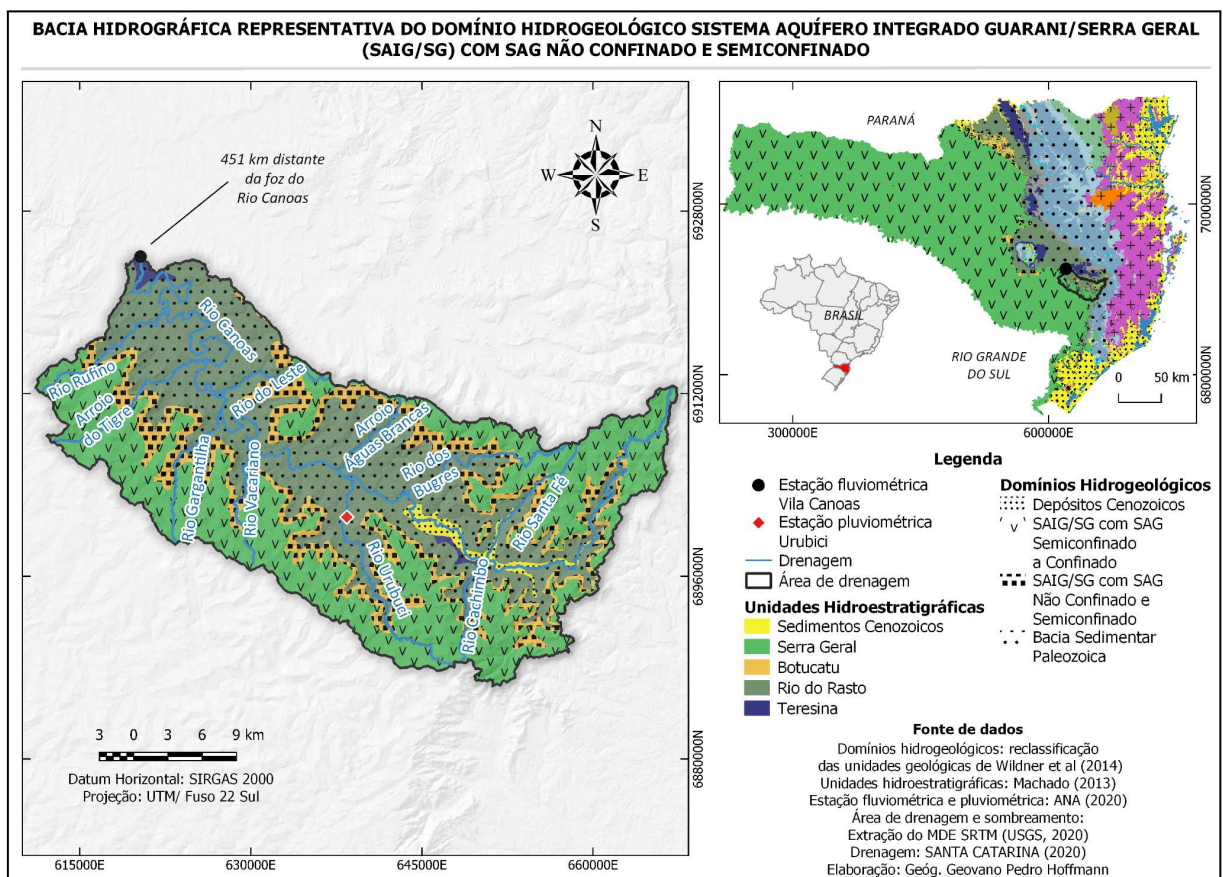
Grande parte do relevo residual de topo plano e de colinas suaves da unidade geomorfológica Patamares do Alto Rio Itajaí condiciona aquíferos semiconfinados a confinados, com porosidade intergranular ampliada por fraturamento, resultando em aquíferos sedimentares de menor potencialidade (Figura 36), com vazão em poços muito baixa ($< 3 \text{ m}^3/\text{h}$) nas formações que contém arenitos finos, folhelhos e siltitos pretos. Seguidamente, onde o relevo montanhoso é bastante entalhado, afloram aquíferos locais e limitados, formados pela sequência de arenitos finos, argilitos, folhelhos, siltitos e, em determinados locais, derrames basálticos que constituem aquíferos do tipo intergranular e fraturado, com vazões em poços muito baixas (vazões $< 3 \text{ m}^3/\text{h}$). No baixo curso da bacia hidrográfica representativa, há apenas um fundo de vale contendo uma área com vazões altas (entre 40 e 100 m^3/h) (MACHADO, 2013).

As áreas praticamente sem aquíferos encontram-se no setor montanhoso formado pelas *cuestas* da Serra Geral. Nelas, são encontrados folhelhos, argilitos, siltitos e arenitos associados aos derrames basálticos, em altitudes que variam entre 400 e 1400 metros, onde as vazões são insignificantes. Pequenas áreas isoladas de topo de morro são formadas por aquíferos fraturados também de menor potencialidade, sendo: uma a leste, formada por um afloramento de embasamento cristalino (gnaisses, granitoides, granitos e xistos), em condição de aquífero livre a semiconfinado, do tipo fraturado e regional, com vazões baixas (entre 3 e 10 m^3/h); e outra a oeste, formada pelo relevo residual ruiforme dos derrames basálticos e arenitos *intertraps* do magmatismo Serra Geral, em altitude entre 700 e 1800 metros no Morro dos Padres, também em condição de aquífero livre a semiconfinada, do tipo fraturado e regional, com vazões baixas (entre 3 e 10 m^3/h) (MACHADO, 2013).

3.1.2.3 SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado

A bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado é a área de drenagem da estação fluviométrica Vila Canoas (Figura 37), localizada na bacia hidrográfica do Rio Canoas, tributário do Rio Uruguai, no município de Bocaina do Sul, na Serra Catarinense. A área de drenagem calculada é de 1.013 km² e as estações fluviométrica e pluviométrica têm dados diários desde o ano de 1957 até os dias atuais. As unidades hidroestratigráficas aflorantes compreendidas pela bacia representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG são Botucatu e Serra Geral, nas encostas, e, no fundo de vale, as unidades Rio do Rasto e, parcialmente, Teresina e Sedimentos Cenozoicos.

Figura 37 – Mapa de localização da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Não Confinado e Semiconfinado.



Fonte: Elaboração própria.

As unidades hidroestratigráficas que têm maior extensão nessa bacia hidrográfica representativa (Quadro 16) são as unidades Serra Geral (42,0%) e Rio do Rasto (38,9%), seguidas das unidades Botucatu (16,2%), Sedimentos Cenozoicos (2,0%) e Teresina (0,9%).

As rochas aflorantes no fundo dos vales, e em parte das vertentes, pertencem àquelas que têm origem, sobretudo, dos ambientes de sedimentação da Bacia do Paraná. Estão presentes a Formação Teresina, em reduzido tamanho de área próximo ao exutório e no interior da bacia hidrográfica representativa; a Formação Rio do Rasto, de maior abrangência; e a Formação Botucatu, que aflora em uma estreita faixa nas escarpas do interior do vale do Rio Canoas. A unidade Depósitos Aluvionares se encontra disposta no entorno do Rio Canoas e dos respectivos tributários ao longo do baixo e em parte do médio curso da região da bacia hidrográfica representativa desse domínio hidrogeológico.

Quadro 16 – Unidades geológicas aflorantes na bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado.

Domínio Geológico	Grupo	Unidade	Litologia/Ambiente
Coberturas Sedimentares do Cenozoico	-	Depósitos Aluvionares	“Areias grossas a finas, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos, em calhas de rios e planícies de inundação”
Sedimentação Gondwânica (Bacia do Paraná)	Passa Dois: “Sedimentação fluvial à lagunar gradando a plataformal costeiro raso e costa-afora	Formação Teresina	“Depósitos marinho rasos representados pela alternância de argilitos e folhelhos cinza-escuro com siltitos e arenitos muito finos cinza-claro, apresentando laminação <i>flaser</i> , com ocorrência de calcários, por vezes oolíticos e leitos de coquina intercalados na porção superior”
		Formação Rio do Rasto	“Pelito e arenito com dominância de camadas tabulares ou lenticulares muito estendidas, ambiente lacustre (Mb. Serrinha); siltito tabular, arenito fino tabular ou lenticular, ambiente lacustre, deltaico, eólico e raros depósitos fluviais (Mb. Morro Pelado)”
	-	Formação Botucatu	“Arenitos eólicos de ambiente desértico, avermelhados, finos a médios, com estratificações cruzadas de médio a grande porte; localmente, arenitos argilosos mal selecionados de ambiente lacustre, mais frequentes na base da formação”
Magmatismo Serra Geral (Bacia do Paraná) - Supergrupo São Bento	Grupo Serra Geral	-	“Basaltos, basalto andesitos, riocácitos e riolitos, de filiação tholeiítica, com arenitos intertrápicas Botucatu na base e litarenitos e sedimentos vulcanogênicos da porção mediana ao topo da sequência”
	-	Formação Gramado	“Derrames basálticos onde predominam formas de lóbulos, melanocráticos cinza; horizontes vesiculares espessos e abundantes onde predominam zeolitas, carbonatos, apofilita e saponita, estruturas de fluxo e <i>pahoehoe</i> ; intercalações frequentes com rochas sedimentares eólicas (intertrápicas) da Formação Botucatu”

Fonte: Wildner *et al.* (2014).

As litologias que tiveram origem na sequência de eventos que envolveram o magmatismo fissural intracontinental fazem parte do Supergrupo São Bento. O Supergrupo

São Bento está subdividido na seguinte ordem cronológica, conforme Wildner *et al.* (2014): Grupo Serra Geral, Formação Campo Erê, Formação Cordilheira Alta, Formação Palmas, Formação Chapecó, Formação Campos Novos, Formação Paranapanema e Formação Gramado. Na área da bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado afloram, topograficamente acima das camadas sedimentares da Bacia do Paraná, as unidades geológicas Grupo Serra Geral e Formação Gramado.

O Grupo Serra Geral compreende a área no norte e leste da bacia hidrográfica representativa do domínio hidrogeológico em questão, incluindo o Morro do Campo dos Padres, fazendo limite na extremidade sul com a área aflorante da Formação Gramado, onde a Serra Geral é conhecida localmente como Serra do Corvo Branco. Já a Formação Gramado tem como extremidade ao norte a Serra do Corvo Branco. Ela abrange toda a porção aflorante do topo da sequência gonduânica da Bacia Sedimentar do Paraná no sul da bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado, incluindo o Morro da Igreja. O Grupo Serra Geral e a Formação Gramado integram o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e a Formação Botucatu constitui o Sistema Aquífero Guarani (SAG), cujo conjunto, conforme Scheibe e Hirata (2008), é hidrogeologicamente conectado e constitui o Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG).

Em termos de relevo, a área da bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado está situada na borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná. O baixo curso é uma extensão da unidade geomorfológica Planalto de Lages. A dissecação homogênea das rochas sedimentares das Formações Botucatu, Rio do Rasto e Teresina nessa área do Planalto de Lages tem uma configuração em colinas acompanhada de relevos residuais, como os morros testemunhos, além de uma faixa de acumulação fluvial de sedimentos em planície e nos terraços adjacentes ao Rio Canoas (SANTA CATARINA, 1986).

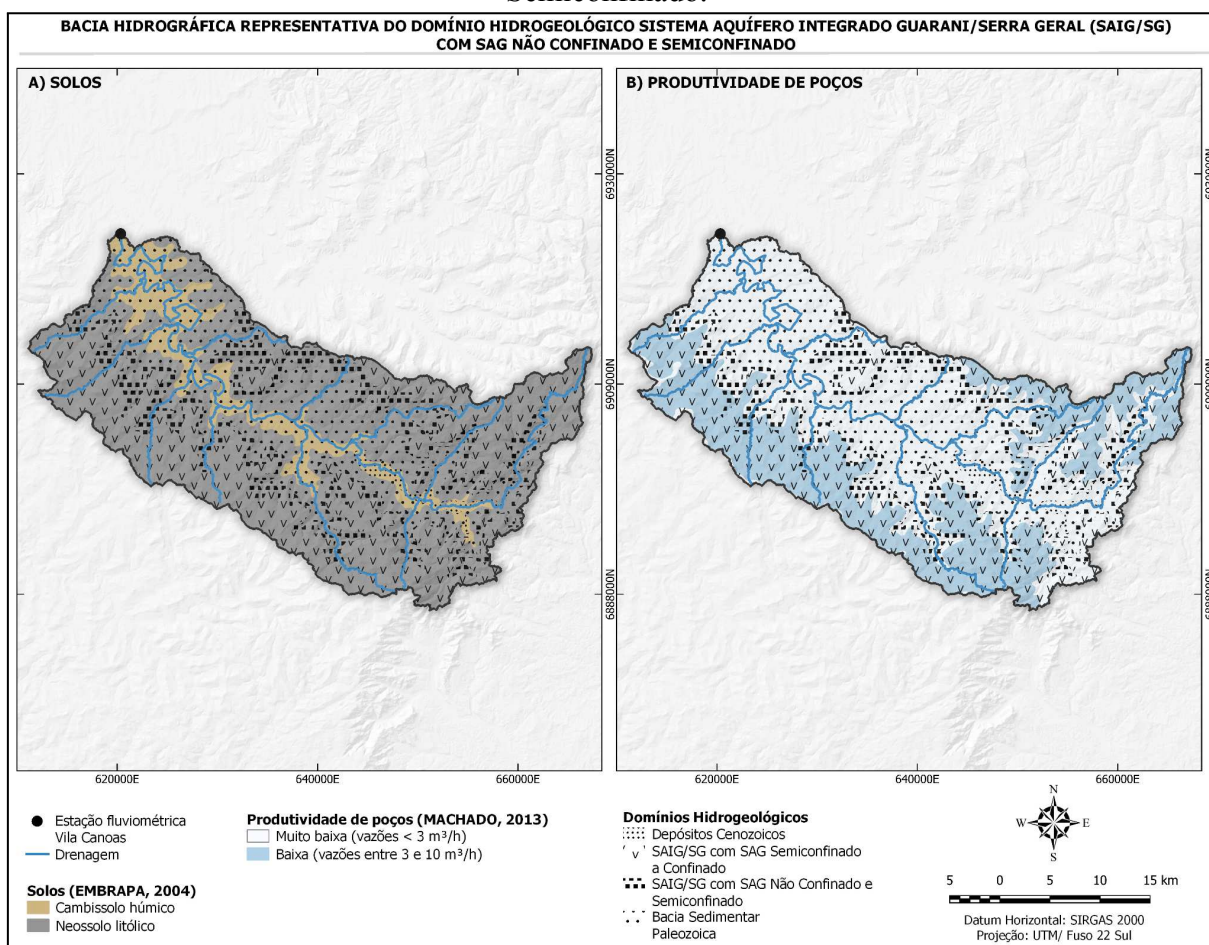
Os divisores de águas constituem um degrau geomorfológico superior em relação ao Planalto de Lages, onde se encontram as unidades de relevo Serra Geral, no norte e leste, e Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai, no sul. A Serra Geral é formada, em sua base, pelas camadas da Bacia Sedimentar do Paraná, e no topo pela sucessão de derrames de rochas efusivas basálticas. No contato com o Planalto de Lages, a Serra Geral forma escarpas que podem conter desníveis com mais de 1.000 metros de altitude e com interflúvios em crista que exercem controle estrutural, levando ao encaixamento dos rios (LUIZ, 2016). Por outro lado, o Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai tem o relevo com interflúvios mais estreitos e vales profundos, havendo como estrutura um topo plano ou convexo e uma vertente de

elevada declividade, podendo apresentar-se na forma de patamares e anfiteatros (SANTA CATARINA, 1986), que na área em questão contempla apenas as bordas em escarpa de falha desse planalto (LUIZ, 2016). A altimetria da bacia hidrográfica representativa varia entre 840 e 1.820 metros.

O Rio Canoas tem uma direção-geral Sudeste-Noroeste (SANTA CATARINA, 1986), sugerindo que esse vale está condicionado a um grande lineamento regional nessa mesma direção. É possível que esse lineamento esteja associado à intrusão de corpos alcalinos na área de influência da conformação do Domo de Lages (ROLDAN, 2007), de forma que tenha propiciado o desenvolvimento de blocos falhados, soerguidos e também basculados no município de Urubici (FERREIRA, 2016).

Nas áreas de várzeas, onde se encontra o Planalto de Lages, afloram arenitos finos, folhelhos e siltitos pretos que constituem aquíferos sedimentares de menor potencialidade. As colinas suaves e o relevo residual de topo plano condicionam vazões muito baixas em poços ($< 3 \text{ m}^3/\text{h}$), pelo caráter semiconfinado a confinado e com porosidade intergranular ampliada por fraturamento (Figura 38). No terço inferior das encostas das unidades geomorfológicas Serra Geral e, em parte do terço inferior da unidade geomorfológica do Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai, predominam aquíferos locais e limitados, na forma de aquíferos e aquíferos intergranulares e fraturados em áreas de relevo montanhoso e entalhado. Esses aquíferos compreendem as unidades geológicas permianas e cretáceas (arenitos finos, argilitos, folhelhos, siltitos e derrames basálticos) resultando em vazões também muito baixas em poços ($< 3 \text{ m}^3/\text{h}$). Seguindo o contorno das escarpas das unidades geomorfológicas Serra Geral e Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai no interior da bacia hidrográfica representativa estão dispostos aquíferos, aquíferos e aquíferos que formam as áreas praticamente sem aquíferos. Essas áreas de escarpa apresentam folhelhos, argilitos, siltitos e arenitos silicificados associados às rochas basálticas, que implicam em vazões que chegam a ser insignificantes. As áreas de maior altitude da bacia hidrográfica representativa, onde estão as unidades Serra Geral e Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai possuem aquíferos fraturados de menor potencialidade, formados por derrames basálticos e arenitos *intertraps*, em condição de aquíferos livres a semiconfinados (fraturados e regionais), com vazões baixas em poços (entre 3 e $10 \text{ m}^3/\text{h}$) (MACHADO, 2013).

Figura 38 – Composição pedológica e produtividade de poços da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado.



Fonte: Adaptado de Embrapa (2004) e Machado (2013).

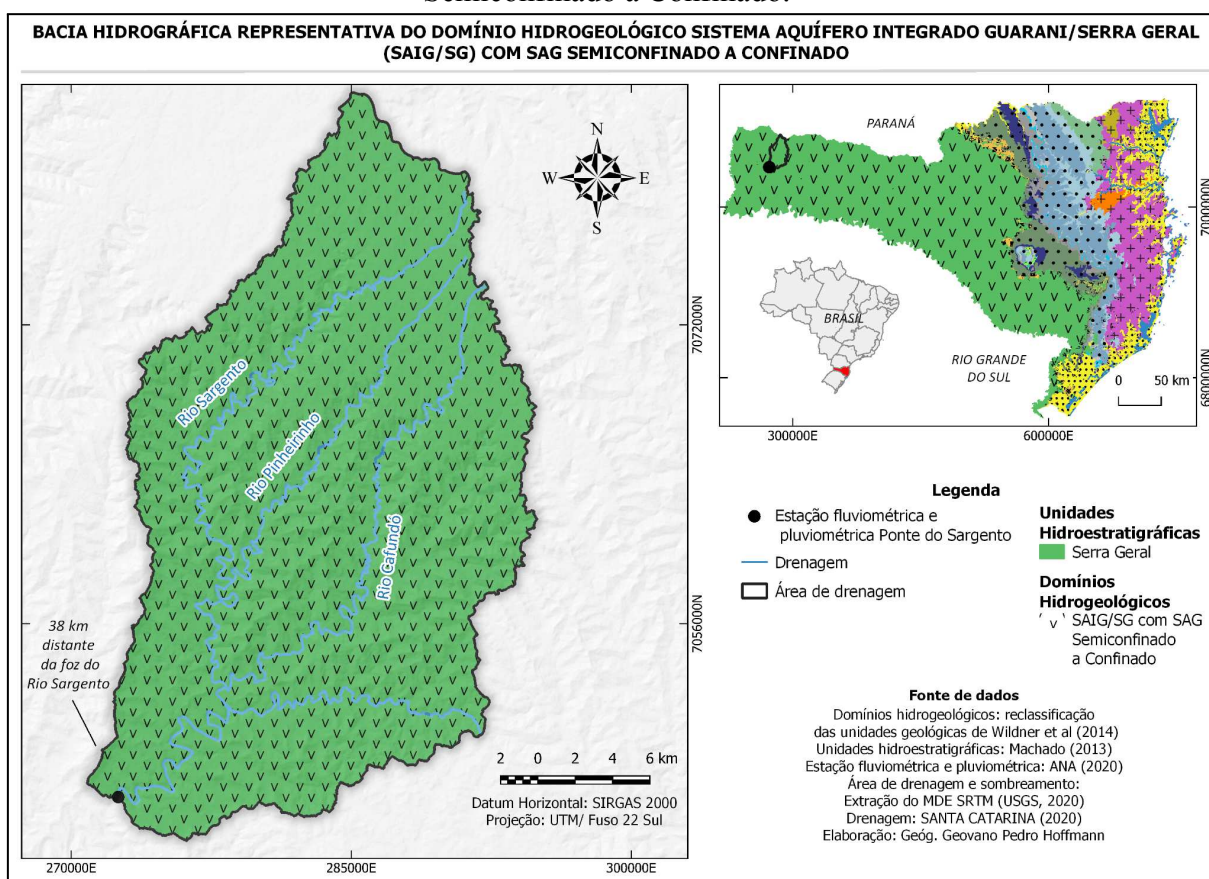
Grande parte dessa bacia hidrográfica representativa (Figura 38) é composta por neossolos litólicos (de textura média a argilosa, moderadamente drenados e com profundidade < 60 centímetros) em cerca de 85,5% da área total, correspondente às encostas. No baixo curso do vale, em aproximadamente 14,5% da área total, encontram-se cambissolos húmicos (de textura muito argilosa, moderadamente drenados e com profundidade de 60 a 150 centímetros).

3.1.2.4 SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado

A área de drenagem da estação fluviométrica Ponte do Sargento (Figura 39) define a bacia hidrográfica representativa a ser considerada no Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado. Está localizada no município de Romelândia, no

Extremo Oeste de Santa Catarina, e integra parte da bacia hidrográfica do Rio Sargento, tributário do Rio Uruguai. A área de drenagem calculada é de 607 km². A estação fluviométrica tem dados desde 1965, enquanto a estação pluviométrica tem dados desde 1969. Está em andamento a construção da PCH Jaspe (ANEEL, 2023), no município de Romelândia, a montante da estação fluviométrica. A unidade hidroestratigráfica aflorante compreendida pela bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado é exclusivamente a Serra Geral, descrita por Machado (2013).

Figura 39 – Mapa de localização da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Semiconfinado a Confinado.



Fonte: Elaboração própria.

Afloram na bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado (Quadro 17) as unidades do Supergrupo São Bento: Formação Campo Erê, na porção ao norte; Formação Paranapanema e, em pequenas manchas, a Formação Cordilheira Alta, na porção centro-sul (WILDNER *et al.*, 2014). Essas formações fazem parte de um

único grupo de rochas vulcânicas que contêm sedimentos intertrâpicos, com a denominação de Serra Geral, e apresentam constituição de caráter básico (FREITAS, CAYE e MACHADO, 2002). No que diz respeito à hidrogeologia, essa bacia hidrográfica representativa está completamente inserida na área de abrangência da unidade hidroestratigráfica Serra Geral (100%).

Quadro 17 – Unidades geológicas aflorantes na bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.

Domínio Geológico	Grupo	Unidade	Litologia/Ambiente
Magmatismo Serra Geral (Bacia do Paraná) - Supergrupo São Bento	-	Formação Campo Erê	“Basaltos granulares finos a médios, melanocráticos cinza; horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilitas e saponita; estruturas de fluxo <i>pahoehoe</i> comuns”
	-	Formação Cordilheira Alta	“Basaltos granulares finos, melanocráticos, com espessos horizontes vesiculares com quartzo (ametista), zeolitas, carbonatos, celadonita, Cu nativo e barita; compreende as maiores jazidas de ametista do estado”.
	-	Formação Paranapanema	“Basaltos microgranulares cinza, alterações nas faces de disjunção vermelho amarronadas, horizontes vesiculares espessos preenchidos por quartzo (ametista), zeolitas, carbonatos, celadonita, Cu nativo e barita”

Fonte: Wildner *et al.* (2014).

Ao norte da bacia hidrográfica representativa, entre a Serra da Fartura e a Serra do Capanema, está situada a unidade geomorfológica Planalto dos Campos Gerais, que corresponde à área de afloramento da Formação Campo Erê. À semelhança do Planalto de São Joaquim, nessa área assume a denominação de Planalto de Capanema, um dos extensos compartimentos individualizados por vales largos e profundos de um dos maiores rios de Santa Catarina, o Rio Uruguai e os respectivos tributários. Esse planalto segue a conformação

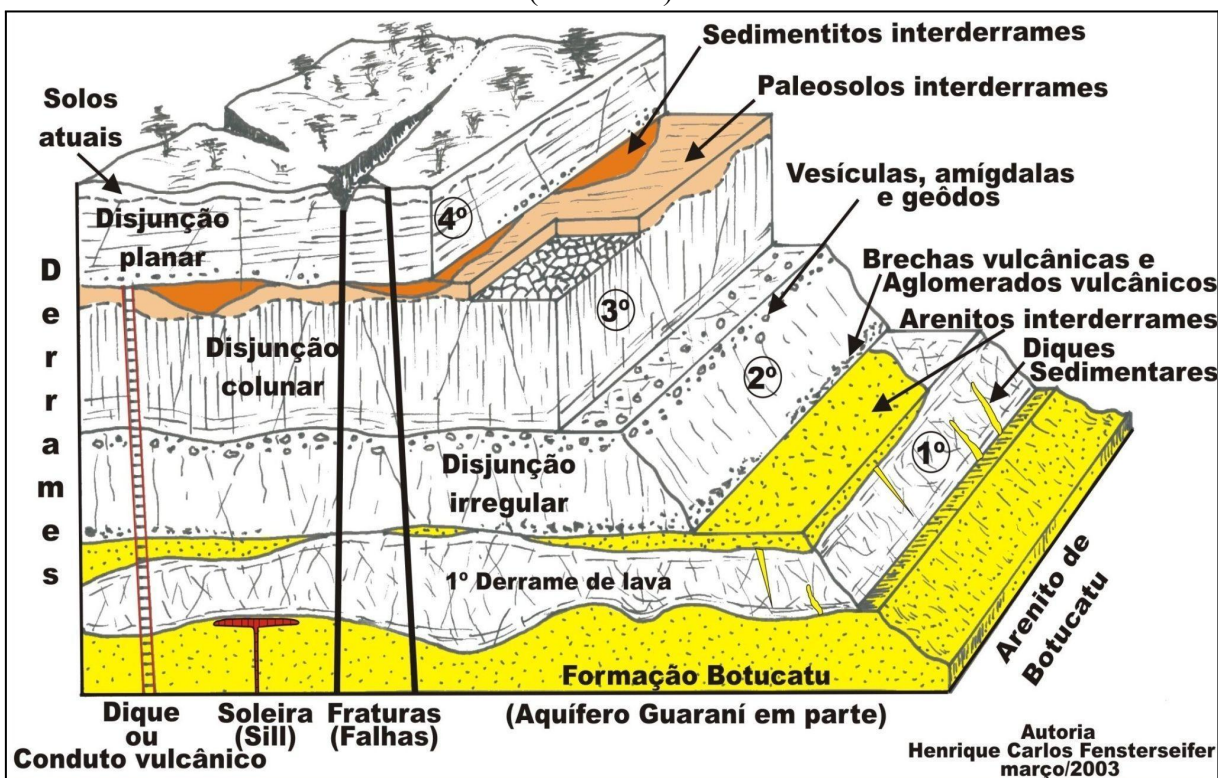
de um bloco preservado em meio às áreas adjacentes mais dissecadas, seguindo o decaimento da estrutura geológica da Bacia Sedimentar do Paraná, de leste para sudoeste, com vertentes alongadas de baixas declividades, além de topos convexos e solos profundos. É onde se encontra grande parte dos rios de primeira ordem (LUIZ, 2016), com altitudes que variam cerca de 800 a 951 metros.

Na porção centro-sul, formando uma plataforma topográfica inferior ao Planalto de Capanema, aproximadamente entre 325 e 800 metros de altitude, está a unidade geomorfológica Planalto Dissecado Rio Iguazu/Rio Uruguai, em área análoga ao afloramento da Formação Paranapanema. Essa unidade possui um relevo mais dissecado, com o interflúvio estreito e encostas de elevada declividade, podendo apresentar escarpas em determinados trechos. Os topos são planos ou quase convexos e as encostas podem ter degraus em patamares, constituindo modelados condicionados pela sequência de derrames de rochas efusivas (SANTA CATARINA, 1986), geralmente em estrutura horizontal e com diferentes graus de resistência ao intemperismo e à erosão. Os vales são profundos, com rios sinuosos e encaixados nas linhas de falhas, geralmente escoando sobre o leito rochoso ou algum depósito sedimentar de pouca espessura, sendo frequentes as corredeiras, cachoeiras e saltos (LUIZ, 2016).

É interessante assinalar que, segundo Leinz e Amaral (1987), cada derrame de rocha basáltica teria a seguinte estrutura vertical: uma base vítrea ocasionada pelo rápido resfriamento do magma sobre o substrato; uma porção intermediária inferior de basalto de textura microcristalina, com diáclases horizontais; uma porção intermediária superior de basalto de textura grosseira, com diáclases verticais, onde o resfriamento foi mais lento; e um topo formado por vesículas e amígdalas contendo zeólitas ou ágatas. As zonas com diáclases horizontais e de vesículas são as mais desgastadas por conta da retenção hídrica durante a percolação de águas, dando origem a fontes e ao desenvolvimento de vegetação. A posição das juntas na zona de diáclases verticais facilita a queda em blocos e molda uma vertente escarpada, que no empilhamento de derrames constitui um relevo na forma de degraus morfológicos, ou *trapps* em sueco.

Nem todos os derrames apresentam todas essas características internas (Figura 40). Pode haver, inclusive, a alternância dos basaltos com lentes e camadas de arenitos *intertrapps*, brechas peperíticas, sedimentos epiclásticos finos, conglomerados e paleossolos. Em relação à unidade hidroestratigráfica Botucatu (SAG), o SASG é concordante (MACHADO, 2013).

Figura 40 – Perfil estrutural esquemático do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG).



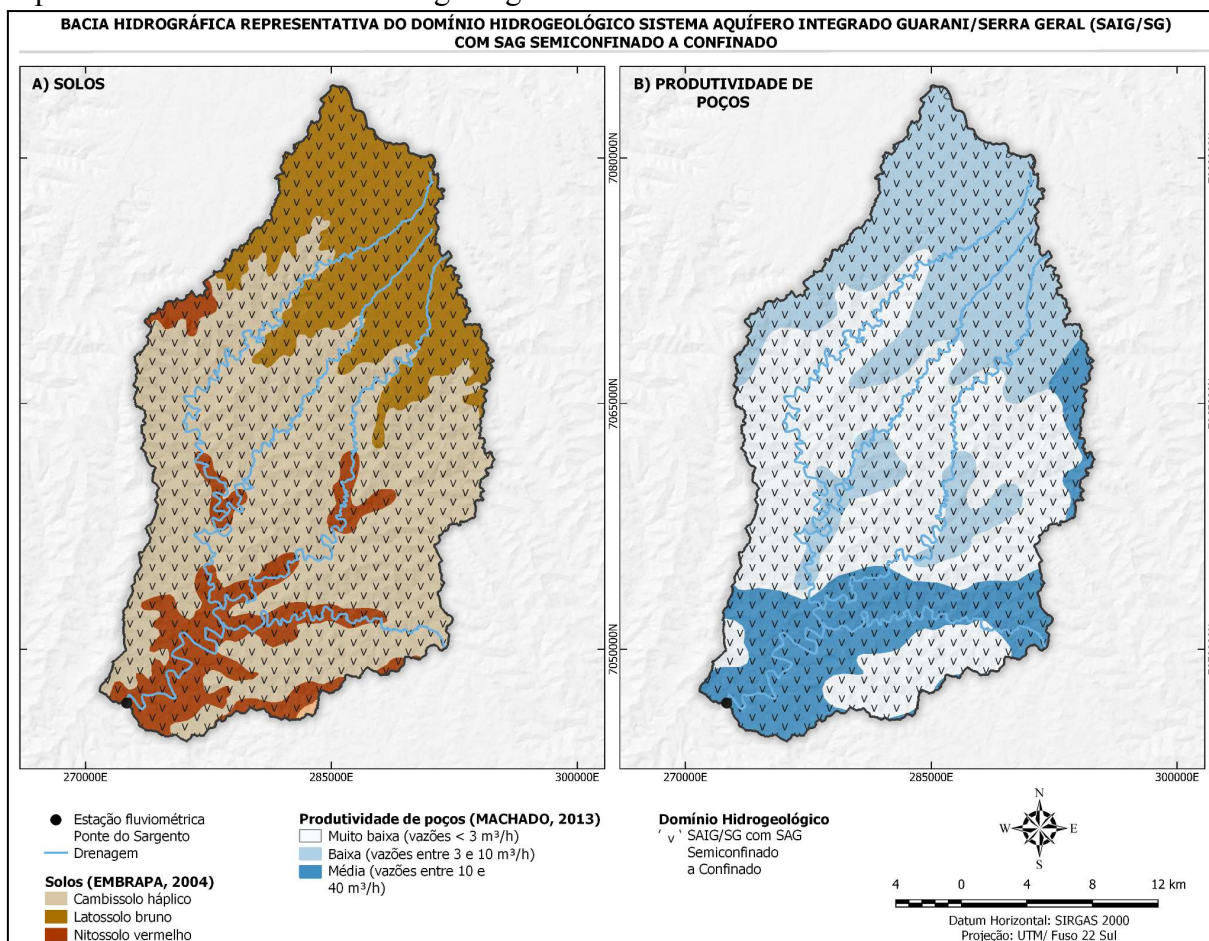
Fonte: Scheibe e Hirata (2008, p. 3).

Maiores armazenamentos de águas subterrâneas nessa unidade hidroestratigráfica ocorrem em relevos suaves e pouco dissecados, onde fraturas cortam os finos derrames empilhados e intercalados por autobrechas e arenitos intertrápicos. Áreas onde os derrames são espessos e maciços, ou onde o relevo é dissecado e com elevadas declividades, são menos propícias à ocorrência de armazenamento (FREITAS, CAYE e MACHADO, 2002).

Nas unidades geomorfológicas Planalto de Capanema (Planalto dos Campos Gerais) e em algumas áreas isoladas no centro da bacia hidrográfica representativa que abrange o Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai encontram-se aquíferos livres a semiconfinados (do tipo fraturado e regional) em relevo residual ruiforme. Os derrames basálticos e os arenitos *intertraps* configuram aquíferos fraturados de menor potencialidade, com vazões baixas em poços (entre 3 e 10 m³/h) - Figura 41. Principalmente na porção central do Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai dessa bacia hidrográfica representativa acham-se áreas de aquíferos locais e limitados pelo relevo montanhoso e declividades elevadas, representando vazões muito baixas em poços (< 3 m³/h). No entorno da área do exutório estão aquíferos de maior potencialidade, onde há relevo residual ruiforme e ondulado. Constituem-se de

aquíferos livres a semiconfinados (regionais e fraturados) com vazões médias em poços (entre 10 e 40 m³/h) (MACHADO, 2013).

Figura 41 – Composição pedológica e produtividade de poços da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.



Fonte: Adaptado de Embrapa (2004) e Machado (2013).

Não é descartada a recarga por fluxos ascendentes de águas do SAG nessa bacia hidrográfica representativa, principalmente na área do Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai, como verificado por Blank (2017) nos municípios de Quilombo e Águas Frias, também no Oeste Catarinense.

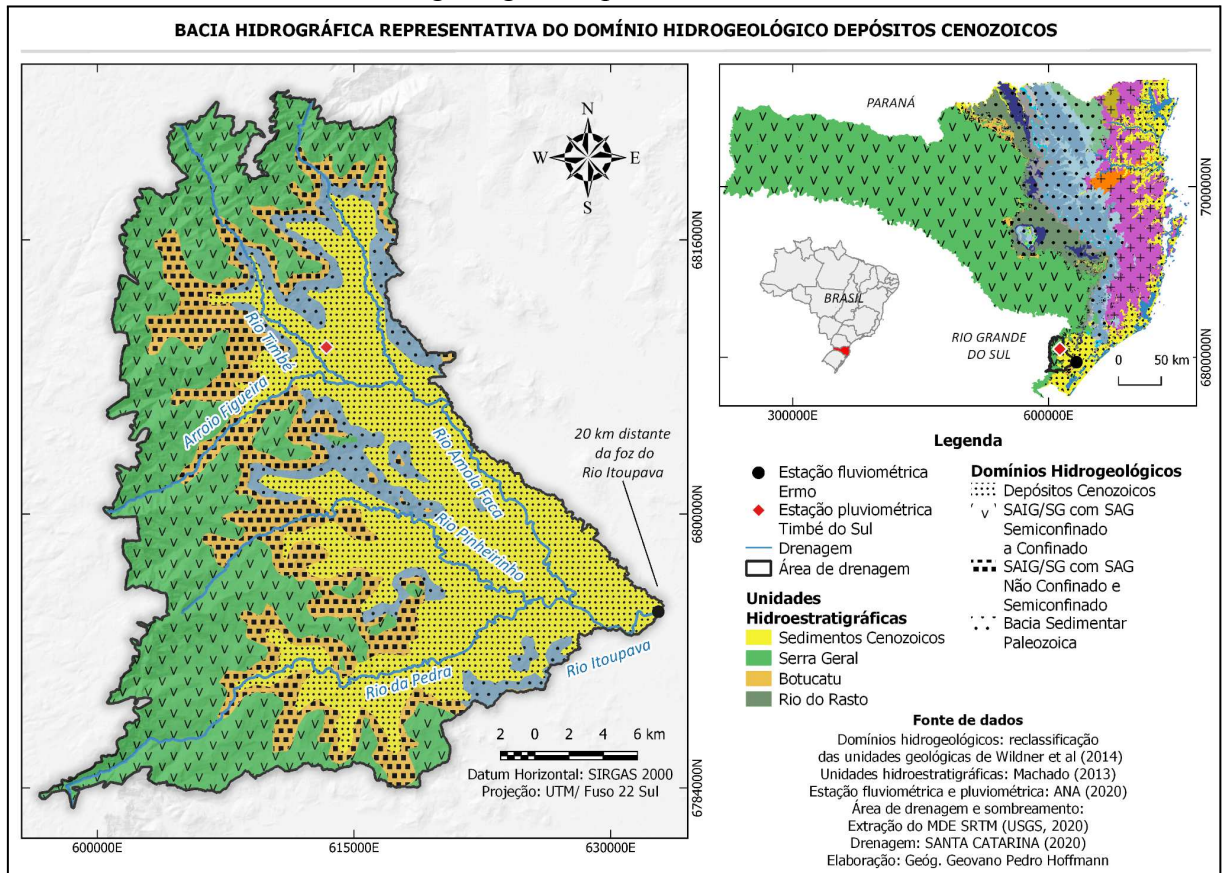
Na área do Planalto de Capanema (Planalto dos Campos Gerais) dentro dessa bacia hidrográfica representativa (Figura 41), há a ocorrência de latossolo Bruno (de textura muito argilosa, bem drenado e com profundidade superior a 150 centímetros), compreendendo 25,43% da área total. Altimetricamente mais abaixo, no Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai, o quadro é de 60,6% de cambissolo háplico (de textura argilosa, moderadamente

drenado e com profundidade de 60 a 150 centímetros) e 13,8% de nitossolo vermelho (de textura muito argilosa, bem drenado e com profundidade superior a 150 centímetros).

3.1.2.5 Depósitos Cenozoicos

Para o Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos, foi considerada a área de drenagem da estação fluviométrica Ermo, que delimita parte da bacia hidrográfica do Rio Itoupava e está localizada no município de mesmo nome. Essa bacia hidrográfica representativa está situada na região Sul do estado de Santa Catarina (Figura 42), uma das áreas mais extensas de cobertura por sedimentos Cenozoicos no litoral catarinense. Grande parte da bacia hidrográfica representativa inclui o Domínio Depósitos Cenozoicos, porém ressalta-se que abrange também os Domínios Bacia Sedimentar Paleozoica e SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado nos seus divisores topográficos, como acontece nos contrafortes da Serra Geral. As unidades hidroestratigráficas aflorantes compreendidas pela bacia representativa do Domínio Depósitos Cenozoicos são Sedimentos Cenozoicos, Rio do Rasto, Botucatu e Serra Geral.

Figura 42 – Mapa de localização da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.



Fonte: Elaboração própria.

Com efeito, nas bacias hidrográficas localizadas no Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos, ou seja, aquelas situadas na vertente do litoral catarinense, costuma haver a coexistência com outros domínios hidrogeológicos, especialmente com o Cristalino, com a Bacia Sedimentar Paleozoica e/ou com o SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado. Por conta disso, os resultados a serem discutidos acerca dessa bacia hidrográfica representativa requerem maior atenção, tendo em vista que não contêm apenas sedimentos cenozoicos. Entretanto, essa área elencada é, até a realização da presente pesquisa, de caráter único para a avaliação proposta. A sua escolha se justifica pela inexistência de uma bacia hidrográfica representativa exclusiva do Domínio Depósitos Cenozoicos no estado de Santa Catarina e em razão da insuficiência de estações fluviométricas em funcionamento que contemplassem, ao menos grande parte, desse domínio e que apresentassem séries longas de dados no litoral do estado.

Dentre as bacias hidrográficas representativas, a área de drenagem da estação fluviométrica Ermo foi a que apresentou maior discrepância entre a área de drenagem

calculada, de 833 km², e o valor de área disponibilizado na ANA (2020), de 863 km². A mudança de canais fluviais pela atividade agrícola pode estar associada a essa diferença encontrada, de forma que os cursos d'água em planície podem ter sido desviados para bacias hidrográficas adjacentes, o que poderia ter tornado a área do sistema de drenagem menor. A estação pluviométrica de referência de dados é a denominada Timbé do Sul, tendo em vista que a estação pluviométrica Ermo tem apenas período recente de registros. Este é o único posto pluviométrico com posição diferente da estação pluviométrica, entre as bacias hidrográficas representativas dos demais domínios hidrogeológicos, a qual está situada na área de drenagem. O período de dados da estação pluviométrica vai desde 1978 até os dias atuais, enquanto a estação pluviométrica tem dados desde o ano de 1976. Ressalta-se, no entanto, que apesar de a estação pluviométrica estar localizada na área de drenagem, a mesma pode não refletir o comportamento das chuvas que ocorrem na escarpa da Serra Geral, onde a precipitação tende a ser maior pelo efeito orográfico, como observado por Pellerin *et al.* (1997)¹⁰.

Uma das características dessa área é a distinção entre duas formas de relevo: de um lado a planície, onde está situado o Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos; de outro lado, as escarpas e os patamares da Serra Geral, onde estão os demais domínios hidrogeológicos. Nesse sentido, as encostas estão associadas a dois tipos de relevo, com variação altimétrica na bacia hidrográfica representativa entre 9 e 1.310 metros. A unidade geomorfológica Patamares da Serra Geral é uma faixa que apresenta conformações alongadas, parcialmente recobertas pelos leques aluviais que conformam a unidade geomorfológica Planícies Litorâneas, na forma de esporões interfluviais e morros testemunhos, remanescentes do recuo da escarpa da Serra Geral. São estruturados pela sequência de rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia Sedimentar do Paraná. Junto a esses patamares, a unidade geomorfológica Serra Geral se sobressai pelo escarpamento na direção mais comum NNE-SSO, em relevo íngreme, abrupto e formado por *canyons*, em vales fluviais com profundidades superiores a 500 metros (SANTA CATARINA, 1986).

¹⁰ Pellerin *et al.* (1997) verificaram que na catástrofe que aconteceu entre os dias 23 e 24 de dezembro de 1995, com ocorrência de deslizamentos e enxurradas nos municípios de Jacinto Machado e Timbé do Sul, houve localmente chuvas torrenciais com ocorrência nas cabeceiras dos rios Figueira e Pinheirinho, provocadas pelo avanço da formação de *cumulunimbus* do oceano em direção às escarpas da Serra Geral, associada a uma frente fria. Em um evento como esse, é possível que chova mais de 400 milímetros de precipitação em menos de 24 horas, como ocorreu em Florianópolis naquele mesmo período. Contudo, as estações pluviométricas localizadas na sede desses municípios não refletiram a precipitação de um evento como esse, de modo que Jacinto Machado contabilizou 130 mm e Timbé do Sul apenas 48,6 mm.

Originados a partir de movimentos de massa controlados por processos gravitacionais e fluviais, os depósitos de leques aluviais têm a geometria das camadas disposta de forma aproximadamente tabular nas áreas aflorantes e lenticular em subsuperfície, podendo a água estar em fluxo livre, semiconfinado ou confinado (KREBS, 2004). Nesse sentido, apesar do aquífero ser livre em grande parte de sua extensão e com alta produtividade de extração de águas subterrâneas em pequenas profundidades, pela boa condutividade hidráulica, pode haver a ocorrência da condição semiconfinada, onde as camadas de sedimentos inconsolidados estão intercaladas com lentes de argila (MACHADO, 2013).

As rochas aflorantes (Quadro 18) nas encostas da bacia hidrográfica representativa são das unidades Grupo Serra Geral (que inclui a Formação Gramado e a Formação Palmas), Formação Botucatu e Formação Rio do Rasto. Nas áreas de várzea, os sedimentos aflorantes são das unidades geológicas Depósitos colúvio-aluvionares e Depósitos aluvionares (WILDNER *et al.*, 2014). Em termos de extensão dos afloramentos, a unidade hidroestratigráfica Serra Geral engloba a maior área (43,7%), seguida das unidades hidroestratigráficas Sedimentos Cenozoicos (33,2%), Botucatu (15,8%) e Rio do Rasto (7,3%).

Quadro 18 – Unidades geológicas aflorantes na bacia hidrográfica representativa dos Depósitos Cenozoicos.

Domínio Geológico	Grupo	Unidade	Litologia/Ambiente
Sedimentação Gondwânica (Bacia do Paraná)	Passa Dois: “Sedimentação fluvial a lagunar gradando a plataformal costeiro raso e costa-afora”	Formação Rio do Rasto	“Pelito e arenito com dominância de camadas tabulares ou lenticulares muito estendidas, ambiente lacustre (Mb. Serrinha); siltito tabular, arenito fino tabular ou lenticular, ambiente lacustre, deltaico, eólico e raros depósitos fluviais (Mb. Morro Pelado)”
Sedimentação Gondwânica (Bacia do Paraná)	-	Formação Botucatu	“Arenitos eólicos de ambiente desértico, avermelhados, finos a médios, com estratificações cruzadas de médio a grande porte; localmente, arenitos argilosos mal selecionados de ambiente lacustre, mais frequentes na base da formação”
Magmatismo Serra Geral (Bacia do Paraná) - Supergrupo São Bento	-	Formação Palmas	“Rochas de composição intermediária a ácida, riolitos, mesocráticos, microgranulares a vitrofíricos, textura esferulítica comum (tipo carijó); forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciço na porção central, dobras de fluxo e autobrechas frequentes; vesículas preenchidas predominantemente por calcedônia e ágata”
	-	Formação Gramado	“Derrames basálticos onde predominam formas de lóbulos, melanocráticos cinza; horizontes vesiculares espessos e abundantes onde predominam zeolitas, carbonatos, apofilita e saponita, estruturas de fluxo e <i>pahoehoe</i> ; intercalações frequentes com rochas sedimentares eólicas (intertrápicas) da Formação Botucatu”
Coberturas Sedimentares do Cenozoico	-	Depósitos Colúvio-aluvionares	“Conglomerados, arenitos conglomeráticos, areia grossa a fina, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos recobrimdo vertentes e encostas, calhas de rios e planícies de inundação. Inclui os depósitos eluvionares recentes, de expressão restrita, com grande variação granulométrica e estratificação incipiente ou ausente”
	-	Depósitos Aluvionares	“Areias grossas a finas, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos, em calhas de rios e planícies de inundação”

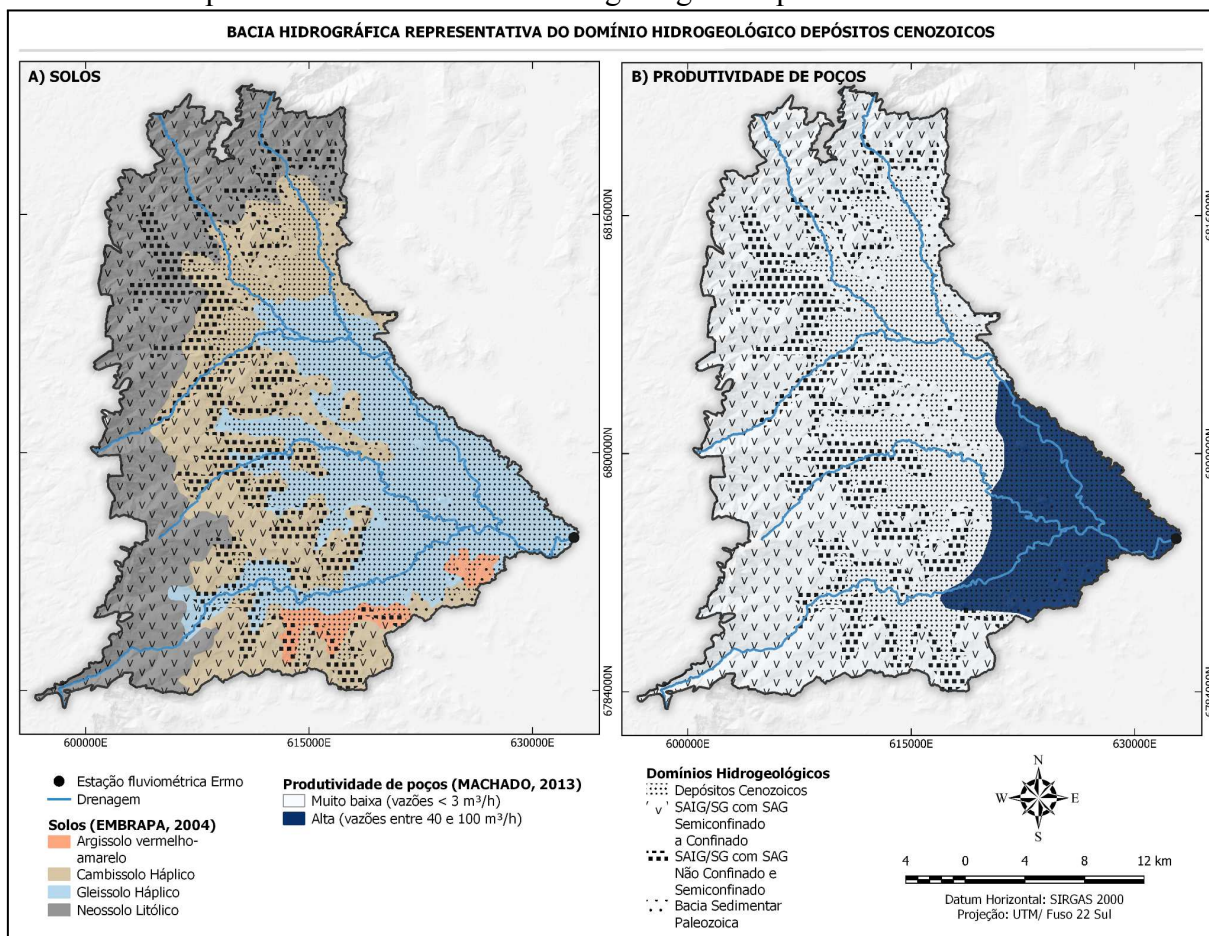
Fonte: Wildner *et al.* (2014).

A área de ocorrência do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos é identificada por Krebs (2004, p. 308) como sendo dos depósitos de leques aluviais. É um sistema aquífero intergranular extenso que se caracteriza por duas sequências distintas de depósitos, sendo “uma inferior, formada quase exclusivamente por material grosso, grânulos, seixos, cascalhos e blocos (que constitui o intervalo aquífero), e outra superior, de natureza areno-argilosa”. Particularmente nos municípios próximos à encosta inferior do planalto gondwânico (Timbé do Sul, Meleiro e Jacinto Machado), a cobertura de leques aluviais, que constitui a sequência superior, é fina, apresentando no máximo dois metros de espessura. Esse conjunto de leques aluviais junto ao sopé das encostas, chamado de cabeceira do leque,

apresenta o desenvolvimento de um solo espesso que tem como material de origem a alteração de clastos de rochas efusivas que constituem esses depósitos, predominantemente de basaltos, como, por exemplo, em Timbé do Sul e Jacinto Machado. Essas áreas de leques aluviais possuem um material argiloso e de baixa permeabilidade que, pelo posicionamento junto às encostas, comportam-se como áreas de recarga e/ou circulação, enquanto nas áreas de menor declividade e de maior espessura dos leques aluviais (denominada de leque proximal) favorecem tanto a recarga quanto o armazenamento das águas subterrâneas pela maior porosidade e permeabilidade (KREBS, 2004).

As encostas das unidades geomorfológicas Serra Geral e Patamares da Serra Geral são tratadas por Machado (2013) como áreas praticamente sem aquíferos (aquítardos, aquiocludes e aquífugos), com as vazões em poços muito baixas ($< 3 \text{ m}^3/\text{h}$) e sendo melhor o aproveitamento por nascentes (Figura 43). Entre as encostas das unidades geomorfológicas Serra Geral e Patamares da Serra Geral com a unidade geomorfológica Planícies Litorâneas, os aquíferos são locais e limitados (constituindo-se de aquítardos e aquíferos do tipo intergranular e fraturado) no entorno de grande parte do terço inferior das encostas localizadas na porção centro-norte da bacia hidrográfica representativa, caracterizadas também pelas baixas vazões em poços ($< 3 \text{ m}^3/\text{h}$). Já as várzeas da unidade geomorfológica Planícies Litorâneas apresentam aquíferos sedimentares de menor potencialidade (aquíferos livres, regionais e de porosidade intergranular) situados em altitudes menores que os aquíferos locais e limitados, possuindo vazões muito baixas em poços ($< 3 \text{ m}^3/\text{h}$). Por outro lado, há aquíferos sedimentares de maior potencialidade nas áreas de várzea (também na condição de aquífero livre, intergranular e de porosidade intergranular) no entorno do exutório da bacia hidrográfica representativa, com vazões altas em poços (entre 40 e $100 \text{ m}^3/\text{h}$).

Figura 43 – Composição pedológica e produtividade de poços da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.



Fonte: Adaptado de Embrapa (2004) e Machado (2013).

A composição pedológica da bacia hidrográfica representativa (Figura 43) é de 36,5% de neossolo litólico (de textura média, moderadamente drenado e com espessura menor que 60 centímetros), situado na escarpa e reverso da unidade geomorfológica Serra Geral; de 32,0% de cambissolo háplico (de textura argilosa, moderadamente drenado e com espessura entre 60 e 150 centímetros) e de apenas 2,4% de argissolo vermelho-amarelo (de textura argilosa, moderadamente drenado e com espessura entre 60 e 150 centímetros) entre as unidades geomorfológicas Patamares da Serra Geral e Planícies Costeiras; além de 29,0% de gleissolo háplico (de textura argilosa, de mal a muito mal drenado e com espessura menor que 60 centímetros), localizado nas unidades geomorfológicas de planície. Naturalmente, portanto, as áreas de planície dificultam a recarga subterrânea, enquanto as áreas de planalto permitem uma melhor retenção de águas.

Conforme Krebs (2004), é provável ocorrer recarga direta por precipitação através dos depósitos de leques e dos seus solos residuais ou recarga indireta por descarga subterrânea

de fluxos intermediários e regionais no Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos com origem das encostas, nas quais se incluem os morros-testemunho, as serras e as escarpas da Serra Geral. Além disso, eventualmente pode ocorrer a recarga indireta dos aquíferos pelos cursos d'água que drenam as áreas de várzea nos momentos de cheias, como observado em poços das bacias hidrográficas vizinhas dos rios Mãe Luzia e Sangão. Essa água retida é liberada na forma de descarga subterrânea nos cursos d'água, seja pela alta condutividade hidráulica dos sedimentos inconsolidados (alta permeabilidade e alta porosidade) seja também facilitado pelo fato do nível freático estar próximo da superfície. Interferências antropogênicas na vazão também podem interferir nessa avaliação, dado que historicamente os rizicultores realizam a captação de águas dos rios principais e levam a adução por quilômetros de distância para as suas áreas produtoras, o que pode ocasionar a recarga artificial dos aquíferos locais.

3.2 ÍNDICE DO FLUXO DE BASE (*BASEFLOW INDEX* - BFI)

Na interação aquífero-rio, considera-se que o escoamento de uma bacia hidrográfica é, na maioria das vezes, mantido pela descarga de águas subterrâneas conectadas aos rios (MILLER *et al.*, 2016). Essa situação ocorre nos períodos entre chuvas, quando o escoamento de base das águas das bacias hidrográficas corresponde inteiramente à descarga de águas dos aquíferos (escoamento de base). Assim, na proposta da presente pesquisa, o escoamento de base não é apenas uma componente de saída do balanço hídrico, como também é o saldo dele, uma vez que, quando identificado em uma estação fluviométrica, as águas desse tipo de escoamento já passaram pelos processos de perdas envolvidos no balanço hídrico após os eventos de precipitação/recarga subterrânea (escoamento superficial direto, evapotranspiração, bombeamentos e fluxos regionais), com exceção de áreas onde ocorre a importação de águas e o seu acréscimo ao escoamento de base (ex.: áreas urbanas metropolitanas). Para fins desta pesquisa, o conceito de escoamento de base adotado é o de Raffensperger *et al.* (2017, p. 3-4, tradução nossa¹¹), como sendo a:

“Descarga volumétrica de água, estimada em um local de medição ou estação na escala de bacia hidrográfica, que representa a água subterrânea que descarrega diretamente ou indiretamente em trechos fluviais e é então direcionada ao ponto de mensuração. Pode incluir fluxos produzidos por atividades antropogênicas (efluente

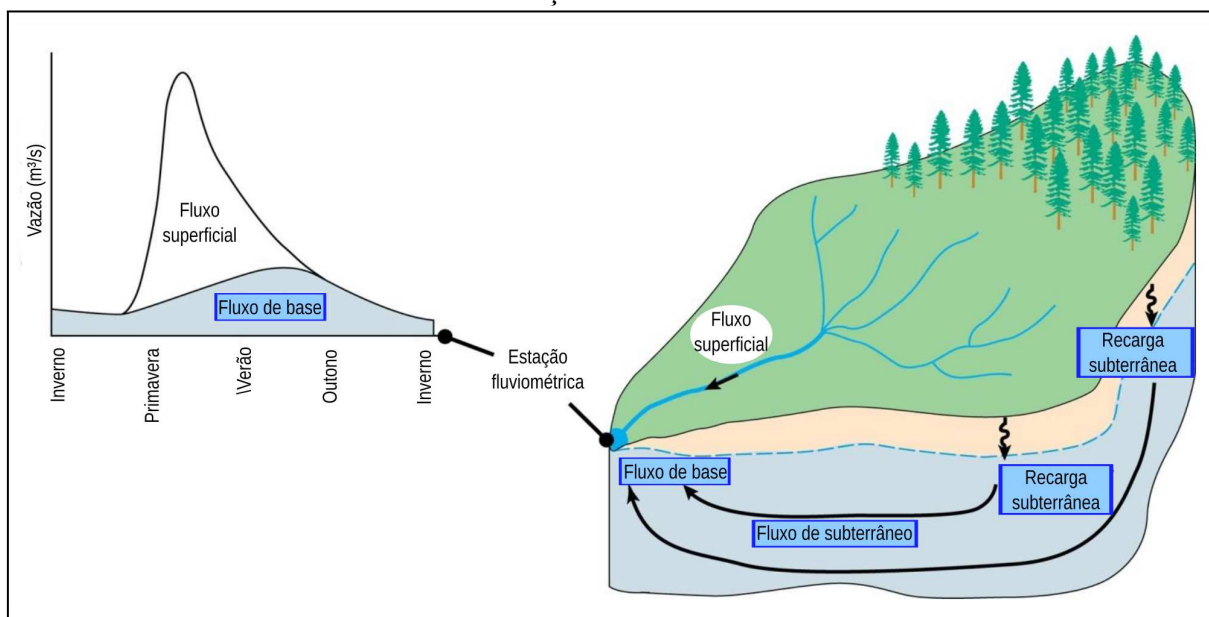
¹¹ No original: “[...] base flow is defined as the volumetric discharge of water, estimated at a measurement site or gage at the watershed scale, which represents groundwater that discharges directly or indirectly to stream reaches and is then routed to the measurement point. It may include other non-event flow produced by anthropogenic activities (wastewater treatment plant effluent, subsurface drainage, irrigation drainage)”.

da estação de tratamento de águas residuais, drenagem subsuperficial e/ou drenagem de irrigação).” (RAFFENSPERGER *et al.*, 2017, p. 03-04, tradução nossa).

A obtenção dos dados de descarga de águas subterrâneas ocorreu pelo método de separação do hidrograma. No âmbito do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, a recarga de águas (R) é a componente do ciclo hidrológico resultante da precipitação (P) e que não foi convertida em escoamento superficial direto (Es) e nem em evapotranspiração (Et), isto é, $R = P - Es - Et$. Após a infiltração, e descartando as perdas por bombeamentos e fluxos regionais, em escassez de dados no estado de Santa Catarina, a descarga de águas subterrâneas das bacias hidrográficas (Eb) é equivalente à recarga, ou seja, Eb é equivalente à $R = P - Es - Et$.

A análise das curvas de recessão de um hidrograma permite dimensionar a magnitude do armazenamento das águas dos aquíferos que estão em interação com a drenagem superficial da bacia hidrográfica. Na aplicação da equação geral do balanço hídrico a uma bacia hidrográfica, as águas que escoam pelo exutório são uma resposta à variável de entrada, a precipitação (FEITOSA e FEITOSA, 2008). Dessa maneira, as vazões registradas por um posto fluviométrico (Figura 44) indicam a síntese do balanço hídrico para a interação aquífero-rio. Como o escoamento de base já representa o saldo do balanço hídrico a partir da recarga subterrânea, não foram usados dados de precipitação e nem de evapotranspiração em estimativas. Acredita-se que para fins de estudos de caso, ou para outros objetivos de pesquisa, os dados das demais variáveis hidrológicas sejam pertinentes. Porém, no presente estudo foram usados unicamente dados de vazão das estações fluviométricas das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina, com exceção da precipitação, para fins de caracterização delas.

Figura 44 – Modelo conceitual de registro do escoamento de base na área de drenagem de uma estação fluviométrica.



Fonte: Adaptado de Klassen e Smerdon (2018, p. 13).

A análise da recessão (equivalente aos períodos secos ou dos períodos entre chuvas) consiste na separação do hidrograma do escoamento (E). A separação do hidrograma permite dimensionar e distinguir a componente de fluxo de base (E_b) em relação à componente de fluxo superficial direto (E_s), sendo $E = E_s + E_b$ (FREEZE e CHERRY, 2017), havendo diferentes métodos para estimar o fluxo de base (E_b).

Para a estimativa da descarga de águas subterrâneas em cada uma das bacias hidrográficas representativas da presente pesquisa, optou-se por utilizar a abordagem do Filtro Digital Recursivo. É uma técnica que vem sendo cada vez mais utilizada por exigir, de forma simples, a entrada de dados, e também pela eficiência de implementação (LI *et al.*, 2013). É também uma abordagem mais objetiva, fácil e rápida do que a abordagem gráfica, tendo em vista a aplicação automatizada por um filtro matemático passa-baixo para uma série histórica de vazões (FUREY e GUPTA, 2001).

Em um Filtro Digital Recursivo, a separação do hidrograma acontece com a aplicação de um algoritmo, que divide a vazão observada em escoamento superficial direto e em escoamento de base. Embora não seja clara a diferenciação entre esses fluxos na vazão observada, admite-se que o escoamento de base é a componente do hidrograma resultante da descarga de águas subterrâneas nos rios, que é reflexo das oscilações de longo prazo no armazenamento subterrâneo regional (COLLISCHONN e FAN, 2013).

Na abordagem do Filtro Digital Recursivo, o método do filtro de Eckhardt (2005) foi

elencado como algoritmo de separação do hidrograma das séries de vazões das bacias hidrográficas representativas considerando as seguintes razões:

- 1) Tratar-se de um método automático, que permite a estimativa do escoamento de base com maior objetividade e agilidade, quando comparado a outros métodos indiretos (ou não-traçadores) de separação do escoamento (SHAO *et al.*, 2020);
- 2) Todos os métodos indiretos de estimativa do escoamento de base apresentam incertezas e o filtro de Eckhardt tem o uso amplamente difundido, tendo sido adotado inclusive por instituições de pesquisa hidrogeológica no mundo, a exemplo do *United States Geological Survey* (USGS) (BARLOW *et al.*, 2015; RAFFENSPERGER *et al.*, 2017).
- 3) Por ser acessível economicamente, sem custos, para o processamento de dados, o que é fundamental na gestão de águas (OKELLO *et al.*, 2018).

O filtro de Eckhardt (2005) parte da premissa de que a descarga de águas de um aquífero é linearmente proporcional ao seu armazenamento (ECKHARDT, 2005). O filtro possui dois parâmetros, os quais podem ser determinados matematicamente a partir da premissa do reservatório linear, sendo eles, o coeficiente de recessão do fluxo de base (α) e o Índice Máximo do Fluxo de Base (*BFI_{máx}*) (RAFFENSPERGER *et al.*, 2017).

As séries históricas de dados diários de vazão foram obtidas de estações fluviométricas em funcionamento, selecionadas por não apresentarem interferência de barragens e com dados de acesso público do portal de dados hidrometeorológicos HidroWeb (ANA, 2020). Em cada bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico foi elencada uma estação fluviométrica, com ao menos 37 anos de dados hidrológicos, considerando o período de 1981 a 2018.

O ano de início do período de dados justifica-se pelo fato de que não há dados de uso e cobertura da terra anteriores ao ano de disponibilidade de dados do Projeto MapBiomas (2022), a partir de 1985. Nesse sentido, para avaliar a relação do uso e cobertura da terra com o escoamento de base, considerou-se o período de aproximadamente 8 anos, com quatro anos de dados de vazão anteriores e posteriores a cada cenário de uso e cobertura da terra (1985, 1993, 2001 e 2009), com exceção do cenário de 2018, que considerou apenas o período de 6 anos anteriores do próprio cenário (Tabela 2).

Tabela 2 – Correspondência entre o período de vazão para obtenção do BFI médio global e os cenários de uso e cobertura da terra observados.

Cenário de uso e cobertura da terra	Período de vazão para obtenção do BFI médio global
1985	1981-1988
1993	1989-1996
2001	1997-2004
2009	2005-2012
2018	2013-2018

Fonte: Elaboração própria.

O ano de 2018 foi o último com dados de vazão completos para a Estação Ermo (Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos), que teve os registros interrompidos em abril/2019 por falta de observador, de modo que o período em diante não foi contemplado até o cruzamento de dados na presente pesquisa (outubro/2022). A fim de aplicar a mesma metodologia aos cinco domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina, o ano de 2018 foi definido como o último para a análise da série histórica de vazões das demais estações fluviométricas utilizadas.








No *software* Hidro 1.4, da ANA, houve a importação de séries de dados diários de cada estação fluviométrica, no formato MDB, sendo identificados os valores diários consistidos e, na falta destes, os valores brutos da série de dados de cada estação, os quais foram exportados para o formato de colunas em planilha eletrônica. Dada a implantação de estações telemétricas a partir de 2013, houve a necessidade de um pré-tratamento, com a conversão de dados horários em dados diários para o preenchimento dos hiatos de tempo com dados interrompidos de séries de dados diários no formato MDB de quando as estações eram convencionais para as estações fluviométricas Ermo (com dados convencionais até outubro/2016) e Poço Fundo (com dados convencionais até dezembro/2014). As séries de dados telemétricos das estações utilizadas foram solicitadas à ANA para o período compreendido. Os dados horários (telemétricos) foram fornecidos no formato MDB e convertidos em planilha eletrônica, para colunas, usando o programa Hidro 1.4. Posteriormente, no LibreOffice Calc, os dados horários foram convertidos em dados diários pela função de somatório com o recurso da tabela dinâmica.

O Quadro 19 mostra a quantidade de falhas dos registros diários de vazões para cada ano. Nota-se que as estações fluviométricas sem falhas são a Vila Canoas (Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado) e Ponte do Sargento (Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado). A estação Ermo (Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos) apresenta cinco anos contendo 95% dos

registros diários e um ano com registros na faixa entre 75 e 95% de dados diários. A estação Saltinho (Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica) possui um ano com 95% dos registros diários, um ano entre 75 e 95% dos registros diários e um ano entre 50 e 75% dos registros diários. A estação com mais falhas de vazão é a estação Poço Fundo (Domínio Hidrogeológico Cristalino), que possui cinco anos contendo entre 75 e 95% dos registros diários, um ano entre 50 e 75% dos registros diários e dois anos consecutivos completamente sem dados. A falta de dados da estação Poço Fundo pode ter influenciado na relação realizada com o cenário de uso e cobertura da terra de 2009, que considera os dados desde o ano de 2005, apesar de terem sido usados os períodos de recessão de 2006 e 2009. Nas demais estações, por conter dados em um período maior que 50% do tempo de um ano onde havia falhas de registro, acredita-se que essa influência seja menor.

Quadro 19 – Quantidade de falhas de registros diários de vazão das estações fluviométricas das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos para cada ano.

Ano	Cristalino (Estação Poço Fundo- 84100000)	Bacia Sedimentar Paleozoica (Estação Saltinho - 83105000)	SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado (Estação Vila Canoas - 71200000)	SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado (Estação Ponte do Sargento - 74320000)	Depósitos Cenozoicos (Estação Ermo - 84949800)
1981					
1982					
1983					
1984					
1985					
1986					
1987					
1988					
1989					
1990					
1991					
1992					
1993					
1994					
1995					
1996					
1997					
1998					
1999					
2000					
2001					
2002					
2003					
2004					
2005					
2006					
2007					
2008					
2009					
2010					
2011					
2012					
2013					
2014					
2015					
2016					
2017					
2018					

	Sem dados: não contêm registros diários		Entre 75% e 95% dos registros diários: contêm entre 92 e 19 dias de falhas de registro diário
	< 25% dos registros diários: contêm mais de 274 dias de falhas de registro diário		> 95% dos registros diários: contêm menos de 19 dias de falhas de registro diário
	Entre 25% e 50% dos registros diários: contêm entre 274 e 183 dias de falhas de registro diário		Registros diários completos: todos os dias do ano possuem registros diários
	Entre 50% e 75% dos registros diários: contêm entre 183 e 92 dias de falhas de registro diário		

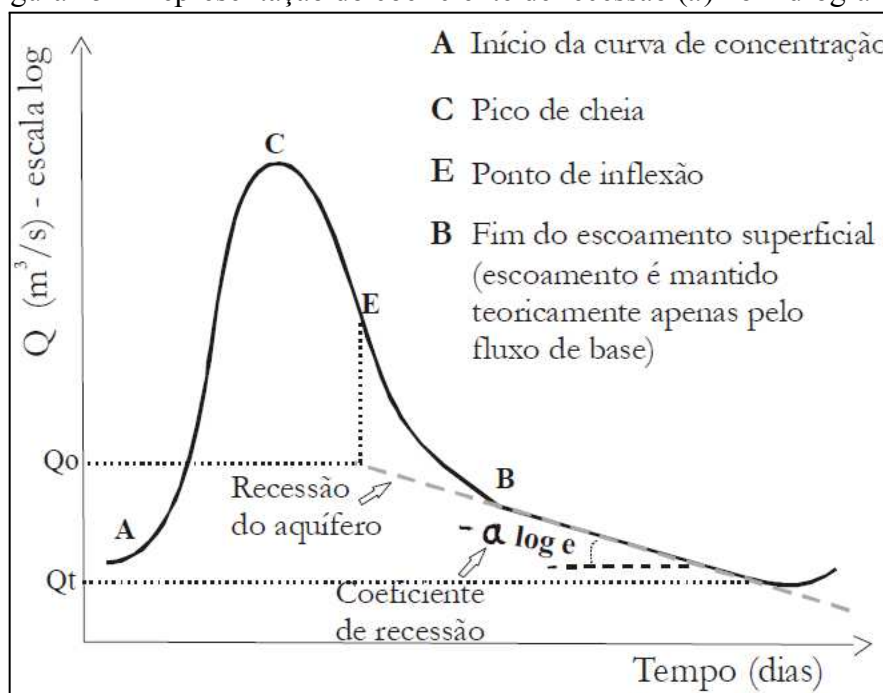
Fonte: ANA (2020); Elaboração própria.

Com a série de vazões diárias de cada estação fluviométrica tabulada em uma planilha eletrônica, admitindo as falhas de registro do Quadro 19, houve a compilação desses dados para um modelo de arquivo no formato RDB, que acompanha a documentação do *software* livre *Groundwater Toolbox* (BARLOW *et al.*, 2015). O código, o nome da estação fluviométrica e a área de drenagem foram substituídos nesse modelo de arquivo. Tanto o valor da área de drenagem das estações fluviométricas quanto das vazões diárias foram convertidas para padronização nas medidas estadunidenses usadas no *Groundwater Toolbox*. Dessa forma, a área de drenagem das bacias hidrográficas representativas foi multiplicada de km² para mi² (milhas quadradas) pelo fator de conversão 0,386. Por sua vez, as séries de vazões diárias foram multiplicadas de m³/s para ft³/s (pés cúbicos por segundo) pelo fator de conversão 35,31. Os cinco arquivos no formato RDB de cada estação fluviométrica, individualmente, foram importados ao *Groundwater Toolbox* para a separação do hidrograma a partir dos parâmetros Coeficiente de recessão (*a*) e Índice Máximo do Fluxo de Base (*BFI_{máx}*).

3.2.1 Coeficiente de recessão do fluxo de base (*a*)

O coeficiente de recessão ou coeficiente de esgotamento (*a*) é uma constante que representa o escoamento de base em decaimento exponencial no hidrograma para o período sem chuvas (ITGE/JUNTA DE ANDALUCÍA, 1998). Assim, no hidrograma, o coeficiente de recessão (*a*) é equivalente à inclinação da curva de recessão (Figura 45) e também pode ser encontrado com o nome de taxa de recessão (HISDAL *et al.*, 2004). O coeficiente de recessão (*a*) representa um valor único para a área de contribuição a montante do ponto exutório considerado de uma bacia hidrográfica (LEAP, 2016).

Figura 45 – Representação do coeficiente de recessão (a) no hidrograma.



Fonte: Adaptado de Custodio e Llamas (1976 apud Costa e Bacellar, 2010, p. 174).

O coeficiente de recessão (a) tem origem da Equação de Maillet (Equação 6), quando se assume que o comportamento de decaimento exponencial do fluxo de base em um hidrograma segue o modelo de um reservatório subterrâneo em descarga linearmente proporcional ao seu armazenamento durante os períodos sem chuvas (NATHAN e MCMAHON, 1990; CHAPMAN, 1999; AKSOY e WITTENBERG, 2011). Portanto, o coeficiente de recessão (a) representa a disponibilidade dos aquíferos em suprir os cursos d'água durante os períodos secos conforme o armazenamento.

O coeficiente de recessão (a) tem como unidade de medida [Tempo⁻¹] e varia entre 10⁻⁴ a 1, representando as características da bacia hidrográfica a ser avaliada. Via de regra, menores valores do coeficiente de recessão indicam maiores quantidades de água armazenada nos aquíferos (Figura 45), ou seja, mostram que seus volumes são mais consideráveis (FEITOSA e FEITOSA, 2008). Contudo, essa interpretação depende do resultado do método aplicado. Por exemplo, quando o coeficiente de recessão (a) é obtido com a equação exponencial a partir do valor do índice de recessão (k) (CAVAZZANNA, LASTORIA e GABAS, 2019), os valores passam a variar entre 10⁻³ e 10⁻¹ e a interpretação torna-se inversa, isto é, quanto menor o coeficiente de recessão, menor será o armazenamento, assim como menor será a duração da recessão e a contribuição subterrânea aos cursos d'água de uma bacia hidrográfica. Essa última interpretação foi aplicada no presente estudo e baseia-se na relação

de conversão entre o coeficiente de recessão (a) e o índice de recessão (k), ou seja, o número de dias de duração da recessão por ciclo logarítmico (Equação 11), conforme Eckhardt (2008).

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (11)$$

No geral, os coeficientes de recessão (a) acima de 0,900 indicam uma dominância do fluxo de base (BERHAIL, OUERDACHI e BOUTAGHANE, 2012). Os valores do coeficiente de recessão (a) variam, aproximadamente, entre 0,200 a 0,800 para o escoamento superficial direto; de 0,700 a 0,940 para o interfluxo ou escoamento subsuperficial; e de 0,930 a 0,995 para o fluxo de base, sendo que o fluxo de base corresponderia a uma variação angular de 41,0° a 44,7° (KLAASSEN e PILGRIM, 1975 apud NATHAN e MCMAHON, 1990). Quando considerada a velocidade de recessão, bacias hidrográficas dominadas pelo suprimento de aquíferos apresentam taxa de recessão lenta, enquanto bacias hidrográficas pouco permeáveis e com baixo armazenamento possuem uma taxa de recessão rápida (HISDAL *et al.*, 2004).

Os coeficientes de recessão (a), com variação entre 10^{-3} e 10^{-1} , para as bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos do presente trabalho foram obtidos pelo método de correlação de Eckhardt (2008) através do *software Groundwater Toolbox*, com a Equação 12. Isso porque há subjetividade na escolha dos períodos de recessão e determinação do índice de recessão (k) por outros métodos, como pela conversão do índice de recessão (k) por meio do método *Recess* (RUTLEDGE, 1998). Diferentemente, no método da correlação de Eckhardt (2008) são usados dados diários de vazão para todos os períodos sem chuvas, em que cada valor médio de vazão (y_k) é contabilizado. São considerados períodos de recessão que apresentem, no mínimo, cinco dias de duração, de forma que há a plotagem de valores de y_k e de y_{k+1} (valores médios diários para cada dia) em gráfico de dispersão para identificar a constante de recessão (a) a partir da inclinação média dos pontos. Portanto, todos os pontos de vazão de base tem a sua origem na reta que tem como declividade a constante de recessão (a) nesse gráfico. O método tem como premissa que as recessões são constituídas completamente pelo fluxo de base; que não há ocorrência de recarga durante o período para os intervalos k e $k+1$; e que o aquífero, ou o seu conjunto, atua como um reservatório linear.

$$a = \frac{y^{k+1}}{y^k} \quad (12)$$

3.2.2 Índice Máximo do Fluxo de Base (BFImáx)

O Índice Máximo do Fluxo de Base (*Baseflow Index - BFImáx*) é a razão entre o fluxo separado do hidrograma (fluxo de base estimado) e o fluxo total do hidrograma, o qual indica a proporção de vazões de um rio originadas de águas provenientes dos aquíferos (INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980a). Em outras palavras, o *BFImáx* é o volume do fluxo de base dividido pelo volume da vazão total (SMAKHTIN e TOULOUSE, 1998), conforme a Equação 13 (KELLY *et al.*, 2019), de forma que o *BFImáx* é um indicador, em porcentagem, da máxima vazão total de um rio que pode ser estimada como fluxo de base (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

$$\text{Índice do Fluxo de Base (BFImáx)} = \frac{\text{Volume do fluxo de base}}{\text{Volume do fluxo total}} \quad (13)$$

Inicialmente desenvolvido por Lvovich (1972), o *BFImáx* foi aprimorado pelo Instituto de Hidrologia do Reino Unido para avaliar a influência de diferentes litologias no escoamento das bacias hidrográficas durante o período de ausência de chuvas. O *BFImáx* é maior quanto mais permeável for o material de origem do aquífero (INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980a). Por exemplo, um valor elevado de *BFImáx* próximo de 1 mostra que o escoamento da bacia hidrográfica é mantido por mais tempo pelo fluxo de base, característica de rios sob regime fluvial perene, enquanto valores de *BFImáx* próximo a zero são de bacias hidrográficas com aquíferos menos permeáveis, ocasionando rios efêmeros (SMAKHTIN, 2001).

A identificação do BFI de cada bacia hidrográfica representativa foi realizada pelo método do filtro inverso de Collischonn e Fan (2013), incorporado ao *Groundwater Toolbox* (BARLOW *et al.*, 2015). O método usa uma série de dados diários de vazão, em recessão de chuvas, condicionado ao coeficiente de recessão (a) encontrado, para aplicar um filtro inverso (Equação 14), de modo que b'_{i-1} é o tempo antecedente da vazão e que, ao ser usado o coeficiente de recessão (a), resulta no valor do escoamento de base atual (b'_i). O filtro inverso assume o modelo de reservatório de armazenamento linear, isto é, em que o escoamento de base é linearmente proporcional ao armazenamento dos aquíferos durante os períodos sem

chuvas. Como condição, o filtro inverso requer que b_{i-1} seja menor que a vazão total (y_{i-1}) para um certo intervalo de tempo $i-1$, ou seja, que cada valor unitário de vazão seja menor que a vazão total observada e onde a aproximação do que seja o fluxo de base ocorra para o tempo i menos 1 (COLLISCHONN e FAN, 2013).

$$b'i - 1 = \frac{b'i}{a} \quad (14)$$

Ao ser aplicado, o filtro inverso inicia o processo estimando o fluxo de base atual ($b'i$) com o valor da vazão diária final do último período de recessão da série de dados, a qual se pressupõe ser formado exclusivamente pela descarga de águas subterrâneas na bacia hidrográfica. O filtro inverso é então movido para o dia inicial da primeira curva de recessão da mesma série de dados observados e segue o comportamento da vazão total, identificando o escoamento de base como sendo menor que o fluxo total a partir dos picos de vazão. Isso é admitido como não realista, tendo em vista que a contribuição imediata ao hidrograma é do fluxo superficial direto e do fluxo subsuperficial. Dessa maneira, é possível que o volume real do escoamento de base seja menor que o volume estimado pelo filtro inverso. Ao mesmo tempo, demonstra quais valores máximos o escoamento de base pode apresentar. O valor do $BFI_{máx}$, mensal ou anual, resulta da Equação 15, em que $b'i$ é o somatório do filtro inverso, obtido com o coeficiente de recessão (a); y é o somatório da vazão total observada de um posto fluviométrico; e i é o tempo durante a recessão (COLLISCHONN e FAN, 2013).

$$BFI_{máx} = \frac{\sum_{i=1}^N b'i}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad (15)$$

3.2.3 BFI anual médio

O coeficiente de recessão (a) e o $BFI_{máx}$ foram os parâmetros usados como referência para a aplicação do filtro digital de Eckhardt (2005) na separação do fluxo de águas total em fluxo superficial direto e fluxo de base pelo filtro digital recursivo desenvolvido por Eckhardt (2005), seguindo a premissa de que o escoamento de base é linearmente proporcional ao armazenamento dos aquíferos durante os períodos de recessão de chuvas. Na Equação 16, bk é o fluxo de base; a é o coeficiente de recessão; $BFI_{máx}$ é o Índice Máximo do Fluxo de Base; b é a vazão estimada do fluxo de base; yk é a vazão observada na série de

dados; e k é o tempo. A vazão do fluxo de base é estimada com a condição de que $bk \leq yk$, ou seja, de que a vazão estimada do fluxo de base seja igual ou menor que a vazão observada da série de dados.

$$bk = \frac{(1-BFI_{máx}) a \times b (k-1) + (1-a) \times BFI_{máx} \times yk}{1-a \times BFI_{máx}} \quad (16)$$

O *Groundwater Toolbox* forneceu o BFI diário, mensal e anual para o período entre 1981 e 2018. Para fins da presente pesquisa, foram necessários os dados de BFI anual para as séries de vazão das estações fluviométricas das bacias hidrográficas representativas. No entanto, o BFI anual não é fornecido para os anos em que os dados estão incompletos. Por isso, foi proposto o BFI anual médio, obtido a partir da média mensal de BFI para cada ano. Barlow *et al.* (2017) alertam que, apesar da premissa estipulada no método de Eckhardt (2005) de que o BFI deva ser menor que o valor do $BFI_{máx}$, a situação antagônica pode ocorrer. Isso porque o BFI identificado para períodos curtos, como meses ou estações, podem exceder o $BFI_{máx}$. Na presente pesquisa, alguns valores do BFI anual médio das bacias hidrográficas representativas refletem essa condição, uma vez que se referem a média dos valores do BFI mensal fornecido.

Com base na Tabela 2, para obter um valor único de BFI médio global houve novamente a aplicação de média aritmética, correspondente a cada cenário de uso e cobertura da terra observado, e que, após o cruzamento das variáveis ambientais, passou a incorporar os mesmos cenários de Velocidade Média do Escoamento Superficial - VmES (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018). Dessa forma, no total, cada bacia hidrográfica representativa passou a contar com cinco valores de BFI médio global, um para cada período de dados de vazão anual: 1981-1988, 1989-1996, 1997-2004, 2005-2012, 2013-2018.

3.2.4 Limitações das estimativas de descarga de águas subterrâneas

As técnicas indiretas de estimativa do escoamento de base consistem no uso de apenas alguns parâmetros que servem de calibração do método, mas que podem mascarar as condições dos processos que ocorrem nas bacias hidrográficas e as características físicas da vazão registrada, principalmente nos momentos em que o escoamento dos rios aumenta (FUREY e GUPTA, 2001). Nesse sentido, uma das críticas ao uso de Filtros Digitais Recursivos (FDRs) recai no fato de que a análise é restrita ao hidrograma de maneira

automática e não considera o impacto das características físicas de uma bacia hidrográfica, como a taxa de precipitação e as condições de infiltração. Os FDRs podem variar de desempenho de uma bacia hidrográfica para outra e, a depender dos parâmetros definidos pelo usuário, podem estimar o escoamento de base de maneira distinta (LI *et al.*, 2013), ou seja, podem subestimar ou superestimar os valores do escoamento de base, conforme os eventos de precipitação, os tipos de solo e as condições de umidade antecedente, por exemplo. É preciso ter claro que os FDRs não são aplicáveis universalmente (PARTINGTON, 2012). Também não é possível garantir, com completa certeza, que haja um método de estimativa do BFI que represente fielmente a realidade (BLOOMFIELD, ALLEN e GRIFFITHS, 2009), dificultando o comparativo entre dados de diferentes técnicas de separação do hidrograma (AHIABLAME *et al.*, 2013).

Os métodos incluídos no *Groundwater Toolbox*, dentre eles, o filtro de Eckhardt (2005), são subjetivos e não são baseados em soluções matemáticas para equações de águas subterrâneas ou de escoamento superficial. Apesar disso, são amplamente usados e devem seguir certas precauções. O *Groundwater Toolbox* tem o uso recomendado para bacias hidrográficas que estejam sob regime perene e na condição de ganho, ou seja, em que os rios sejam efluentes, os quais recebem contribuição dos aquíferos (Figura 46). Condições de fluxo sob regime intermitente devem ser usados com cuidado e bacias hidrográficas com rios influentes devem ser evitadas. Quanto maior a quantidade de unidades hidrogeológicas, mais incertezas ocorrerão para a avaliação do comportamento dos dados. Os métodos são apropriados às bacias hidrográficas que apresentam a área de drenagem entre 1 e 500 mi² (aproximadamente de 2,59 km² à 1.300 km²) e com declividade maior ou igual que 1%. Além disso, a série de dados diários deve abranger um período preferencialmente maior do que um ano de registros e os dados devem ser analisados em uma escala anual, podendo ser avaliado também mensal ou sazonalmente, porém, com cautela. Outra premissa é que quanto maior o uso de águas durante o período de suprimento de fluxo de base para as atividades humanas, menos os métodos incorporados ao *software* são indicados (BARLOW *et al.*, 2015).

Figura 46 – Recomendações para uso dos métodos de análise de hidrograma do *Groundwater Toolbox*.

Condições de fluxo				Unidades hidrogeológicas		Tamanho da bacia, em milhas quadradas			Legenda
Ganho	Perda	Perene	Intermitente	Simples	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: Adaptado de Barlow *et al.* (2015, p. 04).

Os algoritmos usados no *Groundwater Toolbox* partem da premissa de que os limites hidrográficos e hidrogeológicos são coincidentes e, portanto, que não há perda de águas subterrâneas por bombeamentos (captações superficiais em períodos secos e por poços) ou para outras bacias hidrográficas por sistemas por fluxos regionais, intermediários e locais. Durante a separação do escoamento, os algoritmos usados podem identificar flutuações da descarga de águas no hidrograma de outros reservatórios que não sejam aquíferos, como nos momentos em que ocorre, por exemplo, o derretimento de neve; ou a liberação de água de reservatórios, lagos, áreas úmidas ou águas residuais. Isso requer o conhecimento sobre as condições hidrológicas da área de drenagem à montante do local de registro da vazão para confirmar o comportamento dos dados (BARLOW *et al.*, 2015), especialmente para bacias hidrográficas onde há variadas origens para o escoamento de base e significativa sazonalidade, com interferência da evapotranspiração (STADNYK, GIBSON e LONGSTAFFE, 2015). A admissão do modelo de reservatório linear simples implica em desconsiderar também que o fluxo de base possa apresentar uma relação não-linear pela

dinâmica de circulação de águas provenientes do mesmo reservatório ou de outros reservatórios que alimentam o escoamento de base. Nesse sentido, por tratar-se de um estudo com dados em escala anual, não foi considerada a sazonalidade ao longo do ano para os parâmetros índice de recessão (k), coeficiente de recessão (a) e $BFI_{máx}$.

Outro ponto é que a curva remanescente do período inicial da descarga ainda pode conter influência, em parte, de contribuição do fluxo superficial direto e subsuperficial, uma vez que armazenamentos de margem, áreas úmidas e solos, por exemplo, podem também assumir o comportamento de decaimento exponencial durante os períodos de recessão (HALFORD e MAYER, 2000).

O resultado da separação do hidrograma permite avaliar as mudanças temporais do escoamento de base. No entanto, a distribuição espacial do fluxo de base necessita de outros métodos para poder ser explicada (BRODIE e HOSTETLER, 2005), inclusive em bacias hidrográficas que apresentam heterogeneidade de aquíferos, onde há variabilidade no fornecimento do fluxo de base (MOORE, 1997 apud BART e HOPE, 2014) e da taxa de recarga subterrânea (MATTIUZI *et al.*, 2015). Por exemplo, quando uma bacia hidrográfica apresenta dois aquíferos de características hidrogeológicas distintas, a curva de recessão do fluxo de base pode apresentar-se composta, ou seja, pode ser observada uma ruptura da sua inclinação. Isso ocorre em decorrência da curva de recessão ser inicialmente controlada por um aquífero, como, por exemplo, aqueles formados por depósitos sedimentares ou rochas sedimentares, e que, por realizarem uma drenagem mais rápida, cessam a sua contribuição. O escoamento de base passa então a ser controlado por outro aquífero, como aqueles formados por rochas metamórficas, de forma que o comportamento do fluxo de base torna-se modificado dentro do mesmo período de recessão (BEVANS, 1986). Além disso, os resultados da análise da recessão são válidos apenas para bacias hidrográficas que apresentam aquíferos livres (COSTA e BACELLAR, 2010).

Soma-se a essa dificuldade, na análise da recessão, a identificação do coeficiente de recessão (a), em razão de sua variabilidade ao longo do tempo, especialmente sob um clima úmido, quando os períodos de recessão são interrompidos com frequência pela distribuição das chuvas. Essas interrupções, produzem segmentos de recessão individualizados, com diferentes durações, que fazem parte de diferentes etapas de processos de saída de um aquífero, em um curto prazo ou sazonalmente. A construção de uma curva mestra de recessão, por diferentes métodos, é o meio usado para a obtenção de uma curva de recessão representativa do conjunto desses períodos. Contudo, ela fornece um valor impreciso da

característica de recessão para compreender uma série histórica de dados e dispensa as particularidades dos períodos de recessão que a compõem (TALLAKSEN, 1995; OMM, 2009), podendo influir, especialmente, nos valores do índice de recessão (k). Oscilações também no coeficiente de recessão (a) de uma bacia hidrográfica podem ser verificadas na escala temporal com períodos longos, provocadas por mudanças climáticas ou do ambiente, podendo ter influência de modificações antropogênicas, como, por exemplo, da redução de áreas de florestas ou do crescimento urbano (LEAP, 2016).

A estimativa da descarga de águas subterrâneas, através da separação de hidrograma, nem sempre pode mostrar-se confiável, tendo em vista que as premissas podem ser violadas. O índice de recessão (k) tende a ser subestimado a partir dos dados de vazão. Há também a chance de que o escoamento de base nem sempre corresponda somente à contribuição dos aquíferos (HALFORD e MAYER, 2000).

Há ainda o fato de que algumas das estações hidrometeorológicas usadas no presente trabalho apresentam interrupções de série histórica, assim como apresentaram dados não consistidos para os últimos anos. Essas situações poderiam tornar a estimativa do escoamento de base ainda mais incerta, quando não avaliando o comportamento da descarga subterrânea para um período relativamente longo, como, por exemplo, de aproximadamente 30 anos.

3.2.5 Caracterização da recessão do escoamento das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos

Essa caracterização esclarece as condições ambientais de aplicação da metodologia desenvolvida no presente trabalho. A caracterização da recessão das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina considerou a interpretação dos parâmetros estimados para as séries de vazões das estações fluviométricas, a saber, o Coeficiente de recessão (a) e o BFI anual médio. Além desses parâmetros, também foi usada a precipitação de estações pluviométricas e estimado o Índice de recessão (k) apenas como dados comparativo de avaliação do armazenamento para fins da caracterização. Informações espaciais contidas em mapas também foram inseridas na caracterização do escoamento de base das bacias hidrográficas representativas.

3.2.5.1 Índice de recessão (k)

No método *Recess*, proposto por Rutledge (1998), o índice de recessão (k) é o tempo de recessão por ciclo logarítmico e varia linearmente conforme o fluxo de um curso d'água em escala logarítmica (LogQ). O *Recess* é um método empírico que identifica automaticamente os períodos de recessão contínua da série de dados, com um número mínimo e máximo de dias a ser definido pelo usuário. Neste caso, o índice de recessão (k) é obtido pela construção de uma Curva Mestre de Recessão (CMR).

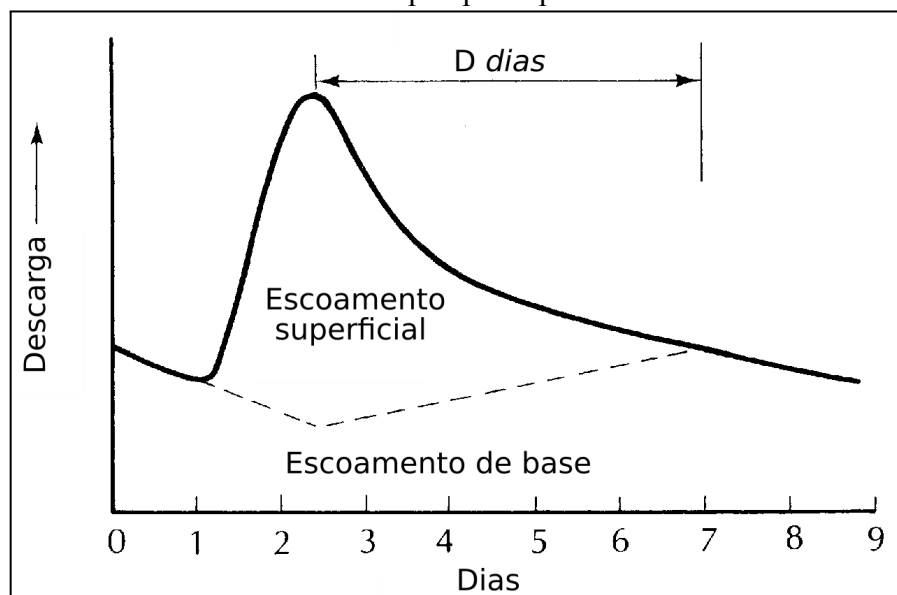
O índice de recessão (k), expresso em dias, é uma constante que depende especialmente das características geológicas de uma bacia hidrográfica e pode ser usada para estimar a vazão para os períodos de estiagem. Por exemplo, bacias hidrográficas que abrangem aquíferos pouco porosos, como os aquíferos constituídos por basaltos, costumam ter cursos d'água com valores de índice de recessão (k) baixos, ou seja, isso significa que, para os períodos sem chuvas e, portanto, sem recarga subterrânea, a duração da curva de recessão tende a ser menor. Por outro lado, maiores valores para o índice de recessão (k) podem ser encontrados em bacias hidrográficas com aquíferos que apresentam maior capacidade de armazenamento, como aqueles formados por rochas sedimentares (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Portanto, a relação entre o armazenamento de águas e a descarga dos aquíferos observada nos rios durante a recessão da vazão (SMAKHTIN, 2001) é verificada no índice de recessão (k) (THOMAS *et al.*, 2013).

Para eliminar o período que é de resposta a um evento de recarga, que seria de influência do escoamento superficial direto e do escoamento subsuperficial, geralmente a porção inicial de cada período de recessão é ignorada (OMM, 2009). Assim contabiliza-se o início de cada período de recessão do hidrograma a partir de uma equação empírica (Equação 17) desenvolvida por Linsley, Kohler e Paulhus (1982), em que N é a quantidade de dias a serem desconsiderados após o pico de vazão e A é a área de drenagem do posto fluviométrico, em milhas quadradas e elevada à potência com expoente no valor de 0,2 (RUTLEDGE, 1998).

$$N = A^{(0,2)} \quad (17)$$

Assim, o início da recessão, em que se admite o suprimento apenas pelo fluxo de base, acontece com a identificação aproximada da duração de D , ou seja, do fim do fluxo superficial e subsuperficial (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013), descartando-se alguns dias após o pico de vazão para cada segmento de recessão (Figura 47).

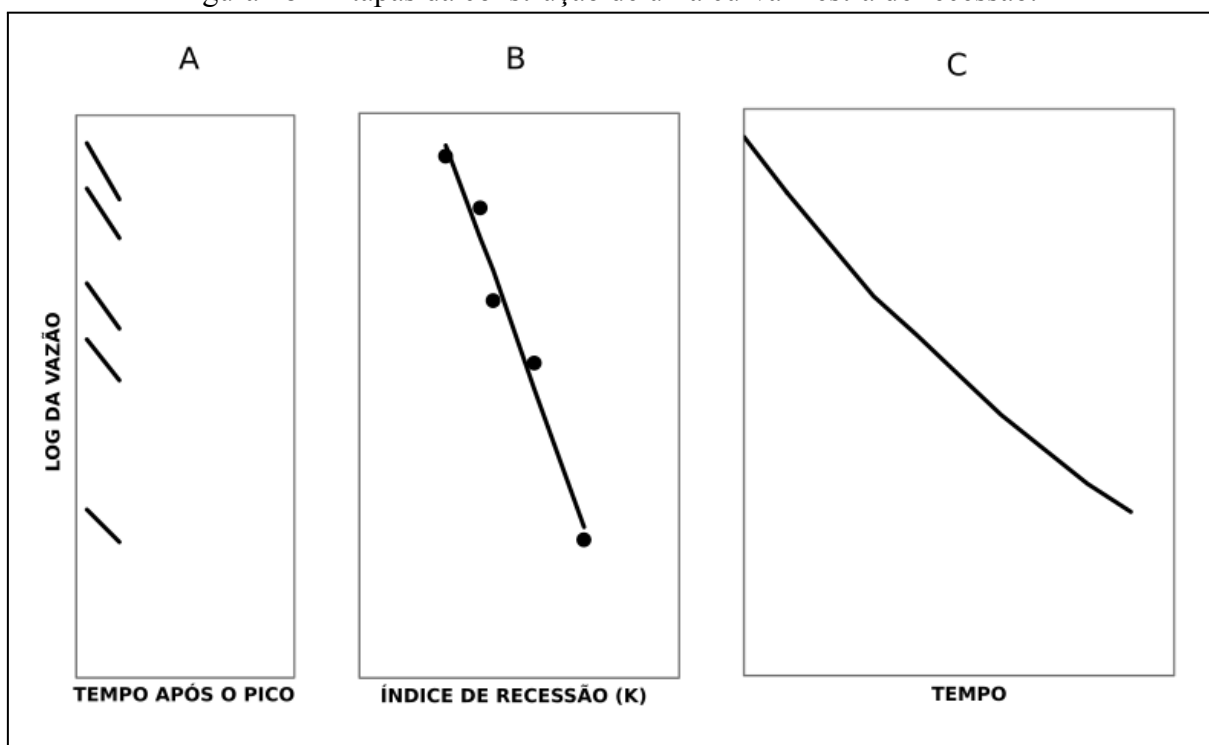
Figura 47 – Duração do fluxo do escoamento superficial e subsuperficial (D) para um determinado tempo após o pico de vazão.



Fonte: Adaptado de Fetter (2001, p. 46).

Nesse sentido, o *Recess* considera apenas os períodos de uma série de dados de vazão em que todo o fluxo é oriundo da descarga dos aquíferos (nos momentos secos), e cuja distribuição na curva de recessão seja estável, isto é, sem demasiados acréscimos ou perdas, e sob uma tendência geral de queda de valores de vazão. O segmento de recessão é considerado contínuo quando há um par de valores diários de vazão subsequentes e o primeiro deles tem o valor maior ou igual ao segundo. Após isso, o *Recess* possibilita ao usuário escolher manualmente os segmentos que são lineares, ou quando for o caso, aproximadamente lineares, ou ainda eliminar valores discrepantes, para torná-los representativos da CMR e quantificar o índice de recessão (situação A da Figura 48) (RUTLEDGE, 1998; RUTLEDGE, 2007).

Figura 48 – Etapas da construção de uma curva mestra de recessão.



Fonte: Adaptado de Rutledge (2007, p. 4).

Por sua vez, o *Recess* aplica a equação linear de tempo em função do logaritmo de fluxo ($\text{Log}Q$) que melhor se apropria a cada período selecionado, a fim de extrair o índice de recessão (k) individualizado de cada segmento de recessão, representado como uma nuvem de pontos na situação B da Figura 48). A Equação 18 é usada pelo *software* para realizar essa etapa, de forma que t é tempo, expresso em dias; K_1 e K_2 são coeficientes provenientes de regressão linear, em dias/ciclo log, de forma que K_1 é o índice de recessão (k) do segmento; e $\text{Log}Q$ é o logaritmo de fluxo, em ft^3/s . Depois, o RECESS repete o processamento para cada segmento de recessão (RUTLEDGE, 2007).

$$t = K_1 \cdot \text{Log}Q + K_2 \quad (18)$$

No término da análise, o valor do índice de recessão de cada segmento passa pela Equação 18, uma função polinomial de segunda ordem para o tempo em função de $\text{Log}Q$, de forma a se obter a CMR e um valor único do índice de recessão (k) para os segmentos selecionados (RUTLEDGE, 1998). Na Equação 19, t é o tempo, em dias; $\text{Log}Q$ é o logaritmo ajustado aos segmentos de recessão selecionados manualmente; e A , B e C são coeficientes (RUTLEDGE, 2007).

$$t = A \cdot (\text{Log}Q)^2 + B \cdot (\text{Log}Q) + C \quad (19)$$

É importante destacar que o tamanho do período de recessão é um dos principais fatores que implicam em uma notável diferença nos valores do índice de recessão (k) de uma mesma série histórica de vazões. Um exemplo dessa situação está na Tabela 3, em que o valor do índice de recessão (k) torna-se maior quanto maior é o período de dados entre recargas. Além disso, entre um período de recessão e outro essa diferença também é encontrada (RUTLEDGE, 2000). A recomendação é que o tempo de recessão não seja nem muito longo ou nem muito curto. O desejável é encontrar segmentos de recessão com inclinação suficiente para a identificação de uma disposição de dados diários linear ou aproximadamente linear (RUTLEDGE, 1998).

Tabela 3 – Exemplo da relação entre o índice de recessão (k) estimado e os tempos de recessão.

Tempo após a recarga (dias)	Índice de recessão (k - em dias por ciclo log)
5-10	54,8
11-15	79,1
16-20	91,5
21-25	95,3
26-30	99,2

Fonte: Adaptado de Rutledge (2000. p. 14).

No *Groundwater Toolbox*, com os dados de vazão, em ft³/s, no arquivo em formato RDB, a calibração do método *Recess*, de Rutledge (1998), envolveu a definição de um número de dias após o pico de vazão e do número mínimo de dias de duração do período de recessão (Tabela 4). O número de dias após o pico (N) usou a Equação 17, que considerou a área de drenagem, em milhas quadradas, pela multiplicação do fator de conversão 0,386102, de cada bacia hidrográfica representativa, cujo valor resultante foi arredondado para cima, variando entre 3 e 4 dias após o pico de vazão, para reduzir a influência de fluxos que não sejam daqueles provenientes dos aquíferos. A duração mínima de um período de recessão seguiu a recomendação de Rutledge (1998), o qual observou que um intervalo entre 10 e 20 dias já é considerado suficiente quando há uma série de vazões contendo entre 15 e 40 anos de registros diários. Dessa forma, essa recomendação foi seguida com a definição de um valor médio mínimo de 15 dias para as séries de vazões de todas as bacias hidrográficas representativas.

Tabela 4 – Dados de calibração usados no método *Recess* para obtenção do Índice de recessão (k) das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina.

Domínio hidrogeológico	Cristalino	Bacia Sedimentar Paleozoica	SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado	SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado	Depósitos Cenozoicos
Estação fluviométrica	Poço Fundo (84100000)	Saltinho (83105000)	Vila Canoas (71200000)	Ponte do Sargento (74320000)	Ermo (84949800)
Série histórica (dados diários)	01/01/1981 a 31/12/2018	01/01/1981 a 31/12/2018	01/01/1981 a 31/12/2018	01/01/1981 a 31/12/2018	01/01/1981 a 31/12/2018
Área de drenagem (km²)	401,09	434,53	1014,64	607,15	833,43
Área de drenagem (mi²)	154,82	167,72	391,65	234,36	321,78
Dias após o pico (N)	2,74	2,79	3,30	2,98	3,17
Dias após o pico (N) arredondado	3	3	4	3	4
Duração dos períodos de recessão (dias)	15	15	15	15	15
Quantidade de segmentos de recessão	52	98	63	87	41
Quantidade de segmentos de recessão selecionados	9	29	23	23	20

Fonte: Elaboração própria.

Na aplicação do método *Recess*, identificou-se uma variada quantidade de segmentos de recessão para cada bacia hidrográfica representativa entre 01/01/1981 e 31/12/2018, desde 41 segmentos para a estação Ermo (Depósitos Cenozoicos) até 98 para a estação Saltinho (Bacia Sedimentar Paleozoica). Nem todos os segmentos de recessão puderam ser aproveitados, uma vez que os dados diários de vazão precisam estar dispostos em um padrão linear no hidrograma com escala semilogarítmica, sem ruptura desse comportamento. O limite sugerido por Rutledge (1998) para seleção é de 20 até 30 segmentos de recessão. Manualmente, foram selecionados os segmentos de recessão que teriam o melhor encaixe em constituir uma Curva Mestre de Recessão (CMR) com esses critérios, sendo a menor quantidade encontrada para a estação Poço Fundo (9) e a maior quantidade de segmentos de recessão para a estação Saltinho (29).

3.2.5.2 Precipitação total anual

A precipitação anual média foi usada para diferenciar o regime pluviométrico entre as bacias hidrográficas representativas. Particularmente nessas bacias, houve a confrontação do comportamento da linha de tendência do escoamento de base através das oscilações do BFI anual médio com a linha de tendência da precipitação anual média para o período definido de 1981 a 2018. Abaixo é apresentado o Quadro 20, com a relação das estações pluviométricas usadas como referência. Duas delas estão situadas no exutório, junto à estação fluviométrica de cada bacia hidrográfica representativa, incluindo a estação Poço Fundo, no Cristalino; e a estação Ponte do Sargento, no SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado. As demais estações pluviométricas situam-se no interior das bacias hidrográficas representativas. Essas estações foram elencadas por disporem da maior quantidade de registros diários dentro ou nas proximidades da área à montante de cada estação fluviométrica.

Quadro 20 – Estações pluviométricas usadas para caracterização do escoamento de base nas bacias hidrográficas representativas de cada domínio hidrogeológico de Santa Catarina.

Domínio hidrogeológico	Cristalino	Bacia Sedimentar Paleozoica	SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado	SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado	Depósitos Cenozoicos
Nome da estação pluviométrica	Poço Fundo	Lomba Alta	Urubici	Ponte do Sargento	Timbé do Sul
Código da estação	2748005	2749007	2849021	2653004	2849019
Município da estação	Santo Amaro da Imperatriz	Alfredo Wagner	Bocaina do Sul	Romelândia	Timbé do Sul
Responsável	ANA	ANA	ANA	ANA	ANA
Operadora	EPAGRI/SC	EPAGRI/SC	CPRM	CPRM	EPAGRI/SC
Latitude/Longitude	716586,38E/ 6933631,24N	659404,30E/ 6931612,40N	638414,80E/ 6901193,10N	272525,71E/ 7046712,05N	613383,86E/ 6809740,08N
Período de dados	1950-2022	1941-2022	1957-2022	1969-2022	1976-2022

Fonte: Sistema de informações Hidroweb (ANA, 2020).








A estação pluviométrica de referência de dados do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos é a denominada Timbé do Sul, tendo em vista que a estação pluviométrica Ermo, situada junto ao exutório da estação fluviométrica, tem apenas registros mais recentes. Ressalta-se, no entanto, que apesar de a estação fluviométrica estar localizada na área de drenagem, a mesma pode não refletir o comportamento das chuvas que ocorrem na escarpa da Serra Geral, onde a precipitação tende a ser maior pelo efeito orográfico, conforme já mencionado. Além da estação pluviométrica Timbé do Sul, os postos pluviométricos Lomba Alta (da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica) e Urubici (da bacia hidrográfica representativa do Domínio

Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado) estão em posição espacial diferente da estação fluviométrica, embora também situadas na área de drenagem.

Os dados de precipitação foram obtidos do portal Hidroweb (ANA, 2020). As séries de dados, no formato MDB, foram importadas ao *software* Hidro 1.4, onde foram identificados os valores diários consistidos e, na falta destes, os valores brutos da série de dados de cada estação, os quais foram exportados para o formato em colunas. Não foram observados registros discrepantes para estas estações e, dessa forma, procedeu-se com o preenchimento de falhas de registros. O Quadro 21 mostra a quantidade de falhas dos registros diários para cada ano de cada estação pluviométrica, sendo a estação Poço Fundo, do Domínio Hidrogeológico Cristalino, a que apresenta uma quantidade crítica de falhas.

Quadro 21 – Quantidade de falhas diárias de precipitação das estações pluviométricas das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos para cada ano.

Ano	Cristalino (Estação Poço Fundo - 2748005)	Bacia Sedimentar Paleozoica (Estação Lomba Alta - 2749007)	SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado (Estação Urubici - 2849021)	SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado (Estação Ponte do Sargento - 2653004)	Depósitos cenozoicos (Estação Timbé do Sul - 2849019)
1981					
1982					
1983					
1984					
1985					
1986					
1987					
1988					
1989					
1990					
1991					
1992					
1993					
1994					
1995					
1996					
1997					
1998					
1999					
2000					
2001					
2002					
2003					
2004					
2005					
2006					
2007					
2008					
2009					
2010					
2011					
2012					
2013					
2014					
2015					
2016					
2017					
2018					

	Sem dados: não contêm registros diários		Entre 75% e 95% dos registros diários: contêm entre 92 e 19 dias de falhas de registro diário
	< 25% dos registros diários: contêm mais de 274 dias de falhas de registro diário		> 95% dos registros diários: contêm menos de 19 dias de falhas de registro diário
	Entre 25% e 50% dos registros diários: contêm entre 274 e 183 dias de falhas de registro diário		Registros diários completos: todos os dias do ano possuem registros diários
	Entre 50% e 75% dos registros diários: contêm entre 183 e 92 dias de falhas de registro diário		

Fonte: ANA (2020); Elaboração própria.

O preenchimento das falhas de precipitação foi usado com o intuito de melhorar a qualidade dos dados. Optou-se pelo método da regressão linear simples pelo fato de haver, dentre as bacias hidrográficas representativas, uma que não possuía estação pluviométrica vizinha à estação de referência com cobertura de dados para todo o período de análise, tal como foi o caso no Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos. Além disso, as estações vizinhas não atendiam ao critério de proximidade espacial com a estação pluviométrica com falhas (Timbé do Sul), em função das diferenças de relevo e clima. Do mesmo modo, não havia disponibilidade de dados para os meses com falhas de registro entre 1981 e 2018, exceto a estação pluviométrica Meleiro. Assim, definiu-se um único método de preenchimento de falhas de precipitação para todas as bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos e com estações pluviométricas vizinhas dentro ou o mais próximo possível da área de drenagem da bacia hidrográfica representativa.

O método da regressão linear simples baseia-se na correlação de precipitações do posto com falhas (X) e de um único posto vizinho (Y). A plotagem desses dados em um gráfico cartesiano permite traçar uma reta que melhor representa os pares de valores (X, Y) e que permite a obtenção de uma equação, no formato $Y = a + b.X$, onde a é o coeficiente angular que intercepta o eixo Y e b é o coeficiente angular da reta. Estabelecida a equação, é possível estimar os valores da estação pluviométrica com falhas pelo valor do registro de precipitação da estação vizinha para um período coincidente. É importante mencionar que um método de preenchimento de falhas de precipitação não recupera os dados originais. Além disso, é recomendado o seu uso para uma escala de tempo mensal ou anual (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Em uma planilha eletrônica, os valores diários da estação pluviométrica com falhas (X) e a estação vizinha (Y) foram convertidos em dados mensais pelo recurso da tabela dinâmica. Em cada bacia hidrográfica representativa, os dados foram cruzados em um gráfico de dispersão e obtidas a linha de tendência, a equação de regressão linear e o coeficiente de determinação (R^2). A equação da regressão linear encontrada (Quadro 22) foi usada para preencher os meses sem dados de cada estação pluviométrica de referência da bacia hidrográfica representativa. As estações pluviométricas vizinhas estão em ordem de preenchimento das séries históricas das estações pluviométricas com falhas do Quadro 21, de forma que se deu prioridade para aquela mais próxima e que possuísse dados, como, por exemplo, a estação Poço Fundo, do domínio Cristalino, em que ocorreu preenchimento das

falhas preferencialmente com dados da estação Rancho Queimado. Na ausência de dados da estação Rancho Queimado, a estação pluviométrica vizinha São Bonifácio foi usada para suprir as falhas da estação Poço Fundo.

Quadro 22 – Informações das estações pluviométricas com falhas e estações pluviométricas vizinhas usadas para o preenchimento por regressão linear simples.

Domínio hidrogeológico	Estação pluviométrica com falhas (X)	Estação pluviométrica vizinha (Y)	Distância aproximada entre as estações (km)	Equação de regressão linear	Coefficiente de determinação (R ²)
Cristalino	Poço Fundo (2748005)	Rancho Queimado (2749020)	21	$y = 0,77x + 10,60$	0,64
		São Bonifácio (2748018)	25	$y = 0,73x + 31,02$	0,51
Bacia Sedimentar Paleozoica	Lomba alta (2749007)	Saltinho (2749037)	6	$y = 0,99x + 12,68$	0,87
		Rancho Queimado (2749020)	37	$y = 0,58x + 40,92$	0,53
SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado	Urubici (2849021)	Vila Canoas (2749031)	29	$y = 0,82x + 23,47$	0,73
		Rio Bonito (2749009)	42	$y = 0,71x + 37,23$	0,67
SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado	Ponte do Sargento (2653004)	São José do Cedro (2653005)	29	$y = 0,70x + 52,46$	0,58
		Campo Erê - EMPASC (2653001)	33	$y = 0,72x + 54,28$	0,58
Depósitos Cenozoicos	Timbé do Sul (2849019)	Meleiro (2849005)	20	$y = 0,95x + 40,35$	0,71








Fonte: Elaboração própria.

Falhas inferiores ao período de menos da metade de um mês não foram preenchidas, tendo em vista que em mais da metade do tempo do mês a série histórica diária contém os registros. Por outro lado, houve a substituição dos valores diários registrados pelo valor mensal quando o período de falhas superou a metade de um mês, valor este preenchido pelo método da regressão linear simples. Uma situação específica ocorreu na estação pluviométrica Ponte do Sargento, do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado, onde o mês de junho de 1992 teve o registro no valor zero diariamente, enquanto as estações vizinhas apresentaram valores de 358,80 mm (estação São José do Cedro) e de 159,10 mm (estação Campo Erê - EMPASC) para o mesmo período. Nesse caso, considerou-se que havia falhas de registros diários e, portanto, necessitava de preenchimento

mensal. Nem todas as falhas mensais foram preenchidas, dada a falta de dados que também se seguiu nas estações vizinhas. Após o preenchimento do valor mensal, a precipitação de todos os meses foi somada para se obter o valor anual. O resultado do preenchimento por regressão linear simples é verificado no Quadro 23, onde a precipitação total anual consta, pelo menos, entre 75% e 95% dos registros diários ou acima de 95% dos registros diários, onde não foi possível o preenchimento de valores mensais.

Quadro 23 – Situação das falhas diárias de precipitação das estações pluviométricas das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos, para cada ano, após o preenchimento de falhas mensais pelo método da regressão linear simples.

Ano	Cristalino (Estação Poço Fundo - 2748005)	Bacia Sedimentar Paleozoica (Estação Lomba Alta - 2749007)	SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado (Estação Urubici - 2849021)	SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado (Estação Ponte do Sargento - 2653004)	Depósitos cenozoicos (Estação Timbé do Sul - 2849019)
1981					
1982					
1983					
1984					
1985					
1986					
1987					
1988					
1989					
1990					
1991					
1992					
1993					
1994					
1995					
1996					
1997					
1998					
1999					
2000					
2001					
2002					
2003					
2004					
2005					
2006					
2007					
2008					
2009					
2010					
2011					
2012					
2013					
2014					
2015					
2016					
2017					
2018					

	Sem dados: não contêm registros diários		Entre 75% e 95% dos registros diários: contêm entre 92 e 19 dias de falhas de registro diário
	< 25% dos registros diários: contêm mais de 274 dias de falhas de registro diário		> 95% dos registros diários: contêm menos de 19 dias de falhas de registro diário
	Entre 25% e 50% dos registros diários: contêm entre 274 e 183 dias de falhas de registro diário		Registros diários completos: todos os dias do ano possuem registros diários
	Entre 50% e 75% dos registros diários: contêm entre 183 e 92 dias de falhas de registro diário		

Fonte: Elaboração própria.

3.3 VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (VmES)

A Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) representa uma relação entre as condições de recarga subterrânea e descarga de águas nas bacias hidrográficas (HOFFMANN *et al.*, 2022). Foi empregada no presente trabalho como um dado calibrado às bacias hidrográficas representativas (Tabela 5), resultante da combinação entre duas variáveis ambientais já adotada em Hoffmann e Nanni (2017) e Hoffmann *et al.* (2022), sendo elas o relevo e o uso e a cobertura da terra, com base em dados de Kibler (1982, p. 105 apud Porto *et al.*, 2000, p. 819), extraídos do manual do USDA/SCS (1975, p. 32). Esse método consiste em avaliar indiretamente o comportamento da descarga de águas subterrâneas nas bacias hidrográficas a partir da inferência das condições superficiais de infiltração das chuvas conforme a variação temporal de cenários de uso e cobertura da terra e o intervalo de declividade em que se encontra distribuído. A VmES indica que, em uma relação inversa, maiores velocidades estão associadas à baixa capacidade de recarga dos aquíferos (HOFFMANN, 2017).

Tabela 5 – Velocidades médias de escoamento superficial em m/s.

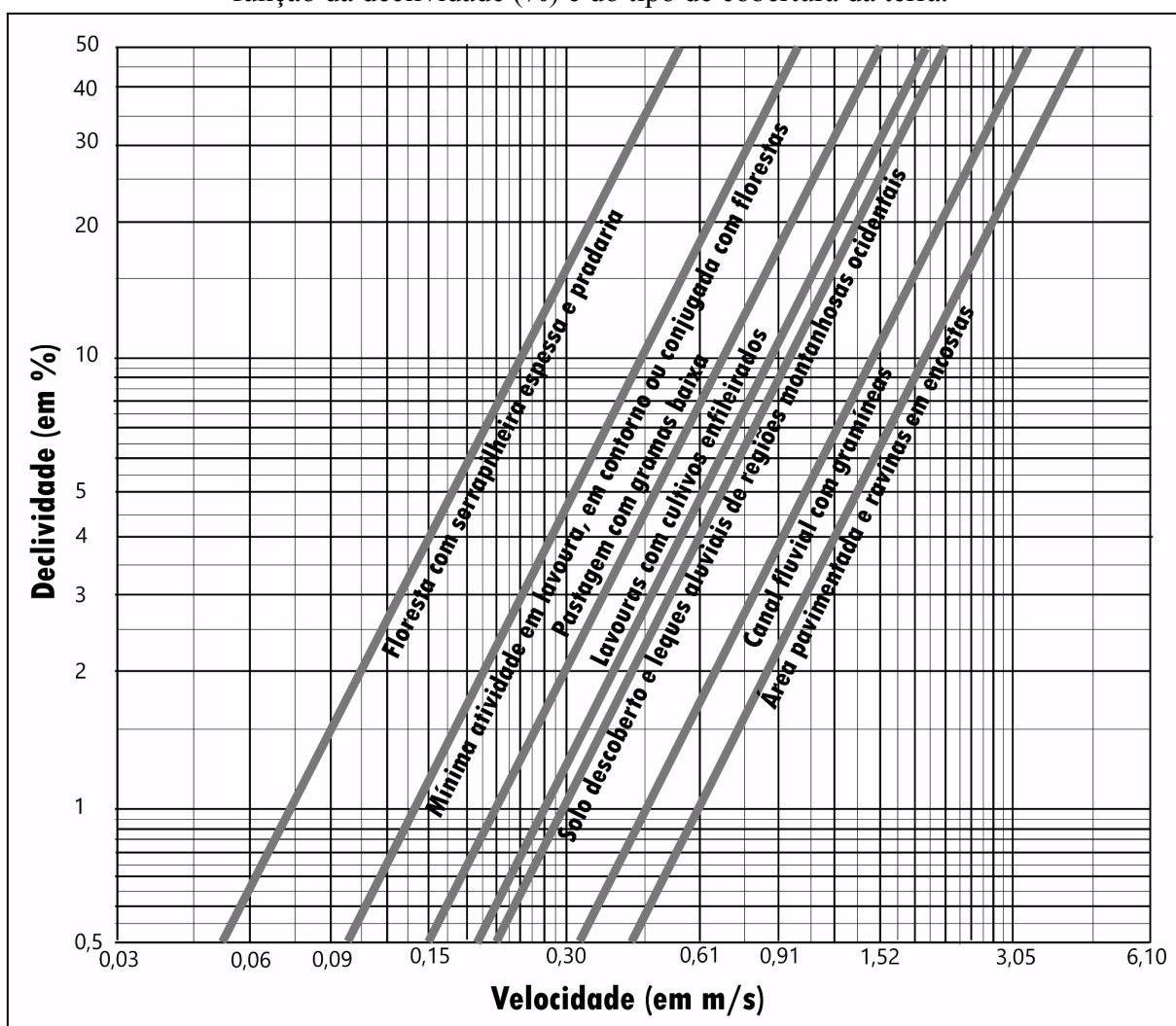
Tipo de cobertura superficial	Declividade (%)			
	0-3	4-7	8-11	>12
Florestas	0 – 0,5	0,5 – 0,8	0,8 – 1,0	>1,0
Pastagens	0 – 0,8	0,8 – 1,1	1,1 – 1,3	>1,3
Áreas cultivadas	0 – 0,9	0,9 – 1,4	1,4 – 1,7	>1,7
Áreas urbanizadas	0 – 2,6	2,6 – 4,0	4,0 – 5,2	>5,2

Fonte: Adaptado de Kibler (1982, p. 105 apud Porto *et al.*, 2000, p. 819).

Tradicionalmente, esses dados são usados para o cálculo do tempo de concentração do método cinemático, ou método da velocidade, desenvolvido nos Estados Unidos pelo *Soil Conservation Service* (SCS) (USDA/SCS, 1975), atual *Natural Resources Conservation Service* (NRCS, 2010), principalmente para dimensionar obras de engenharia hidráulica para pequenas bacias hidrográficas urbanas. Conforme Matos, Silva e Pruski (2000), esse método recorre a um ábaco, gráfico que permite identificar facilmente valores estabelecidos da velocidade do escoamento superficial para determinadas coberturas de superfície com base na

declividade. Na Figura 49, os tipos de cobertura do solo extraídos do ábaco, e adaptados na Tabela 5, estão assim dispostos na ordem de menor para a maior V_{mES} : floresta com serrapilheira espessa e pradaria; mínima atividade em lavoura, em contorno ou conjugada com florestas; pastagem com gramas de porte baixo; lavouras com cultivos enfileirados; solo descoberto e leques aluviais de regiões montanhosas ocidentais; canal fluvial com gramíneas; área pavimentada e ravinas em encostas.

Figura 49 – Ábaco de Velocidades médias do Escoamento Superficial (V_{mES}), em m/s, em função da declividade (%) e do tipo de cobertura da terra.



Fonte: Adaptado de NRCS (2010, p. 158).

O gráfico da Figura 49 é derivado da equação de Manning para definir as velocidades do escoamento superficial, onde são usados como parâmetros o coeficiente de rugosidade da superfície e o raio hidráulico (MCCUEN, 1998). É necessário ressaltar que a aplicabilidade desses dados possivelmente difere das condições naturais e de urbanização das

bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos, visto que os dados empíricos e de laboratório são comumente obtidos, conforme Kibler (1982), a partir de superfícies menores que 8 km², que têm como referência seções de controle com rugosidades próprias. No entanto, o método da velocidade continua sendo aceito atualmente e para o presente estudo serve como uma aproximação da realidade que identifica tanto o nível de medida de geração do escoamento superficial direto quanto a situação espacial das condições de recarga subterrânea.

Quanto maior a VmES, maior o volume de precipitação convertido em escoamento superficial direto e, que também, não é retido nas bacias hidrográficas para a recarga dos aquíferos subjacentes. Essa relação está associada à declividade das vertentes, dependendo do tipo de cobertura, que potencializará o efeito da geração do escoamento superficial. Durante o desenvolvimento do presente trabalho, houve uma adaptação da Tabela 5 de quatro para cinco classes de uso e cobertura da terra, com a inclusão da silvicultura. Também houve a definição de uma média de valores das VmES para cada classe, e cada intervalo de declividade, da Tabela 5 para a aplicação em Sistema de Informações Geográficas (SIG).

3.3.1 Declividade

A declividade é um indicador fisiográfico das bacias hidrográficas e é um dos dados calibrados usados no método da VmES. Na presente pesquisa, a declividade e o sombreamento foram gerados no QGIS a partir das mesmas cenas do MDE-SRTM, com resolução espacial de 30 metros, do USGS (2020), tratadas e usadas para a extração automática das áreas de drenagem das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos. A representação da declividade seguirá a proposta de classificação dos intervalos de declividade, em porcentagem, de Porto *et al.* (2000, p. 819).

Cada intervalo de declividade representa uma morfologia diferenciada de vertente na área de drenagem das bacias hidrográficas. No Quadro 24, estão apresentadas as classes morfológicas indicadas por Ramalho Filho e Beek (1995, p. 31) para a declividade. Apresenta-se no Quadro 24 a correspondência entre os intervalos de declividade de Porto *et al.* (2000, p. 819) e os intervalos de Ramalho Filho e Beek (1995, p. 31), usados nas representações do relevo nos mapas dos resultados.

Quadro 24 – Relação entre intervalos de declividade e classes morfológicas.

Intervalo de declividade (%)*	Classe morfológica**
0-3	Plano
4-7	Suave ondulado
8-11	Moderadamente ondulado
>12	Ondulado
	Forte ondulado
	Montanhoso

* Conforme Porto *et al.* (2000, p. 819).

** Conforme Ramalho Filho e Beek (1995, p. 31).

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

A chance de recarga subterrânea nas bacias hidrográficas é maior quando o relevo apresenta baixas declividades e caracteriza-se como plano e suave ondulado, como no caso de topos de morros, planaltos e planícies. Em vertentes moderadamente onduladas a montanhosas, pelo contrário, o suprimento do fluxo de base torna-se mais limitado em razão da facilidade de geração do escoamento superficial, como as vertentes que constituem os interflúvios e as escarpas, por exemplo. Ressalta-se que as particularidades de ocupação com a cobertura superficial influenciarão no efeito descrito, com usos do solo mais permeáveis ou mais impermeabilizantes nas diferentes classes morfológicas.

As camadas *raster* de declividade das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos foram geradas automaticamente no QGIS, de forma que cada *pixel*, na resolução espacial de 30 metros, gerado a partir da ferramenta GDAL.

3.3.2 Uso e cobertura da terra

As atividades humanas que podem influenciar na variação do escoamento de base podem ser mensuradas pela identificação de mudanças históricas na distribuição do uso e cobertura da terra. Isso significa que um único cenário não é suficiente para relacionar diretamente os impactos nas mudanças de recarga e, conseqüentemente, na descarga de águas, em razão do longo tempo de armazenamento e circulação das águas subterrâneas. Nesse sentido, as alterações nas paisagens das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos são afetadas pelos fatores socioeconômicos das diferentes escalas geográficas (global, nacional, regional e local).

As classes de uso e cobertura da terra foram extraídas do modelo explicativo das velocidades médias do escoamento superficial em função da declividade de Kibler (1982 apud Porto *et al.*, 2000, p. 819): florestas, pastagens e áreas campestres, áreas cultivadas e descobertas e áreas urbanizadas. Acrescentou-se a classe de silvicultura por ser uma atividade

de monocultivo exótico expressivo nas bacias hidrográficas de Santa Catarina (pinus ou eucalipto), que tem um comportamento diferenciado quando comparado com as florestas nativas, que estão em estágio de regeneração natural ou em clímax. Todas as cinco classes de uso e cobertura da terra do presente estudo seguem as definições sugeridas (Quadro 25) das classes de nível II do Manual Técnico de Uso da Terra do IBGE (2013). As classes áreas de mineração, águas continentais e águas costeiras do IBGE (2013) não foram incluídas em razão do reduzido tamanho em extensão para as áreas de drenagem das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos.

Quadro 25 – Características dos tipos de uso e cobertura da terra.

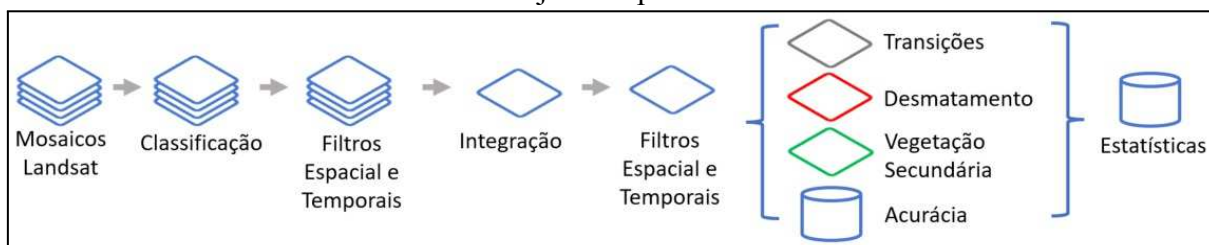
Uso e cobertura da terra identificado	Classe de uso e cobertura da terra do IBGE (2013)	Características (IBGE, 2013)
Áreas urbanizadas	Área urbanizada	Áreas de aglomerações urbanas, com edificações, indústrias, centros comerciais, redes viárias, de telecomunicações, de energia, etc. Encontram-se na forma de cidades, vilas e áreas urbanas isoladas, que podem ser contínuas ou descontínuas.
Silvicultura	Silvicultura	Atividade de cultivo, composição e trato de espécies florestais para fornecimento de matéria-prima para as indústrias madeireira e/ou de papel e celulose, ou ainda com a finalidade de consumo familiar. São exemplos o reflorestamento com espécies únicas e o cultivo agroflorestal.
Pastagens e áreas campestres	Pastagens	Áreas com vegetação de gramíneas e/ou espécies leguminosas originadas de pastagens naturais ou que constituem forragens perenes que são usadas para o pastoreio de gado pela atividade pecuária.
	Campestre	Áreas com estrato principalmente arbustivo e distribuído de maneira esparsa sobre uma camada de vegetação gramíneo-lenhosa. Abrangem diferentes regiões fitogeográficas na forma de savanas, campos e estepes sob diferentes graus de modificação humana.
Áreas cultivadas e descobertas	Cultura temporária	Cultivo de espécies de plantas que possuem um ciclo de vida de curta a média duração, geralmente de alguns meses, permitindo um novo plantio após a produção. São exemplos as hortaliças, grãos, cereais, raízes, tubérculos, bulbos, cana-de-açúcar, mandioca, etc.
	Cultura permanente	Cultivo de espécies de plantas que possuem um ciclo de vida com longa duração, com produção anual e sem necessidade de novo plantio. Enquadram-se espécies frutíferas, produtoras de fibras, espécies oleaginosas, etc.
	Área descoberta	Áreas com rocha nua exposta, áreas de extração abandonadas e sem vegetação, dunas, praias, canais fluviais com areia ou seixos, etc.
Florestas	Florestal	Áreas de formações arbóreas com remanescentes primários ou em estágios de recomposição florestal (como capoeiras e capoeirões), com porte superior a 5 metros.

Fonte: Adaptado de IBGE (2013).

Para a efetivação do cálculo da VmES no estágio de desenvolvimento final do presente trabalho foram usados dados de uso e cobertura da terra provenientes do Projeto MapBiomas. O Projeto MapBiomas é um projeto de sensoriamento remoto diferenciado, iniciado no ano de 2015, que disponibiliza dados anuais de uso e cobertura da terra de todo o Brasil desde o ano de 1985. Esses dados são públicos, abertos e gratuitos e fazem parte de um trabalho colaborativo de uma rede institucional que inclui universidades, Organizações Não-Governamentais (ONGs) e empresas de tecnologia sob a coordenação do Observatório do Clima¹² (PROJETO MAPBIOMAS, 2022).

O Projeto MapBiomas é dividido em coleções, contendo avanços em relação à classificação. A coleção mais recente usada durante o desenvolvimento do presente trabalho foi a de número 6, publicada em 2021 e compreendendo uma série histórica de 1985 a 2020, cuja metodologia está representada na Figura 50. A fonte de dados são mosaicos de imagens Landsat anuais, com resolução espacial de 30 metros, da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e do USGS. Essas imagens são acessadas, processadas e classificadas (por bioma e tema transversal) em nuvem no Google Earth Engine, com códigos de programação *Javascript* e *Python*. Segundo o portal da plataforma¹³, a escala cartográfica indicada para aplicação dos dados de uso e cobertura da terra é a 1:100.000, podendo haver a visualização até a escala 1:50.000. A remoção de ruídos é realizada por filtros espaço-temporais aplicados antes e depois da integração dos biomas e temas transversais. Ao final, são geradas estatísticas das transições de uso da terra, do desmatamento, de vegetação secundária e de acurácia, regionalizadas por bioma, bacias hidrográficas, áreas protegidas, estados e municípios (PROJETO MAPBIOMAS, 2022).

Figura 50 – Etapas metodológicas de produção dos mapas anuais de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomas.



Fonte: Projeto MapBiomas (2022).

¹² <https://www.oc.eco.br/>

¹³ <https://mapbiomas.org/produtos>

O mapeamento multitemporal do uso e cobertura da terra incluiu o ano da primeira cena classificada (1985) disponibilizada pelo Projeto MapBiomias, o último ano contendo os dados de vazão para todas as estações fluviométricas do presente estudo (2018) e os cenários intermediários com diferença de aproximadamente oito anos (1993, 2001 e 2008). Compreendendo um período de cerca de 33 anos, buscou-se a identificação de mudanças no uso e cobertura da terra que pudessem interferir na recarga e descarga das águas subterrâneas.

O download dos dados de uso e cobertura da terra foi realizado com o complemento *MapBiomias Collection*, no sistema de informações geográficas livre QGIS. No *raster* “Collection 6.0 - 2020” baixado, foram selecionados o ano da classificação, bem como as classes e as subclasses de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomias (com asterisco e destacadas em cinza) correspondentes às classes de interesse da presente pesquisa (Quadro 26).

Quadro 26 – Correspondências entre as classes e subclasses de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomias e as classes da presente pesquisa.

Classe do Projeto MapBiomias	Subclasse do Projeto MapBiomias	Classe da presente pesquisa	
Floresta*	Floresta Natural	Formação Florestal	
		Formação Savânica	
		Mangue	
		Restinga Arborizada	
Corpos D'Água*	Rio, Lago e Oceano	Florestas	
	Aquicultura		
Formação Natural não Florestal	Afloramento Rochoso*	Áreas Cultivadas e Descobertas	
	Área Úmida Natural não Florestal	Pastagens e áreas campestres	
	Apicum		
	Outra Formação Natural não Florestal*		
	Formação Campestre*		
Agropecuária	Pastagem*	Silvicultura	
	Floresta Plantada*		
	Agricultura*	Lavoura Temporária	Áreas Cultivadas e Descobertas
		Lavoura Perene	
Mosaico de Agricultura e Pastagem*			
Área não Vegetada*	Praia e Duna	Áreas urbanizadas	
	Infraestrutura Urbana		
	Mineração		
	Outra Área não Vegetada		
Não Observado	-	Não categorizado	

Fonte: Elaboração própria.

Optou-se pela escolha de subclasses do Projeto MapBiomias para a adequação às classes da presente pesquisa pela necessidade em diferenciá-las pelas características de

geração de escoamento superficial, como foi o caso da classe Formação Natural não Florestal, em que houve a recategorização do Afloramento Rochoso em Áreas Cultivadas e Descobertas e da Formação Campestre em Pastagens e Áreas Campestres. Dessa forma, foram selecionadas determinadas subdivisões das classes Formação Natural não Florestal e Agropecuária. A classe “Corpos d’água” foi categorizada, dentre as classes da matriz de cruzamento, como Florestas, a de menor VmES para os intervalos de declividade pela matriz de cruzamento, dado a sua peculiaridade de contribuir também com a recarga a partir do momento em que está retida em pequenos lagos ou açudes, além infiltrar nas fraturas de rochas presentes ao longo do leito dos rios.

Em cada cenário, após a seleção das subclasses de interesse do Projeto MapBiomias, o *raster* “Collection 6.0 - 2020” foi exportado em formato GEOTIFF, sistema geodésico SIRGAS 2000/UTM 22S - EPSG: 31982 e com resolução espacial original de 30 metros. Seguidamente ao recorte da camada *raster* do cenário pela camada vetorial SHP de cada bacia hidrográfica representativa, houve a conversão do *raster* para vetor no QGIS com a ferramenta Poligonizar, configurando-se a Banda 3 como referência do procedimento.

O *raster* produzido pelo Projeto MapBiomias é multibandas (Banda 1 – vermelho; Banda 2 – verde; Banda 3 – azul; e Banda 4 – alpha). Na conversão de *raster* para vetor, há o agrupamento automático de *pixels* para a geração de polígonos. Com exceção da Banda 3, nas demais bandas estava ocorrendo o agrupamento de *pixels* de diferentes classes contíguas (como entre a classe de áreas urbanizadas e a de florestas na Banda 2, por exemplo), gerando polígonos com apenas uma dessas classes (florestas sendo convertidas em áreas urbanizadas, por exemplo). A Banda 3 (azul) é constituída por dados do Landsat 5 e 7 (Banda 1) e do Landsat 8 (Banda 2), sendo selecionada por gerar polígonos fielmente ao representado no valor e nas cores originais (padrão hexadecimal pré-definido) do *raster* do Projeto MapBiomias.

Paralelamente aos cenários observados de uso e cobertura da terra para as bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018), foi simulado um cenário hipotético de cobertura da terra em condição natural. Essa estratégia foi introduzida na metodologia como uma forma de obter a calibração do BFI médio global em um cenário balizador de uso e cobertura da terra, em condição natural, nas bacias hidrográficas representativas de cada domínio hidrogeológico. Estipulou-se para a elaboração do cenário de condição natural uma reconstituição das paisagens nas bacias hidrográficas representativas, com a substituição das áreas modificadas pelos usos humanos (pastagens e

áreas campestres, áreas cultivadas e descobertas, silvicultura e áreas urbanizadas) pela reconstituição das áreas de florestas, que estariam em um estágio originário de clímax.

A reconstituição hipotética da condição natural ocorreu a partir do cenário observado de uso e cobertura do ano de 1985, de menor modificação de cobertura nas bacias hidrográficas representativas e de início da disponibilidade de dados na plataforma do Projeto MapBiomias (2022), via complemento *MapBiomias Collection*, no QGIS. Os *pixels* das classes áreas urbanizadas, pastagens e áreas campestres, áreas cultivadas e descobertas e silvicultura foram substituídos pela classe florestas. Exceção foram as áreas de condição natural identificadas pelo Projeto MapBiomias (2022), as quais foram consideradas como sem modificação, devendo ser mantidas, como foi o caso dos afloramentos rochosos e das áreas campestres nativas. A partir do cenário observado de 1985 (contendo as subclasses do Projeto MapBiomias do Quadro 26), houve a exportação da camada *raster* no formato GEOTIFF, sistema geodésico SIRGAS 2000/UTM 22S (EPSG: 31982) e com resolução espacial original de 30 metros; o recorte pela camada vetorial da bacia hidrográfica representativa; e a conversão de *raster* para vetor pela Banda 3 com a ferramenta Poligonizar do QGIS.

3.3.3 Matriz de cruzamento da VmES

A matriz de cruzamento da VmES é retratada na Tabela 6. A matriz apresenta uma média dos valores de VmES da Tabela 5 adaptada por Porto *et al.* (2000, p. 819), que tem como origem o gráfico de declividade em função da velocidade do escoamento superficial sobre os tipos de cobertura do solo de USDA/SCS (1975, p. 32 apud Kibler, 1982, p. 105). A VmES, em m/s, indica que quanto maior o seu valor, mais impermeabilizada é uma superfície e, portanto, menor será a infiltração e a recarga de águas no aquífero. Para a metodologia proposta, a matriz de cruzamento foi executada em ambiente SIG (QGIS), entre o *raster* com os valores de declividade, em porcentagem, e o *raster* de classificação de uso e cobertura da terra de cada ano (cenário simulado de condição natural e cenários observados dos anos de 1985, 1993, 2001, 2009 e 2018). O cruzamento *pixel a pixel* resultou em outro *raster*, no qual as células apresentam valores entre 0,25 m/s (menor valor possível da VmES) e 5,2 m/s (maior valor possível da VmES) (Tabela 6). Todo o processo é detalhadamente descrito dentro deste tópico.

Tabela 6 – Velocidades médias do escoamento superficial (em m/s) de diferentes coberturas da terra conforme o intervalo de declividade (%).

Uso e cobertura da terra	Declividade (%)			
	0-3	4-7	8-11	>12
Florestas	0,25	0,65	0,9	1
Silvicultura*	0,35	0,9	1,23	1,35
Pastagens e áreas campestres	0,4	0,95	1,2	1,3
Áreas cultivadas e descobertas	0,45	1,15	1,55	1,7
Áreas urbanizadas	1,3	3,3	4,6	5,2

*Classe Silvicultura estimada no presente trabalho a partir da média de valores entre as classes Florestas e Áreas Cultivadas.

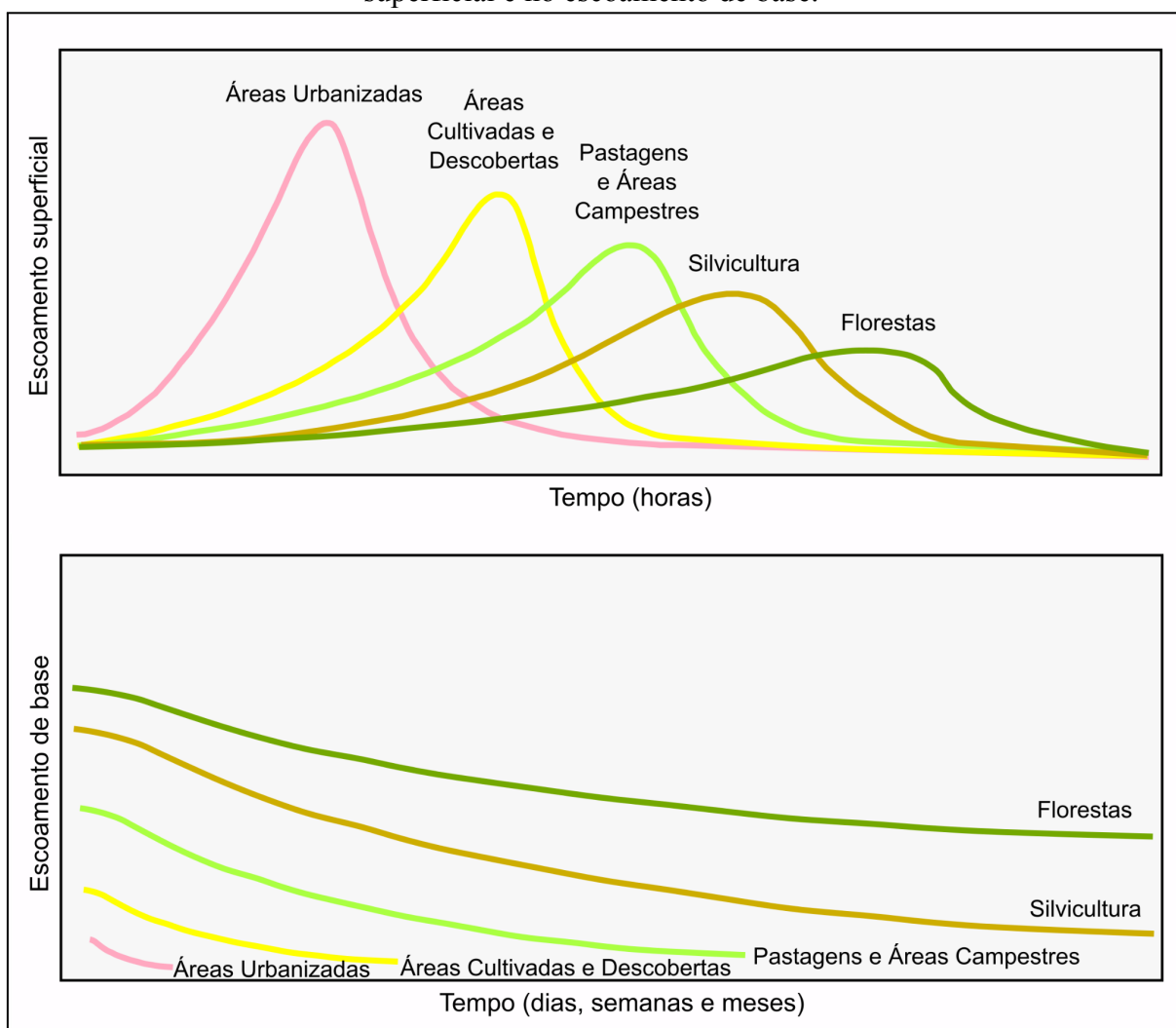
Fonte: Adaptado de Kibler (1982, p. 105 apud Porto *et al.*, 2000, p. 819).

Distintamente das demais classes de uso e cobertura da terra, a silvicultura não estava incluída na Tabela 5 de Porto *et al.* (2000, p. 819), mas se considera expressiva em algumas das bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina, ligada às atividades madeireira, moveleira e de papel e celulose. Assim, a inserção dessa classe de uso cobertura da terra na matriz de cruzamento implicou na dificuldade em se obter valores de VmES, que passou a ser também mais uma limitação da metodologia proposta. Como solução, optou-se pela proposição de valores médios entre as VmES das classes Florestas e Áreas Cultivadas nos intervalos 0-3%, 4-7%, 8-11% e maior que 12%. A lógica aplicada é a de que a silvicultura é uma prática de monocultivo, mas que envolve espécies florestais exóticas. É possível deduzir a partir do ábaco de VmES do USDA/SCS (1975, p. 32) (Figura 49), o comportamento da Silvicultura se enquadraria com valores, ao menos, menores de VmES que do “Cultivo em pousio ou mínima atividade em lavoura” e maior que das VmES da classe de “Floresta com muitos detritos e campina”, cuja situação no estado de Santa Catarina é de regeneração sucessional próxima ou já em estágio de clímax. Ao mesmo tempo, a VmES da Silvicultura é menor também que aquelas da classe de vegetação das Pastagens, por tratar-se de espécies de maior porte.

De modo geral, na matriz de cruzamento da VmES parte-se da ideia de que há uma ordem de grandeza, em que determinadas coberturas superficiais favorecem o armazenamento subterrâneo e a perenidade das bacias hidrográficas do que outras, a saber: florestas, silvicultura, pastagens e áreas campestres, áreas cultivadas e descobertas e, por fim a classe que menos contribui à recarga subterrânea, a de áreas urbanizadas. Esquematizando a lógica aplicada das classes de uso e cobertura da terra da presente pesquisa, observa-se no hidrograma do escoamento superficial da Figura 51 que determinadas coberturas superficiais favorecem a conversão do volume das chuvas imediatamente em escoamento superficial, como as classes áreas urbanizadas e áreas cultivadas e descobertas (com curvas abruptas de

vazão). Elas não permitem a retenção de águas nos aquíferos e, conseqüentemente, produzem um menor escoamento de base, em comparativo com as classes de pastagens e áreas campestres, silvicultura e florestas, no qual as curvas de vazão de escoamento superficial durante os eventos de precipitação são mais suavizadas.

Figura 51 – Representação hipotética, em hidrograma, da resposta hidrológica à precipitação para as diferentes coberturas da terra consideradas no presente estudo, no escoamento superficial e no escoamento de base.



Fonte: Escoamento superficial - Adaptado de McConnell e Abel (2015, p. 273); Escoamento de base - Elaboração própria.

Por outro lado, no hidrograma do escoamento de base da Figura 51, nota-se que, sob um evento de precipitação, a curva do escoamento de base da cobertura com florestas (como seria o caso, por exemplo, da Floresta Ombrófila Densa, da Floresta Ombrófila Mista e da Floresta Semidecidual, com ocorrências em Santa Catarina) é a de maior contribuição, nos primeiros dias, aos cursos d'água e é também a curva que permanece mais estável, em volume

e ao longo de um tempo, ao se considerar um longo período, que pode ir de semanas a meses. A silvicultura, enquanto monocultivo florestal (especialmente com as espécies de *pinus* e *eucalyptus*), é uma cobertura que pode possibilitar uma recarga considerável, porém com menor volume que a cobertura de florestas nativas, registrando uma curva de recessão menos suavizada e de menor duração. Em contraposição, coberturas superficiais que favorecem o escoamento superficial contribuem com menos volume ao escoamento de base e não mantêm o processo de recarga em um tempo de longa duração, como as pastagens e áreas campestres, e, principalmente, das áreas cultivadas e descobertas, bem como das áreas urbanizadas. No caso desses últimos, a impermeabilização é um fator que dificulta a recarga subterrânea, gerando uma curva de fluxo de base muito curta, de poucos dias, e com o menor volume, comparativamente aos demais usos. Portanto, bacias hidrográficas dominadas por uma cobertura natural produzem um fluxo de base de maior volume e mais perene do que bacias hidrográficas modificadas pela ação humana, que podem tornar os cursos d'água intermitentes.

Para executar a matriz de cruzamento da Tabela 6 no ambiente SIG do QGIS, as classes de uso e cobertura da terra e os intervalos de declividade exigiram a atribuição de um valor único convencionado (chave-primária), sendo que o valor resultante da multiplicação dessas duas variáveis forneceu, para cada feição vetorial/*pixel*, um valor também convencionado (Tabela 7). Os valores convencionados como chave-primária para as classes de uso e cobertura da terra e para os intervalos de declividade foram selecionados para que não houvesse repetições no produto da multiplicação. Particularmente aos *pixels* do *raster* de uso e cobertura da terra, valores sequenciais ímpares foram atribuídos (1, 3, 5, 7, 9), enquanto para os *pixels* do *raster* de declividade houve a reclassificação em uma sequência na potência de 2 (2, 4, 8, 16), que resultaram em chaves-primárias para a VmES entre os valores 2 e 144. O *raster* gerado pela multiplicação do uso e cobertura da terra pela declividade com esses valores atribuídos apresenta os valores convencionados da Tabela 7, os quais têm correspondência de posição homóloga com as linhas e colunas da Tabela 6.

Tabela 7 – Valores convencionados (chaves-primárias) para a reclassificação do *raster* resultante do cruzamento entre os cenários de uso e cobertura da terra e a declividade.

Valor atribuído aos <i>pixels</i> do uso e cobertura da terra	Valor atribuído aos <i>pixels</i> de declividade			
	2	4	8	16
Florestas	1	2	4	8
Silvicultura	3	6	12	24
Pastos	5	10	20	40
Áreas cultivadas	7	14	28	56
Áreas urbanizadas	9	18	36	72

Fonte: Adaptado de Hoffmann e Nanni (2017, p. 137).

A partir da definição de chaves-primárias para as coberturas superficiais e declividade, dando sequência ao que havia sido realizado no tópico anterior (conversão de *raster* para vetor dos cenários de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomias), houve a atividade de reclassificação dos atributos das feições, conforme o Quadro 27. Estão listadas apenas as classes do Projeto MapBiomias disponíveis para as bacias hidrográficas representativas.

Quadro 27 – Reclassificação dos *pixels* dos dados de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomias no QGIS.

ID da legenda de classes do Projeto MapBiomias	ID das classes do Projeto MapBiomias na Banda 3 (após poligonização do <i>raster</i>)	ID das classes da presente pesquisa
22 - Área não Vegetada	153	9 - Áreas urbanizadas
9 - Floresta Plantada	19	3 - Silvicultura
12 - Formação Campestre	79	5 - Pastagens e Áreas Campestres
13 - Outra Formação Natural não Florestal	172	
15 - Pastagem	102	
18 - Agricultura	237	7 - Áreas Cultivadas e Descobertas
21 - Mosaico de Agricultura e Pastagem	195	
29 - Afloramento Rochoso	0	
1 - Floresta	18	1 - Florestas
26 - Corpos D'água	255	

Fonte: Elaboração própria.

Na tabela de atributos dos cenários observados de uso e cobertura da terra (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018), a reclassificação da camada vetorial envolveu a substituição da chave-primária do Projeto MapBiomias (ID da Banda 3), do campo “DN”, pela chave-primária (ID) das classes da presente pesquisa no novo campo “Conv”: Florestas, Silvicultura, Pastagens e Áreas Campestres, Áreas Cultivadas e Descobertas, e Áreas urbanizadas. Na tabela de atributos, a criação dessa codificação para as classes no campo “Conv” foi

executada na ferramenta Calculadora de Campo pela função CASE WHEN e, após, convertida em *raster* pela ferramenta Rasterizar do QGIS:

```
CASE
WHEN "DN"= 153 THEN 9
WHEN "DN"= 19 THEN 3
WHEN "DN"= 172 THEN 5
WHEN "DN"= 79 THEN 5
WHEN "DN"= 102 THEN 5
WHEN "DN"= 0 THEN 7
WHEN "DN"= 237 THEN 7
WHEN "DN"= 195 THEN 7
WHEN "DN"= 18 THEN 1
WHEN "DN"= 255 THEN 1 ELSE "DN"
END
```

Para a criação do cenário simulado de condição natural, a reclassificação vetorial consistiu na substituição das chaves-primárias das feições com usos antropogênicos por coberturas naturais da matriz de cruzamento, havendo uso da função CASE WHEN adaptada a cada cenário. As feições das subclasses do Projeto MapBiomas referentes à Pastagem, Floresta Plantada, Agricultura, Mosaico de Agricultura e Pastagem, Infraestrutura Urbana, Mineração e Outra Área Não Vegetada foram substituídos, em nomenclatura, na tabela de atributos da camada vetorial no QGIS, pela classe florestas da presente pesquisa. Concomitantemente, foram mantidas as áreas das subclasses do Projeto MapBiomas Afloramento Rochoso e Formação Campestre (situadas na classe Formação Natural não Florestal), por encontrarem-se em abrangência supostamente natural e que não apresentavam cobertura florestal para o cenário de menores modificações antropogênicas da paisagem (ano de 1985), especialmente onde recobrem na Serra Geral e no planalto e escarpas associadas à Serra Geral. A função organizada a seguir, por exemplo, refere-se à bacia hidrográfica representativa do Cristalino, em que as feições do Projeto MapBiomas foram convertidas para as coberturas de Florestas, Áreas Campestres e Descobertas. Após, a camada vetorial foi convertida em *raster* pela ferramenta Rasterizar do QGIS.

```
CASE
WHEN "DN"= 153 THEN 1
WHEN "DN"= 19 THEN 1
WHEN "DN"= 79 THEN 5
WHEN "DN"= 0 THEN 7
WHEN "DN"= 172 THEN 5
WHEN "DN"= 102 THEN 1
WHEN "DN"= 237 THEN 1
WHEN "DN"= 195 THEN 1
WHEN "DN"= 18 THEN 1
WHEN "DN"= 255 THEN 1 ELSE "DN"
END
```

Por essa razão, determinados cenários em condição natural estão representados pelas áreas cultivadas e descobertas (classes de uso e cobertura da terra da presente pesquisa, com correspondência convencionada no Quadro 26 com a subclasse do Projeto MapBiomias Afloramento Rochoso) e pastagens e áreas campestres (pela correspondência convencionada no Quadro 26 com a subclasse do Projeto MapBiomias Formação Campestre). Vale salientar que não foi possível identificar se já houve uma expansão maior dessas áreas no passado anterior às modificações antropogênicas, sendo uma limitação do cenário hipotético simulado em cada bacia hidrográfica representativa.

No passo seguinte, as camadas vetoriais de uso e cobertura da terra foram convertidas para *raster* pela coluna de valores convencionados (“Conv”) da tabela de atributos através da ferramenta Rasterizar. Foram marcadas as opções de unidades georreferenciadas; arquivo da bacia hidrográfica representativa como extensão de saída; resolução horizontal e vertical de 30 metros, formato de saída em Int16 bits.

A reclassificação dos *pixels* do *raster* de declividade para as chaves-primárias indicadas na matriz de cruzamento da Tabela 7 (2, 4, 8 e 16) foi realizada com a função *r.reclass* do GRASS, na caixa de ferramentas do QGIS. Os *pixels* com a declividade entre 0 e 100% foram substituídos pelos valores convencionados por meio da expressão:

0=2	34=16	68=16
1=2	35=16	69=16
2=2	36=16	70=16
3=2	37=16	71=16
4=4	38=16	72=16
5=4	39=16	73=16
6=4	40=16	74=16
7=4	41=16	75=16
8=8	42=16	76=16
9=8	43=16	77=16
10=8	44=16	78=16
11=8	45=16	79=16
12=16	46=16	80=16
13=16	47=16	81=16
14=16	48=16	82=16
15=16	49=16	83=16
16=16	50=16	84=16
17=16	51=16	85=16
18=16	52=16	86=16
19=16	53=16	87=16
20=16	54=16	88=16
21=16	55=16	89=16
22=16	56=16	90=16
23=16	57=16	91=16
24=16	58=16	92=16
25=16	59=16	93=16
26=16	60=16	94=16
27=16	61=16	95=16
28=16	62=16	96=16
29=16	63=16	97=16
30=16	64=16	98=16
31=16	65=16	99=16
32=16	66=16	100=16
33=16	67=16	

Dessa maneira, com os *pixels* já ajustados aos valores convencionados na matriz de cruzamento, os *pixels* do *raster* de declividade reclassificado foram multiplicados pelos *pixels* do *raster* reclassificado de cada cenário observado, bem como pelo cenário simulado, de uso e cobertura da terra de cada bacia hidrográfica representativa, através da ferramenta

Calculadora Raster do QGIS. Um exemplo de expressão usada na Calculadora Raster foi o caso do cenário observado de 1985 da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado: "decliv_vila_canoas_convenc_recortado@1" * "vila_canoas_1985_conv@1". No total, seis arquivos *raster* do cruzamento do uso e cobertura da terra pela declividade foram gerados, e com valores de *pixel* entre 1 e 144 (campo "DN") da matriz da Tabela 7, incluindo o cenário simulado da condição natural e os cenários observados dos anos de 1985, 1993, 2001, 2009 e 2018.

Todos os seis arquivos *raster*, em cada bacia hidrográfica representativa, foram novamente convertidos de *raster* para vetor. Na tabela de atributos, as feições com os valores do campo "DN" fora das chaves-primárias entre 1 e 144 da matriz de cruzamento foram eliminadas. O campo "VmES" foi criado na tabela de atributos de cada camada vetorial e usada a função CASE WHEN para substituir os valores convencionados (1 a 144) pelos valores de VmES da Tabela 6.

```

CASE
WHEN "DN"= 2 THEN 0.25
WHEN "DN"= 4 THEN 0.65
WHEN "DN"= 8 THEN 0.9
WHEN "DN"= 16 THEN 1
WHEN "DN"= 6 THEN 0.35
WHEN "DN"= 12 THEN 0.9
WHEN "DN"= 24 THEN 1.23
WHEN "DN"= 48 THEN 1.35
WHEN "DN"= 10 THEN 0.4
WHEN "DN"= 20 THEN 0.95
WHEN "DN"= 40 THEN 1.2
WHEN "DN"= 80 THEN 1.3
WHEN "DN"= 14 THEN 0.45
WHEN "DN"= 28 THEN 1.15
WHEN "DN"= 56 THEN 1.55
WHEN "DN"= 112 THEN 1.7
WHEN "DN"= 18 THEN 1.3
WHEN "DN"= 36 THEN 3.3
WHEN "DN"= 72 THEN 4.6
WHEN "DN"= 144 THEN 5.2 ELSE "DN"
END

```

Ainda na tabela de atributos, uma coluna para calcular a área de cada valor convencionado foi criada com a ferramenta de Calculadora de Campo (com a área, em metros quadrados, dividida por 1.000.000, para resultar na medida em quilômetros quadrados). O complemento *GroupStats* do QGIS foi usado para o somatório de áreas de cada VmES específica (relação entre a VmES da Tabela 7 e a área de cobertura na bacia hidrográfica representativa) a partir do respectivo valor de chave-primária do campo “DN”, uma vez que há velocidades na Tabela 6 com valores repetidos. O somatório das áreas das VmES, para cada tipo de cobertura da terra, em cada cenário observado e simulado das bacias hidrográficas representativas, foi contabilizado em planilha eletrônica.

Notou-se que o somatório total das áreas da VmES, em quilômetros quadrados, estava diferente da área total da camada vetorial das bacias hidrográficas representativas (Tabela 8). Nesse sentido, a técnica definida para possibilitar o comparativo de valores entre os diferentes cenários (condição natural, 1985, 1993, 2001, 2009 e 2018) de uma mesma bacia hidrográfica representativa foi a compensação dessas áreas em uma planilha eletrônica. Houve o cálculo da diferença entre a área total do polígono da área de drenagem e o valor do somatório das áreas das VmES das classes de uso e cobertura da terra em cada ano analisado. Essa diferença foi dividida proporcionalmente, para aumentar ou diminuir, conforme o caso, o valor de área individualizada de cada classe de uso e cobertura da terra, de modo a igualar o somatório ao tamanho da área total da camada vetorial da área de drenagem e possibilitar o comparativo. Dessa forma, foram extraídos dados referentes à ação antropogênica para a caracterização da dinâmica físico-temporal, na forma de área e porcentagem, das cinco classes de uso e cobertura da terra para a criação de gráficos.

Tabela 8 – Diferenças entre a área de drenagem e a área classificada para cada ano de referência da classificação.

Bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico	Ano de referência da classificação	Área classificada (km ²)	Área da camada vetorial da bacia hidrográfica representativa (km ²)
Cristalino	Condição natural	400,62	401,09
	1985	400,63	
	1993	400,63	
	2001	400,63	
	2009	400,63	
	2018	400,63	
Bacia Sedimentar Paleozoica	Condição natural	433,74	434,53
	1985	433,73	
	1993	433,73	
	2001	433,73	
	2009	433,73	
	2018	433,73	
SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado	Condição natural	1011,60	1014,64
	1985	1010,95	
	1993	1013,42	
	2001	1010,85	
	2009	1010,89	
	2018	1013,42	
SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado	Condição natural	601,82	607,15
	1985	601,87	
	1993	601,87	
	2001	601,88	
	2009	601,88	
	2018	601,88	
Depósitos Cenozoicos	Condição natural	832,57	833,43
	1985	832,53	
	1993	832,53	
	2001	832,54	
	2009	832,54	
	2018	832,53	

Fonte: Elaboração própria.

Após a compensação de valores, a área de cada cobertura da terra compensada (A), para cada chave-primária da Tabela 7, foi multiplicada pelo valor homólogo da VmES da Tabela 6 pela Equação 20. Essa equação indica a VmES específica, ou seja, o valor de distribuição da VmES na área de drenagem da bacia hidrográfica representativa, conforme o tipo de cobertura superficial e intervalo de declividade da matriz de cruzamento.

$$VmES_{\text{específica}} = \frac{(A_{\text{uso da terra}} \cdot VmES_{\text{da matriz de cruzamento}})}{A_{\text{da bacia hidrográfica}}} \quad (20)$$

O somatório de todas as VmES específicas foi dividido pela área de drenagem, conforme a Equação 21 (HOFFMANN e NANNI, 2017) para cada bacia hidrográfica

representativa de cada domínio hidrogeológico, resultando em um valor global de VmES para o cenário simulado de condição natural e os cenários observados de uso e cobertura da terra (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018).

$$VmES_{global} = \Sigma VmES_{especifica} \quad (21)$$

A VmES global (Equação 21) é própria de cada cenário de uso e cobertura da terra (condição natural simulada ou observado) de cada bacia hidrográfica representativa, tendo sido avaliada na escala temporal considerada (1985 a 2018) para encontrar uma relação com o comportamento de BFI no decorrer do tempo (entre 1981 e 2018). A VmES global do cenário hipotético de condição natural das bacias hidrográficas representativas foi obtido pela substituição de *pixels* de áreas cultivadas e descobertas, pastagens e áreas campestres, áreas urbanizadas e silvicultura por *pixels* de florestas do cenário de uso e cobertura da terra de menor modificação humana, ou seja, o cenário de 1985.

Simulada a cobertura de condição natural da bacia hidrográfica representativa, calculou-se a VmES global estimada do cenário, aplicando-se a matriz de cruzamento da VmES (Tabela 7) no ambiente SIG QGIS com a Equação 20. O cálculo e somatório das VmES específicas referentes a cada chave-primária da matriz de cruzamento, em planilha eletrônica, resultaram na VmES global identificada para a condição natural simulada. A Tabela 9 apresenta a VmES global da condição natural, obtida pela aplicação da Equação 21, inserida no conjunto dos valores de VmES global dos cenários observados de uso e cobertura da terra.

Tabela 9 – Velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES) global estimada para os cenários observados e de condição natural simulada de uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico.

Bacia hidrográfica representativa	Cenário de uso e cobertura da terra	VmES global do cenário (m/s)
Cristalino	Condição natural	0,936
	1985	1,047
	1993	1,047
	2001	1,056
	2009	1,056
	2018	1,062
Bacia Sedimentar Paleozoica	Condição natural	0,904
	1985	1,059
	1993	1,053
	2001	1,056
	2009	1,064
	2018	1,063
SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado	Condição natural	0,863
	1985	0,945
	1993	0,961
	2001	0,963
	2009	0,958
	2018	0,956
SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado	Condição natural	0,778
	1985	1,102
	1993	1,128
	2001	1,110
	2009	1,111
	2018	1,093
Depósitos Cenozoicos	Condição natural	0,708
	1985	0,824
	1993	0,840
	2001	0,848
	2009	0,846
	2018	0,841

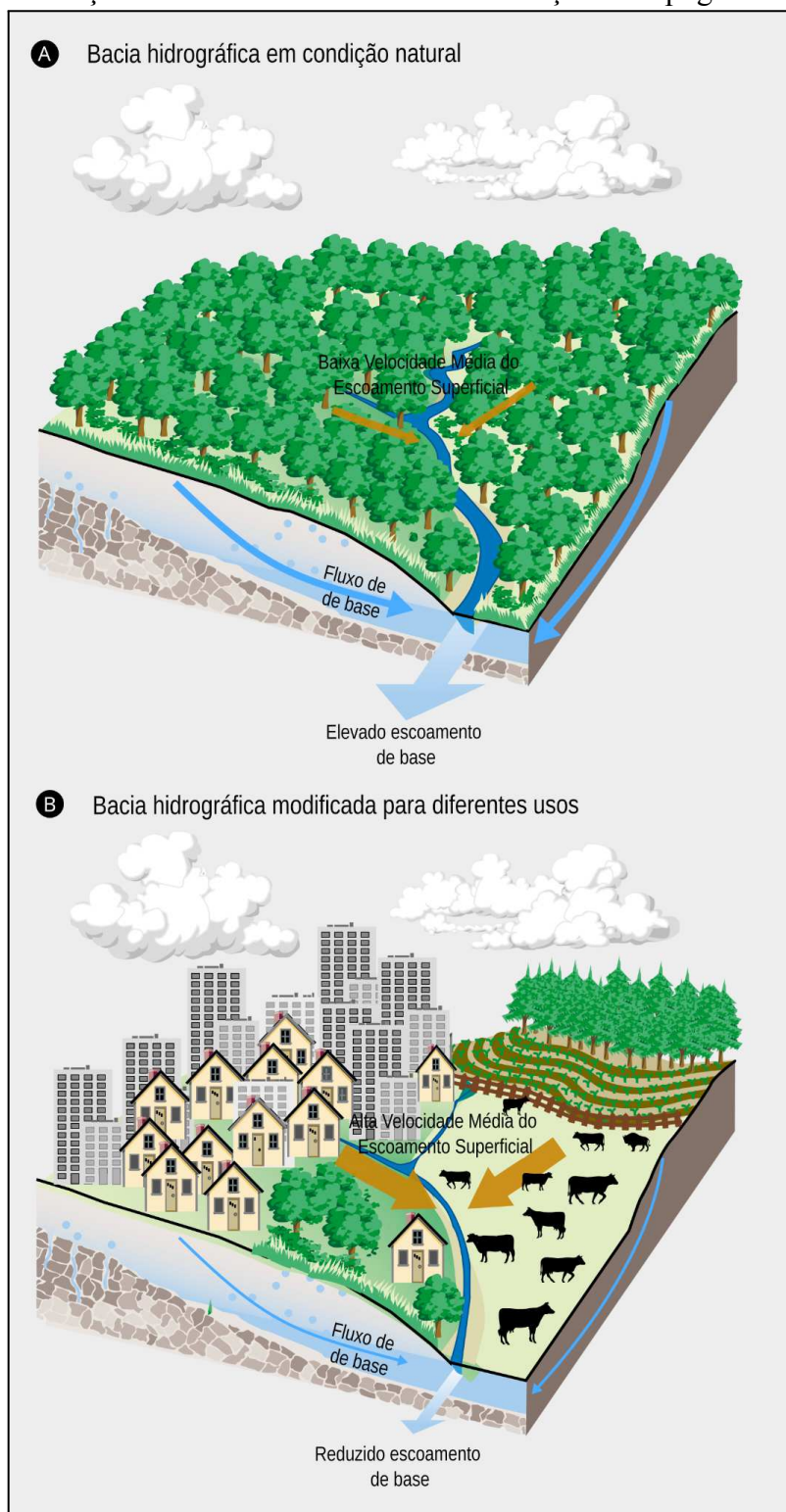
Fonte: Elaboração própria.

3.4 CALIBRAÇÃO DO BFI ÀS VARIÁVEIS AMBIENTAIS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS

A calibração consistiu em estimar o BFI para a condição natural das bacias hidrográficas representativas, cenário balizador de disponibilidade de águas do escoamento de base, usando os dados de VmES global e de BFI médio global dos cenários de 1985, 1993, 2001, 2009 e 2018. Pela teoria do ciclo hidrológico, o escoamento superficial é a parcela da precipitação impedida de infiltrar nos solos, pela declividade, saturação do solo e/ou uma cobertura superficial impermeabilizante. Ao longo do tempo, e mantendo a precipitação constante, se a cobertura superficial tornar-se mais impermeabilizante pela inserção e

expansão de pastagens, áreas cultivadas, silvicultura e áreas urbanizadas sobre as áreas de formações naturais, tal como a transformação de uma bacia hidrográfica inalterada em uma bacia hidrográfica rural ou urbana, maior será a V_{mES} global da bacia hidrográfica representativa (Figura 52). Conseqüentemente, o escoamento de base (identificado na estimativa do BFI) será menor porque as condições de recarga subterrânea foram reduzidas. Assim, depreende-se que o BFI, diretamente influenciado pela recarga subterrânea, tem um comportamento inversamente proporcional em função da V_{mES} .

Figura 52 – Representação do comportamento da Velocidade Média do Escoamento Superficial (V_{mES}) e do escoamento de base para uma bacia hidrográfica em cenário de condição natural e em cenário de modificação antropogênica.



Fonte: Modificado de FISRWG (1998, p. 23).

Nesse caso, a partir do estabelecimento de um valor de BFI máximo para cada bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico, na condição de completa cobertura natural, haveria variações de BFI conforme o avanço da substituição das formações naturais por outros tipos de uso e cobertura antropogênicos. Em síntese, parte-se da ideia de que ocorram valores menores de BFI em relação ao BFI estimado para a condição natural da bacia hidrográfica caso as modificações na paisagem tenham acarretado piora do armazenamento de águas subterrâneas, e conseqüentemente, na redução da contribuição dos aquíferos do domínio hidrogeológico ao escoamento de base no decorrer do período avaliado, em função do aumento da VmES. Assim, a configuração simulada das coberturas naturais das bacias hidrográficas representativas é usada como parâmetro de referência de avaliação físico-temporal da disponibilidade do escoamento de base, através da VmES como resultado do arranjo das diferentes coberturas de cada cenário de modificação antropogênica, por área e declividade.

A fim de obter o BFI da condição natural em função da VmES global do uso e cobertura da terra observado para cada bacia hidrográfica representativa, foi testada a calibração pelo método da regressão linear simples. Para isso, junto à VmES global, foram usados os dados de BFI médio global, calculados a partir de uma média da série de dados do BFI anual, compreendendo alguns anos anteriores e posteriores, indicados e justificados na Tabela 2, correspondentes aos cenários observados (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018), cujo resultado encontra-se no Tabela 10.

Tabela 10 – BFI médio global estimado para cada cenário observado de uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico.

Bacia hidrográfica representativa	Cenário observado de uso e cobertura da terra	Período da média da série de BFI anual	Tempo total (anos)	BFI médio global
Cristalino	1985	1981-1988	8	0,638
	1993	1989-1996	8	0,600
	2001	1997-2004	8	0,640
	2009	2005-2012	8	0,625
	2018	2013-2018	6	0,652
Bacia Sedimentar Paleozoica	1985	1981-1988	8	0,470
	1993	1989-1996	8	0,437
	2001	1997-2004	8	0,441
	2009	2005-2012	8	0,446
	2018	2013-2018	6	0,455
SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado	1985	1981-1988	8	0,495
	1993	1989-1996	8	0,494
	2001	1997-2004	8	0,481
	2009	2005-2012	8	0,490
	2018	2013-2018	6	0,476
SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado	1985	1981-1988	8	0,369
	1993	1989-1996	8	0,348
	2001	1997-2004	8	0,362
	2009	2005-2012	8	0,378
	2018	2013-2018	6	0,374
Depósitos Cenozoicos	1985	1981-1988	8	0,266
	1993	1989-1996	8	0,311
	2001	1997-2004	8	0,290
	2009	2005-2012	8	0,327
	2018	2013-2018	6	0,279

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados do teste de regressão linear simples estão especificados na Tabela 11, contendo as seguintes medidas de interpretação: Coeficiente de Determinação (R^2) e Análise de Variância (ANOVA), com o teste F de significância. Nota-se que o R^2 mostra uma relação linear de mediana a baixa correlação entre essas duas variáveis. Verifica-se que o valor- p da interceptação para o teste de significância F está acima do nível de significância de 0,05, o que indica que as regressões são estatisticamente insignificantes em explicar a variabilidade do BFI médio global. Dessa maneira, considerando apenas os dados observados dessas duas variáveis, os modelos de regionalização obtidos são inviáveis em aplicação, provavelmente pela pouca quantidade de dados cruzados para identificar a variação do uso e cobertura da terra, através da VmES, em função do BFI.

Tabela 11 – Equações de regressão linear simples considerando os dados observados para estimativa do escoamento de base a partir da Velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES) para as bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

Bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico	Equação de regressão linear simples	R ²	Valor-p de significância de F
Cristalino	$BFI = -1,4984 + 2,0211.VmES$	0,4495	0,2154948
Bacia Sedimentar Paleozoica	$BFI = -0,8680 + 1,2444.VmES$	0,1892	0,4641190
SAIG/SG com SAG não Confinado e Semi-Confinado	$BFI = 0,9479 - 0,4815.VmES$	0,1598	0,5049347
SAIG/SG Com SAG Semi-Confinado a Confinado	$BFI = 1,1373 - 0,6953.VmES$	0,5978	0,1251733
Depósitos Cenozoicos	$BFI = -1,1106 + 1,6731.VmES$	0,4162	0,2397942

Fonte: Elaboração própria.

A partir disso, houve uma mudança metodológica para identificar a correspondência entre a VmES e o escoamento de base, que implicou na determinação do BFI médio global da configuração hipotética da paisagem natural de cada bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico. Essa nova interpretação metodológica envolveu a simulação de um cenário hipotético de reconstituição de um cenário de condição natural para identificar o BFI a partir da mínima VmES global de cada bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico, ou seja, de uma máxima recarga subterrânea pela cobertura superficial natural para um cenário anterior às modificações antropogênicas.

A partir dos dados de BFI médio global (Tabela 10), em planilha eletrônica procedeu-se com as seguintes etapas para estimar o BFI da condição natural no cenário pretérito, e simulado, de máxima cobertura florestal, a partir da identificação do que seria a mínima VmES global da bacia hidrográfica representativa: a) BFI específico; b) Coeficiente de variação da VmES específica natural; e c) BFI médio global estimado para a condição natural. Alerta-se que, como limitação, é possível que esse período tão curto de série de hidrológica, com monitoramento de 37 anos de dados de vazão, diante da modificação antropogênica que chega às centenas de anos de exploração de recursos naturais no estado de Santa Catarina, desde a colonização, pode não representar fielmente o BFI da condição natural. Contudo, cumpre para o propósito do presente estudo com a definição de um cenário balizador.

3.4.1 BFI específico

Para a estimativa do BFI global da condição natural, houve a necessidade de definir, inicialmente, o BFI específico a partir da porcentagem estabelecida pela razão entre a VmES específica e a VmES global em cada cenário observado de uso e cobertura da terra (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018). Entende-se que o BFI médio global, da Tabela 10, também corresponde a um valor global para a bacia hidrográfica representativa (como ocorre com a VmES global), justamente por ser uma consequência dos processos hidrológicos dominantes na área de drenagem da estação fluviométrica de referência em cada ano. Por isso, o BFI médio global, ou seja, por cenário (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018), foi fracionado em valores de BFI específico pela porcentagem de participação de cada VmES específica (sob cada uso e por intervalo de declividade da matriz de cruzamento) dentro da VmES global do cenário.

Como o BFI médio global (Tabela 10) oscila entre os cenários observados de uso e cobertura da terra, distribuí-lo proporcionalmente pela participação em porcentagem da VmES específica dentro da VmES global dos cenários observados de uso e cobertura da terra retrataria como o escoamento de base gerado no domínio hidrogeológico se comportaria mediante o avanço das modificações antropogênicas na superfície da bacia hidrográfica. Com base nessa inferência teórica, o BFI médio global do cenário observado (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018) é distribuído entre todas as VmES específicas (ou seja, pelo uso da terra e pelo intervalo de declividade tabelados) que compõem o somatório do valor global da VmES daquele ano da bacia hidrográfica representativa. A Equação 22 mostra o BFI médio global distribuído proporcionalmente pela porcentagem de participação da VmES específica no cenário para a obtenção do BFI específico.

$$BFI_{\text{específico do cenário}} = BFI_{\text{médio global do cenário}} \cdot \left[\frac{\left(\frac{VmES_{\text{específica do cenário}} \cdot 100}{VmES_{\text{global do cenário}}} \right)}{100} \right] \quad (22)$$

Ao final, o somatório dos valores de BFI específico do cenário, por chave-primária da matriz de cruzamento, deveria corresponder ao dado que lhe deu origem, ou seja, ao BFI médio global (Tabela 10) do cenário observado de uso e cobertura da terra. Identificados os valores de BFI específico nos cenários observados, procedeu-se para a identificação do Coeficiente de variação da VmES específica natural (CVmES) a fim de estimar o BFI médio global para o cenário de condição natural.

3.4.2 Coeficiente de variação da VmES específica natural (CVmES)

O Coeficiente de variação da VmES específica natural (CVmES) é a relação, em percentagem, entre a VmES específica de um cenário observado (para a área de um uso e cobertura da terra, por intervalo de declividade) e a VmES específica do cenário simulado de condição natural, referente a cobertura natural no mesmo intervalo de declividade da bacia hidrográfica representativa. O coeficiente de variação da VmES (Equação 23) indica, em percentagem, uma inferência do quanto da retenção de águas pode ter deixado de infiltrar no subsolo (supondo-se que a precipitação é constante), tendo sido conseqüentemente convertida em escoamento superficial, em função da substituição da cobertura em condição natural, conforme o tamanho de cada área de cobertura superficial abrangida no intervalo de declividade da bacia hidrográfica, em detrimento da cobertura da terra identificada no cenário observado.

$$C_{VmES\text{ específica natural}} = 100 \cdot \left(\frac{VmES_{\text{específica observada}}}{VmES_{\text{específica natural}}} \right) \quad (23)$$

Em suma, se o BFI médio global realmente variar em função da VmES global e se isso somente for perceptível na VmES específica da bacia hidrográfica com mudanças induzidas pela substituição das áreas de condição natural, especialmente as florestas, o cenário hipotético de condição natural deveria apresentar um valor mínimo de VmES global estimada e um valor máximo de BFI médio global estimado. Há de se considerar também que, se com a cobertura florestal atual a VmES global é alta e de menor BFI que em relação a uma condição natural da bacia hidrográfica representativa, a questão seria a de identificar o quão baixo a VmES seria para encontrar um BFI médio máximo para um cenário de máxima cobertura florestal e com outras formações naturais (afloramentos rochosos e áreas campestres nativas).

Nesse sentido, a diferença, em percentagem, entre a VmES específica estimada do cenário hipotético de condição natural e cada uma das VmES específicas dos 5 cenários observados pode ser usada para ampliar, de maneira inversamente proporcional, o BFI médio observado. Como não há dados de vazão para estimar o BFI da condição natural de cada bacia hidrográfica representativa, optou-se por essa ampliação que teve a finalidade de aumentar o valor do BFI até o seu máximo, quando não haveria a alteração da cobertura do solo. Se fosse válida a afirmação de que o BFI varia em função da VmES, a modificação verificada nos

cenários de uso e cobertura da terra proporciona uma VmES maior e na condição natural menor, isto é, enquanto o BFI atualmente é menor e na condição natural era maior.

O CVmES é uma construção teórica de grandezas proporcionais e varia em função do tamanho da área, da cobertura da terra em um mesmo intervalo de declividade e da VmES tabelada, ou seja, oscila consoante à VmES específica da condição natural e do cenário observado. Pode ser considerado um mensurador indireto do impacto da modificação antropogênica espacial na recarga subterrânea.

3.4.3 BFI médio global para o cenário de condição natural

Por sua vez, o BFI médio estimado do cenário hipotético de condição natural de cada bacia hidrográfica representativa foi calibrado pelo Coeficiente de variação da VmES específica natural - CVmES (Equação 24). Por uma relação inversamente proporcional, o CVmES foi usado como referência orientativa, para mostrar, em porcentagem, quanto o BFI específico deveria ser maior no seu estado natural em relação ao cenário observado, ao indicar de onde vem o BFI médio global na bacia hidrográfica representativa conforme o tipo de uso e cobertura da terra e intervalo de declividade.

$$BFI_{\text{médio global natural por cenário}} = \Sigma \left\{ BFI_{\text{específico observado}} + \left[BFI_{\text{específico observado}} \cdot \left(\frac{100 - C_{VmES \text{ específica natural}}}{100} \right) \right] \right\} \quad (24)$$

Subtraiu-se cada CVmES simulada, do cenário observado, do valor de 100% (que representa o máximo BFI). Essas diferenças foram usadas para aumentar, proporcionalmente (em porcentagem), o BFI específico em cada cenário observado, a fim de obter o BFI específico na condição natural simulada. Assim, cada VmES específica de cenário observado (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018) estima, pelo Coeficiente de variação da VmES natural específica, o BFI específico de condição natural simulada, com base no BFI médio global de cada um dos cenários observados.

Para as situações de coberturas de condição natural simulada que permaneceram as mesmas ao longo do tempo (como os afloramentos rochosos, para a classe de áreas descobertas, e os campos nativos, para a classe áreas campestres), o valor de variação da VmES específica observada subtraído de 100% resultou em 0%, mantendo-se o mesmo BFI

específico do cenário observado. Caso o cálculo do CVmES superasse 100% de uma cobertura da terra da condição natural para uma determinada faixa de declividade, então mantinha-se o mesmo valor de BFI específico acrescido da porcentagem para completar o restante da ampliação proporcional em 100% do BFI na planilha com a função SE.

Por fim, havia cinco somatórios do BFI específico natural (ou seja, de BFI natural distribuído pela área de drenagem), a partir dos cinco cenários observados de VmES específica (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018), em cada bacia hidrográfica representativa. Ao mesmo tempo, o somatório das VmES específicas do cenário de condição natural simulada corresponde ao menor valor de VmES global. Desse modo, tem-se a condição natural como o cenário com as melhores condições de infiltração das águas das chuvas, capaz de equivaler a um BFI máximo. Optou-se por realizar uma média dos 5 valores estimados, por cenário, de BFI natural médio global (Equação 25) como uma aproximação quantitativa estimada do BFI médio global para a condição natural da bacia hidrográfica representativa do domínio hidrogeológico. O resultado da média entre esses valores para a condição natural permitiu identificar o máximo BFI das bacias hidrográficas representativas.

$$BFI_{\text{médio global natural}} = \text{média}(BFI_{\text{médio global natural por cenário modificado}}) \quad (25)$$

3.5 AVALIAÇÃO FÍSICO-TEMPORAL DA DISPONIBILIDADE DO ESCOAMENTO DE BASE EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Os indicadores são comunicadores de informações sobre os fenômenos por meio de um modelo empírico ou um conjunto de suposições sobre a realidade, com uma metodologia de mensuração fixa. Com eles, é possível verificar evidências de um fenômeno de maior significado, assim como também é possível verificar tendências ou aspectos que não são imediatamente perceptíveis. Eles transformam os dados analisados em informações simples e de compreensão acessível, situando-se no topo de uma pirâmide de informações (Figura 53), na qual a base é constituída por dados primários de monitoramento (HAMMOND *et al.*, 1995).

Figura 53 – Pirâmide da síntese de informações.



Fonte: Adaptado de Hammond *et al.* (1995, p. 01).

A base da pirâmide de informações é composta por dados primários ambientais sobre aspectos da realidade que sejam monitorados e consistentes, com significativa heterogeneidade espacial e temporal. A aplicação de determinadas técnicas, como as abordagens estatísticas e espaciais (sistemas de informação geográfica) permite que os dados primários sejam convertidos em dados analisados. Hierarquicamente superior, a etapa seguinte da pirâmide de informações se refere à formulação de indicadores ambientais, cuja função é reduzir os ruídos da informação e permitir avaliar aqueles que podem ser avaliados quali-quantitativamente. Por fim, os índices constituem um quadro de simplificação do estado de um ambiente, de enfoque quantitativo, que possibilita orientar ações de planejamento e as tomadas de decisão (SOARES *et al.*, 2006). O principal objetivo de um índice é viabilizar, aos gestores e ao público, a síntese de informações, de modo que possam compreendê-las e relacioná-las para aplicação no gerenciamento e em políticas públicas (VIEIRA e STUDART, 2009). Os índices ou indicadores são valores estáticos que sinalizam a situação de um sistema avaliado. Mesmo assim, podem não abranger determinados fenômenos que ocorrem na dinâmica de um sistema (SICHE *et al.*, 2007).

Dentre as características dos indicadores ambientais, estão (HAMMOND *et al.*, 1995): a) ser orientado ao usuário: os indicadores devem ter um público-alvo, transmitindo informações não somente aos tomadores de decisão, mas também sendo prontamente compreensíveis ao público em geral, devendo refletir os objetivos que uma sociedade visa alcançar; b) ser relevante nas políticas públicas: os indicadores devem ser facilmente interpretados quanto às tendências ambientais ou estar relacionados aos objetivos de uma política nacional; c) ser altamente agregado: para absorção pelos tomadores de decisão e o

público em geral, os indicadores podem ter muitos componentes, mas os índices finais devem ser poucos, de maneira que a quantidade deva atender quem fará uso e a finalidade.

Na gestão de bacias hidrográficas, os indicadores de disponibilidade hídrica devem considerar a integração dos elementos e dos processos do meio natural e modificado, assim como as interações entre as águas subterrâneas e superficiais (SOARES *et al.*, 2006). Assim, a avaliação desenvolvida no presente estudo as interferências das mudanças antropogênicas sobre a paisagem na disponibilidade do escoamento de base das bacias hidrográficas ao longo do tempo pelo reconhecimento do escoamento de base na forma de classificação semafórica. O Índice Geoambiental do Escoamento de Base (IGEB) para um cenário de uso e cobertura da terra é composto pela razão de dois índices setoriais usados como indicadores, a saber, o BFI médio global do cenário de condição natural simulada e o BFI médio global do cenário modificado (Equação 26). A avaliação foi implementada sobre os dados de BFI médio global dos cenários de condição natural simulada, 1985, 1993, 2001, 2009 e 2018.

$$IGEB \text{ do cenário} = \left(\frac{BFI \text{ médio global do cenário modificado}}{BFI \text{ médio global do cenário de condição natural simulada}} \right) \cdot 100 \quad (26)$$

Os índices setoriais não contêm pesos na sua aplicação no índice global do cenário, porém, variam apenas em um intervalo entre 0 e 1. Já para o índice global, o resultado da divisão entre os índices setoriais é multiplicado pelo fator de conversão 100 a fim de obter, em porcentagem, o *score* da variação do BFI médio global do cenário modificado em relação ao BFI médio estimado do cenário natural simulado da bacia hidrográfica, conforme o domínio hidrogeológico. Quanto maior o valor em porcentagem, mais próximo estará o cenário analisado em relação ao BFI médio estimado de uma condição natural da bacia hidrográfica, aplicável comparativamente a todos os domínios hidrogeológicos.

A escala de avaliação do índice global traduz a informação quantitativa em qualitativa a partir de uma matriz semafórica contendo uma escala de avaliação descritiva para as porcentagens de variação em relação BFI médio estimado de uma condição natural da bacia hidrográfica. Quanto melhor as condições de recarga subterrânea, com áreas com vegetação de florestas nativas em áreas prioritariamente favoráveis, melhor será a produção de água e melhor será a classificação do cenário da bacia hidrográfica pelo índice global. Ainda, o índice global permite o comparativo entre os cenários de uma mesma bacia hidrográfica e entre bacias hidrográficas de diferentes domínios hidrogeológicos, pois a referência para o cálculo de variação é sempre o cenário de condição natural estimada. O

IGEB é, dessa forma, um instrumento que permite medir e avaliar os impactos na paisagem induzidos pelas modificações antropogênicas no escoamento de base das bacias hidrográficas.

Para a classificação físico-temporal da disponibilidade do escoamento de base em uma bacia hidrográfica, é necessário simular o cenário de condição natural da bacia hidrográfica, obter a VmES global e o BFI médio global desse cenário balizador. Esse procedimento é um requisito da classificação, pois o valor do BFI da condição natural serve de parâmetro para avaliar a disponibilidade do escoamento de base com o avanço das modificações antropogênicas.

A escala de avaliação do presente estudo usou como referência duas escalas de categorização da escassez hídrica, por apresentarem uma comunicação de informação através da técnica de proporção para apresentação dos dados referentes à falta de água. Conforme a ONU (2018), o estresse hídrico é a razão entre o total de água doce extraído pelos principais setores usuários de águas (agricultura, doméstico e industrial) e o total de água doce disponível, expresso em porcentagem. A categorização de escassez hídrica, da ONU (2018), estimou o estresse hídrico para os países a partir de estimativas de oferta e demanda de águas a partir da base de dados AQUASTAT - Sistema Global de Informação da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2016).

A outra escala contemplou o trabalho desenvolvido por Hofste, Reig e Schleifer (2019) para classificar, em escala nacional e regional, a proporção entre a demanda hídrica de águas superficiais e subterrâneas mediante a disponibilidade total. O estresse hídrico foi estimado pela base de dados Aqueduct 3.0, do *World Resources Institute* (WRI). Comparativamente, Hofste, Reig e Schleifer (2019) apresentam uma classe de estresse hídrico extra em relação à ONU (2018), detalhando em Médio-alto (20-40%) e Alto (40-80%) a correspondência para o intervalo 25-70% da ONU (2018).

As escalas de avaliação do estresse hídrico da ONU (2018) e de Hofste, Reig e Schleifer (2019) foram adaptadas ao IGEB (Quadro 28). A variação do intervalo foi replicada para uma variação aproximada ao IGEB entre as classes correspondentes, por exemplo, 10% de variação na escala valeria aproximadamente 10% de variação no IGEB. Ressalta-se que o IGEB apresenta intervalos em ordem numérica inversa ao do estresse hídrico em virtude do IGEB retratar a disponibilidade do escoamento de base nas bacias hidrográficas, isto é, uma elevada disponibilidade de escoamento de base equivaleria a um baixo nível de estresse hídrico e vice-versa.

Quadro 28 – Classificação físico-temporal da disponibilidade do escoamento de base em uma bacia hidrográfica (IGEB) a partir do nível de estresse hídrico.

Nível de estresse hídrico (ONU, 2018)	Nível de estresse hídrico (HOFSTE, REIG e SCHLEIFER, 2019)	Escala do IGEB (%)	Disponibilidade do escoamento de base
0-10%	Baixo (<10%)	>91	Sustentável
10-25%	Baixo-médio (10-20%)	81-90	Satisfatória
25-70%	Médio-alto (20-40%)	71-80	Razoável
		61-70	Preocupante
	Alto (40-80%)	26-60	Crítica
>70%	Extremamente alto (>80%)	<25	Alarmante

Fonte: Elaboração própria.

Uma classificação de alta da disponibilidade do escoamento de base indica um elevado potencial hídrico, ou seja, que a bacia hidrográfica apresenta uma produção de água com elevadas taxas de fluxo de base, proporcionando uma vazão razoável por longo tempo, inclusive durante as estiagens (COSTA, 2005). Portanto, os menores níveis de estresse hídrico são equivalentes a um baixo impacto na sustentabilidade de recursos. Por outro lado, níveis elevados de estresse hídrico evidenciam uso intensivo de águas, com potenciais impactos na sustentabilidade dos recursos naturais e de potencial conflito entre os usuários de recursos hídricos (ONU, 2018).

Nesse sentido, a interpretação do resultado considera que quanto menor a porcentagem de disponibilidade de BFI global de um cenário modificado de uso e cobertura da bacia hidrográfica em relação ao BFI global da condição natural (100%), pior a disponibilidade do escoamento de base nos cursos d'água. A variação é descrita qualitativamente, conforme a matriz semafórica estabelecida no Quadro 28, entre sustentável (cor verde escura), satisfatória (cor verde clara), razoável (cor amarela), preocupante (cor laranja), crítica (cor vermelha) e alarmante (cor lilás).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

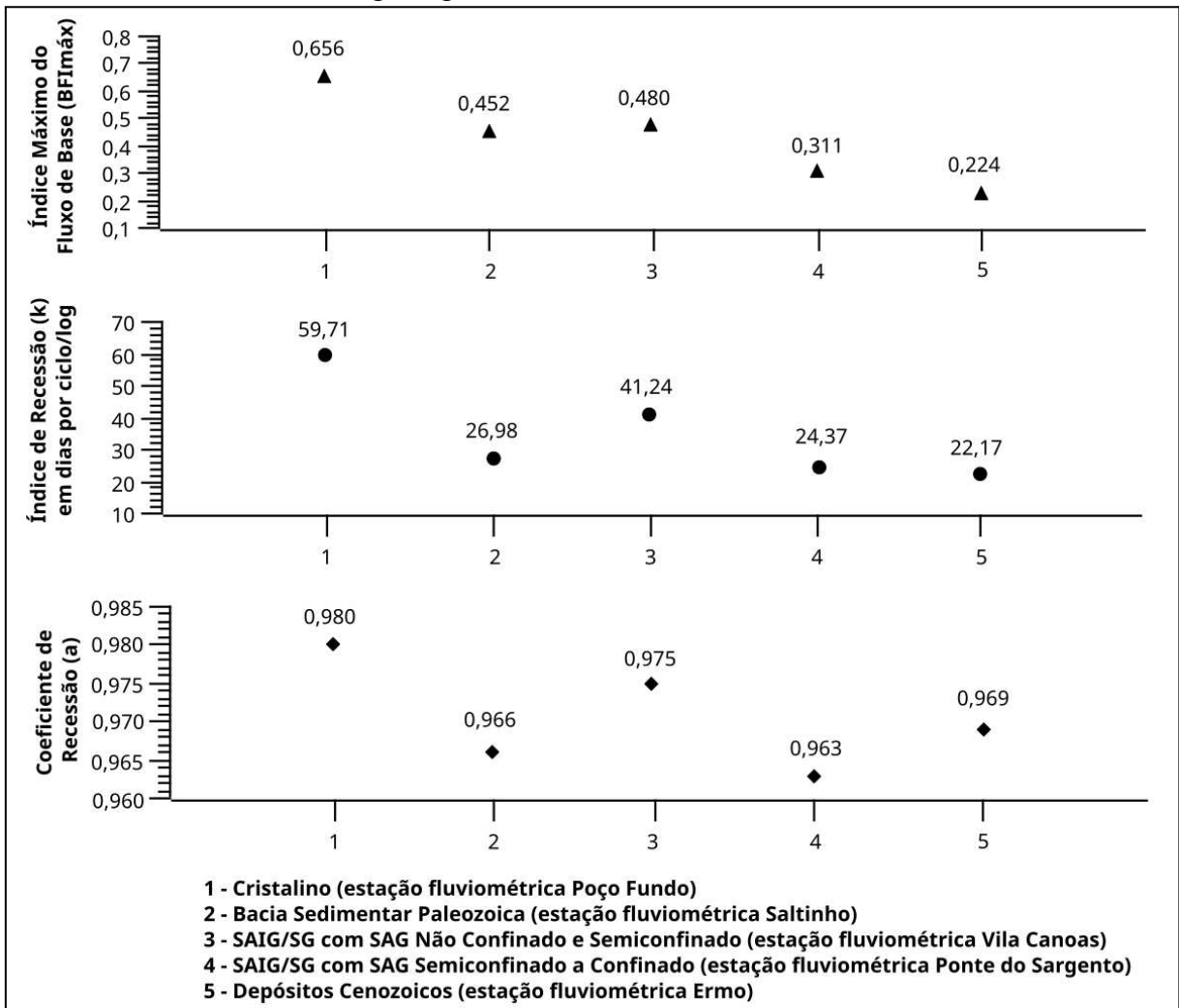
Neste tópico, os resultados da aplicação da metodologia proposta são apresentados e discutidos segundo os objetivos geral e específicos do presente estudo, organizados da seguinte forma: a) Condições de recessão do escoamento nas bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos; b) Cenário balizador do escoamento de base nas bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos; c) Avaliação físico-temporal da interação aquífero-rio; e d) Diagnóstico da disponibilidade do escoamento de base como instrumento na gestão de águas; e) Outra forma de pensar a gestão de águas: pressupostos para uma abordagem geossistêmica.

4.1 CONDIÇÕES DE RECESSÃO DO ESCOAMENTO NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS DE DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS

A interação aquífero-rio é mais expressiva onde a participação do escoamento de base no fluxo total do curso d'água é dominante. E onde o escoamento de base é dominante, as bacias hidrográficas são dependentes dos aquíferos na garantia da perenidade dos cursos d'água. Avaliando-se o comportamento nas bacias hidrográficas representativas (Figura 54), nota-se que a interação aquífero-rio é mais forte¹⁴, de acordo com a porcentagem da vazão total (BF_{máx}) e a duração da curva de recessão (Índice de recessão - *k*) estabelecido para as séries históricas de vazão entre 1981 e 2018, nos domínios hidrogeológicos Cristalino, SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado e Bacia Sedimentar Paleozoica. Em contrapartida, as bacias hidrográficas representativas menos permeáveis são dos domínios hidrogeológicos SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado e Depósitos Cenozoicos.

¹⁴ O tipo de rocha aflorante desempenha um papel fundamental na geração do escoamento de base. Nas bacias hidrográficas onde as litologias são permeáveis, o escoamento de base constitui uma parcela considerável da vazão total, como em áreas com afloramentos em arenito ou calcário. Contudo, onde predominam rochas fraturadas ou material de origem argilosa, o mesmo não se aplica em virtude das bacias hidrográficas tornarem-se quase que impermeáveis, mantendo um escoamento de base de pouca duração e de baixa porcentagem na vazão total (HISCOCK e BENSE, 2014). No entanto, a litologia é apenas um dos fatores que explicam a permeabilidade das bacias hidrográficas, havendo também a influência do tipo de relevo e a relação com o lençol freático, os tipos de solos, a presença de elúvio desenvolvido nas encostas ou do tipo de uso e cobertura da terra, por exemplo.

Figura 54 – BFI_{máx}, índice de recessão (k) e coeficiente de recessão (a) das séries de dados de vazão do período de 1981 a 2018 para as bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina.



Fonte: Elaboração própria.

A quantidade de segmentos de recessão identificados para obter o Índice de recessão (k) para a estação fluviométrica de cada bacia hidrográfica representativa também mostra a quantidade de interrupções provocadas por chuvas, por exemplo. Para períodos entre 3 e 4 dias após o pico de vazão (pela aplicação da Equação 17) e com uma duração de no mínimo de 15 dias de duração, considerando as séries de vazões entre 1981 e 2018, há mais segmentos de recessão na Bacia Sedimentar Paleozoica (98), no SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado (87) e no SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado (63). Por outro lado, as bacias hidrográficas representativas situadas mais próximas do litoral dispõem de menos segmentos de recessão longos, a saber, Cristalino (52) e Depósitos Cenozoicos (41).

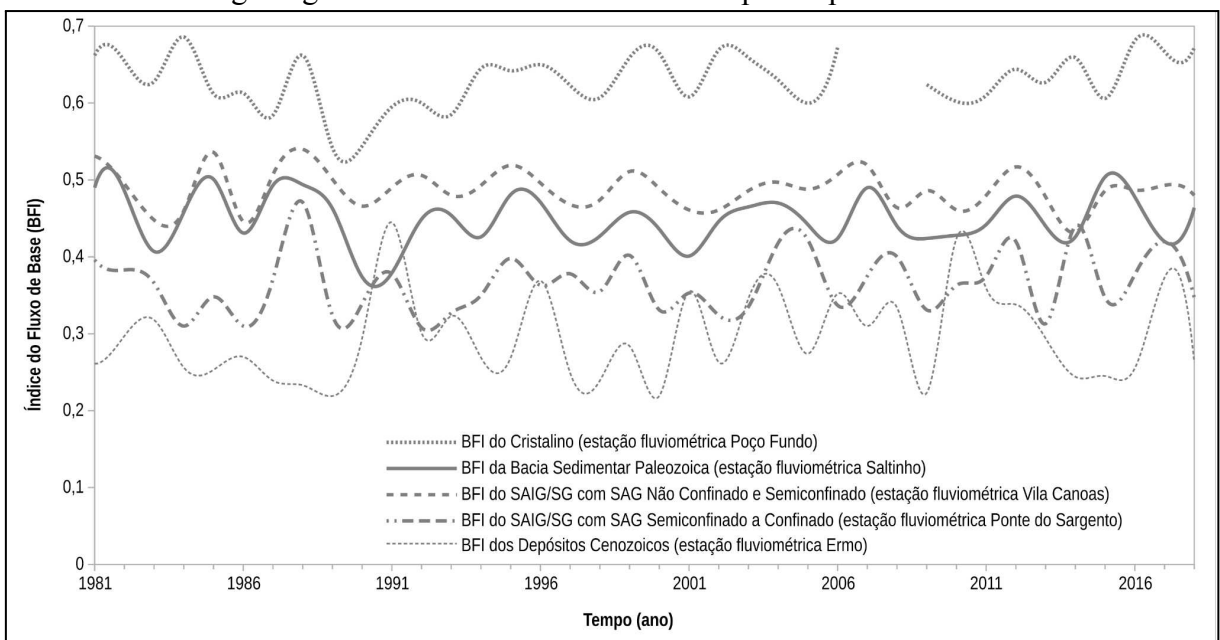
Possivelmente, essa diferenciação se dá pela maior frequência de chuvas junto ao litoral pela influência da maritimidade. Já nas regiões Extremo-Oeste, Oeste, Meio-Oeste e o

Planalto do estado de Santa Catarina, apesar de apresentarem maior volume de precipitação, são áreas onde a continentalidade predomina e a frequência da precipitação é menor (MONTEIRO e MENDONÇA, 2005).

Quanto ao armazenamento subterrâneo (Coeficiente de recessão - a), as bacias hidrográficas representativas de maior potencial hídrico são dos domínios hidrogeológicos Cristalino e SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado. Os domínios hidrogeológicos que apresentam menos armazenamento, e que também acompanham os menores índices de recessão (k), são das bacias hidrográficas representativas dos Depósitos Cenozoicos, Bacia Sedimentar Paleozoica e SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.

Além do BFI_{máx}, do coeficiente de recessão (a) e do índice de recessão (k), outra razão para segregar a metodologia em domínios hidrogeológicos é justamente a oscilação do BFI anual médio (Figura 55). Entre o período de 1981 e 2018, as bacias hidrográficas representativas comportaram-se de maneira diferenciada em cada domínio hidrogeológico. Da ordem de maiores para menores valores de BFI anual médio, seguindo também a ordem de grandeza do BFI_{máx}, estão as bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos Cristalino, SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado, Bacia Sedimentar Paleozoica, SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado e Depósitos Cenozoicos.

Figura 55 – Oscilação do BFI anual médio das bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina para o período entre 1981 e 2018.



Fonte: Elaboração própria.

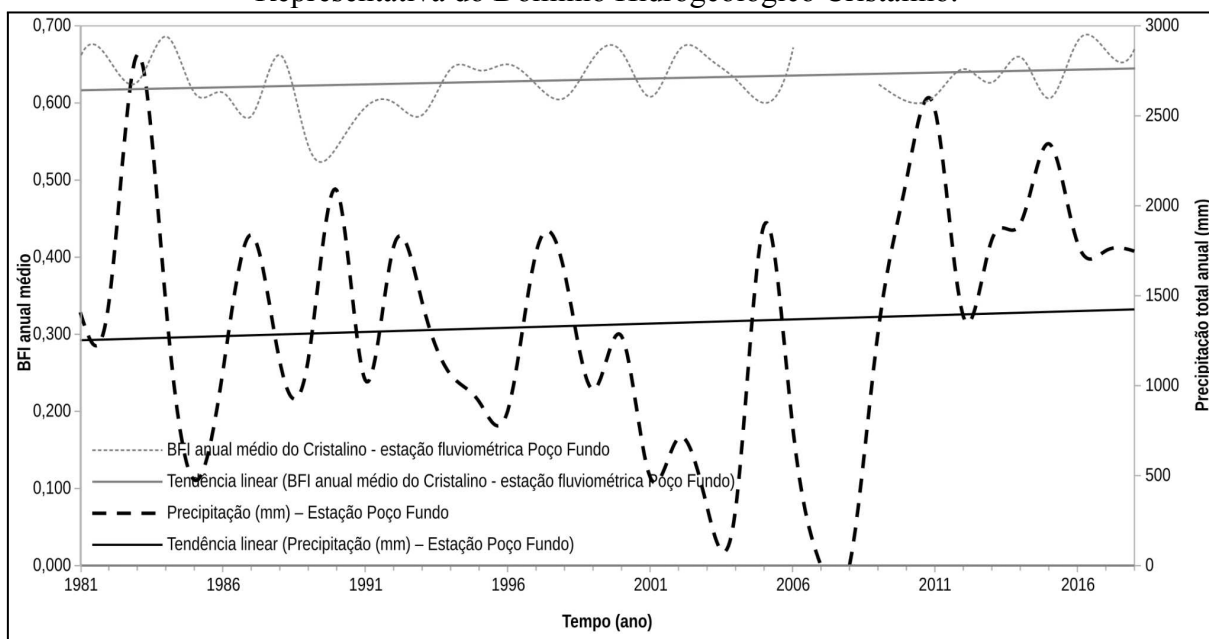
Detalhadamente a seguir, as particularidades da relação entre o BFI_{máx}, o índice de recessão (k) e o coeficiente de recessão (a) são usadas para explicar a permeabilidade conforme as condições ambientais de recessão de cada bacia hidrográfica representativa. Dentre essas condições, estão descritos e relacionados o comportamento da oscilação do BFI anual médio (entre 1981 e 2018); o comportamento da precipitação total anual; a modificação de uso e cobertura da terra entre 1985 e 2018; e a manutenção das vazões mínimas conforme o armazenamento e a duração da curva mestra de recessão, avaliados, respectivamente, pelo coeficiente de recessão (a) e o índice de recessão (k).

O presente tópico tem o propósito de apresentar as principais condições ambientais do escoamento de base das bacias hidrográficas representativas, podendo ser de limitação de aplicação da metodologia em bacias hidrográficas com características ambientais distintas. Vale ressaltar que as bacias hidrográficas representativas do presente estudo apresentam uma rede hidrográfica composta, em sua maior parte, por rios de ganho, ou seja, que recebem águas dos aquíferos. Ademais, elas estão sob clima subtropical úmido e inteiramente no bioma Mata Atlântica, resultando em excedência hídrica e rios perenes na sua área de abrangência.

4.1.1 Cristalino

O BFI_{máx} identificado pelo método do filtro inverso de Collischonn e Fan (2013) para a estação fluviométrica Poço Fundo (84100000) foi de 0,656, ou seja, esse valor indica que, em média, 65,60% da vazão observada da série histórica dessa estação é proveniente da descarga de aquíferos. A separação do hidrograma pelo método do filtro de Eckhardt (2005) mostra que o valor máximo da média anual do BFI encontrado para a estação Poço Fundo foi de 0,686 e o valor mínimo de 0,542 (Figura 56), representando uma moderada amplitude de 0,144 e, portanto, apresenta uma certa regularidade das vazões mínimas e com uma tendência linear de ascensão. Observa-se que no comparativo com os demais domínios hidrogeológicos (Figura 55), a bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino é a que possui melhor disponibilidade de escoamento de base, com os maiores valores de BFI, e, portanto, com uma contribuição subterrânea elevada aos rios.

Figura 56 – BFI anual médio e precipitação total anual para a Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino.



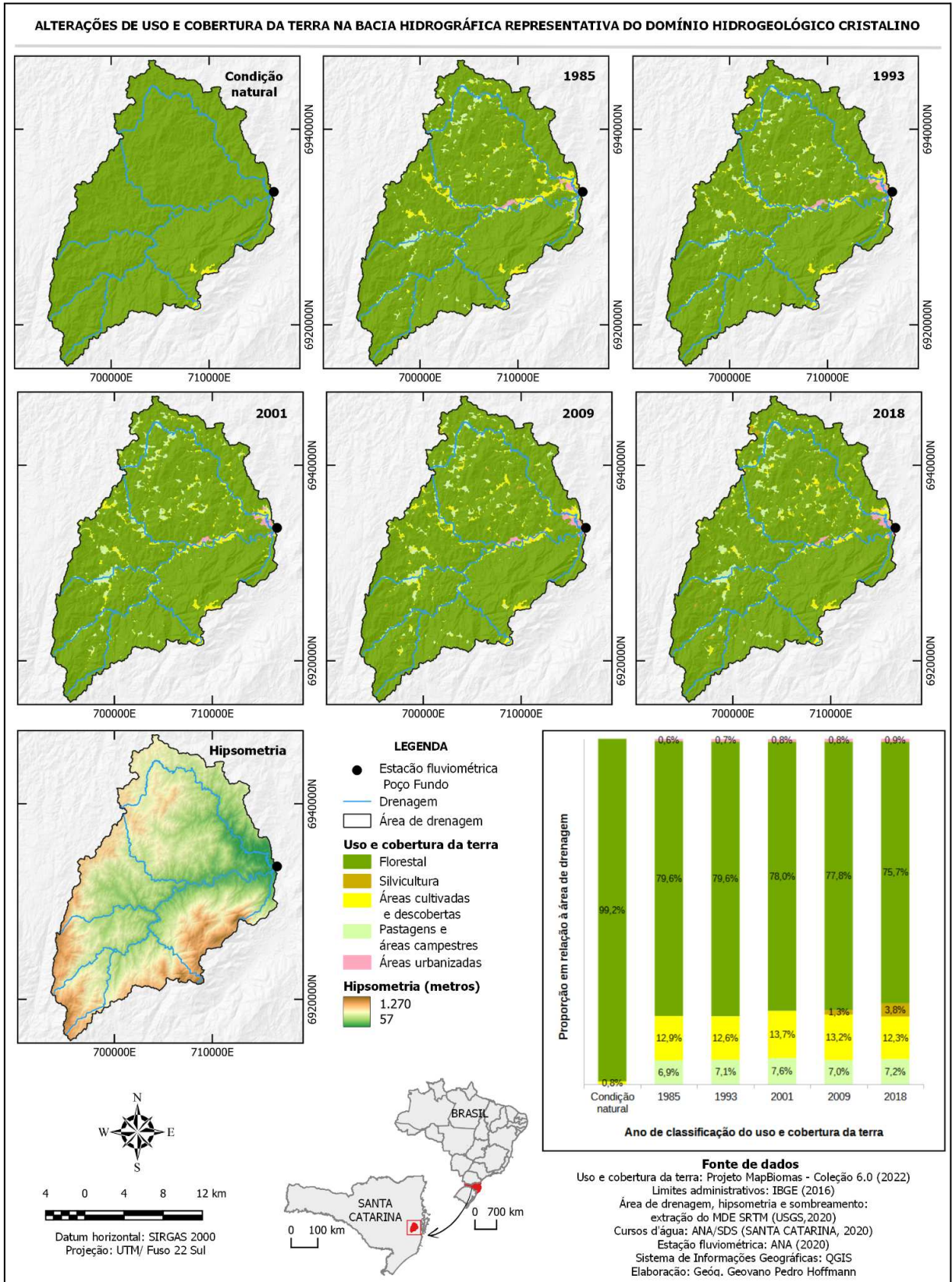
Fonte: Elaboração própria.

A média da precipitação total anual dessa bacia hidrográfica representativa é de 1403 mm/ano, sendo a menor dentre as bacias hidrográficas representativas. A precipitação total anual (Figura 56) oscilou consideravelmente entre 310 mm (em 2004) e 2840 mm (em 1983). A tendência linear da precipitação é de aumento para o período entre 1981 e 2018, acompanhando a tendência linear do BFI anual médio.

Na sua totalidade, a oscilação do BFI anual no domínio Cristalino é quase constante ao longo do tempo. Ainda que os aquíferos formados por rochas magmáticas e metamórficas sejam conhecidos por serem pouco produtivos, os elevados valores de BFI para a bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino expressam o papel do manto de intemperismo no armazenamento e na descarga subterrânea. A melhor regularidade das vazões é um indicio de que, dentre os diferentes domínios hidrogeológicos avaliados, o armazenamento subterrâneo do Cristalino é um dos mais estáveis temporalmente, o que garante um melhor enfrentamento da escassez hídrica durante os períodos de estiagem pela disponibilidade de um escoamento de base mais abundante. Essas informações também são evidenciadas pelo valor da constante de recessão (a), de 0,980, que sinaliza um elevado armazenamento, e pelo índice de recessão (k), de 59,71 dias/log, o mais longo dentre as estações das bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos.

Observando-se a Figura 57, o papel do manto de intemperismo para a geração do escoamento de base nessas áreas de embasamento cristalino, com horizontes pedológicos, sobretudo argilosos, que dificultariam a recarga de águas, é complementado pela cobertura florestal, dominante na bacia hidrográfica representativa, que possibilita a retenção da precipitação. Comparativamente à condição natural simulada (constituída por florestas e áreas descobertas de afloramentos rochosos), houve baixa modificação antropogênica, restrita às poucas áreas de menor declividade nos cenários entre 1985 e 2018, onde ocorrem áreas cultivadas relacionadas à olericultura e à pecuária bovina. Nesse período, houve perda da área de florestas (de 79,6% para 75,7%), especialmente pelo aumento das áreas de silvicultura (de presença insignificante para até 3,8%) nos morros. As áreas cultivadas e a pecuária praticamente mantiveram a mesma proporção em área.

Figura 57 – Alterações de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino.



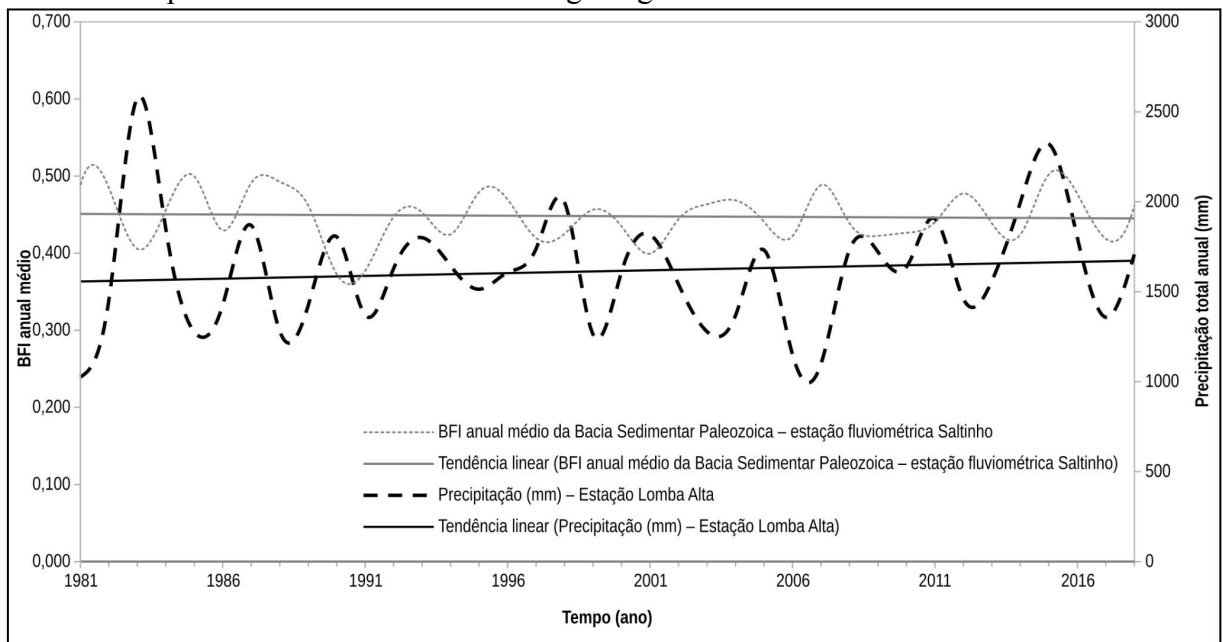
Fonte: Elaboração própria.

Em suma, apesar da bacia hidrográfica representativa do Cristalino conter uma litologia considerada tipicamente impermeável na literatura científica, a combinação com um clima úmido e a presença da cobertura florestal favorecem um amplo armazenamento pelo desenvolvimento do manto de intemperismo. Esse fato leva a crer que nos momentos de maior demanda hídrica, a contribuição dos aquíferos ao escoamento de base é estável e duradoura, admitindo uma curva de recessão de quase dois meses, conforme o índice de recessão (k) estimado.

4.1.2 Bacia Sedimentar Paleozóica

O BFI_{máx} identificado pelo método do filtro inverso de Collischonn e Fan (2013) para a estação fluviométrica Saltinho (83105000) foi de 0,452. Esse valor indica que, em média, 45,20% da vazão observada da série histórica dessa estação é proveniente da descarga de aquíferos. A separação do hidrograma pelo método do filtro de Eckhardt (2005) mostra que o valor máximo da média anual do BFI encontrado para a estação Saltinho foi de 0,504 e o valor mínimo de 0,374 (Figura 58), o que representa uma baixa amplitude de 0,130, apresentando uma certa regularidade das vazões mínimas e com uma tendência linear de leve redução. A curva do BFI assemelha-se à curva da estação Vila Canoas (SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado), possivelmente pela proximidade espacial dos eventos de precipitação durante os momentos de recarga subterrânea. Observa-se que no comparativo com os demais domínios hidrogeológicos (Figura 55), a bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica é medianamente permeável quanto à disponibilidade de escoamento de base, com valores intermediários de BFI, e, portanto, com uma contribuição subterrânea nem muito alta e nem muito baixa.

Figura 58 – BFI anual médio e precipitação total anual para a Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.

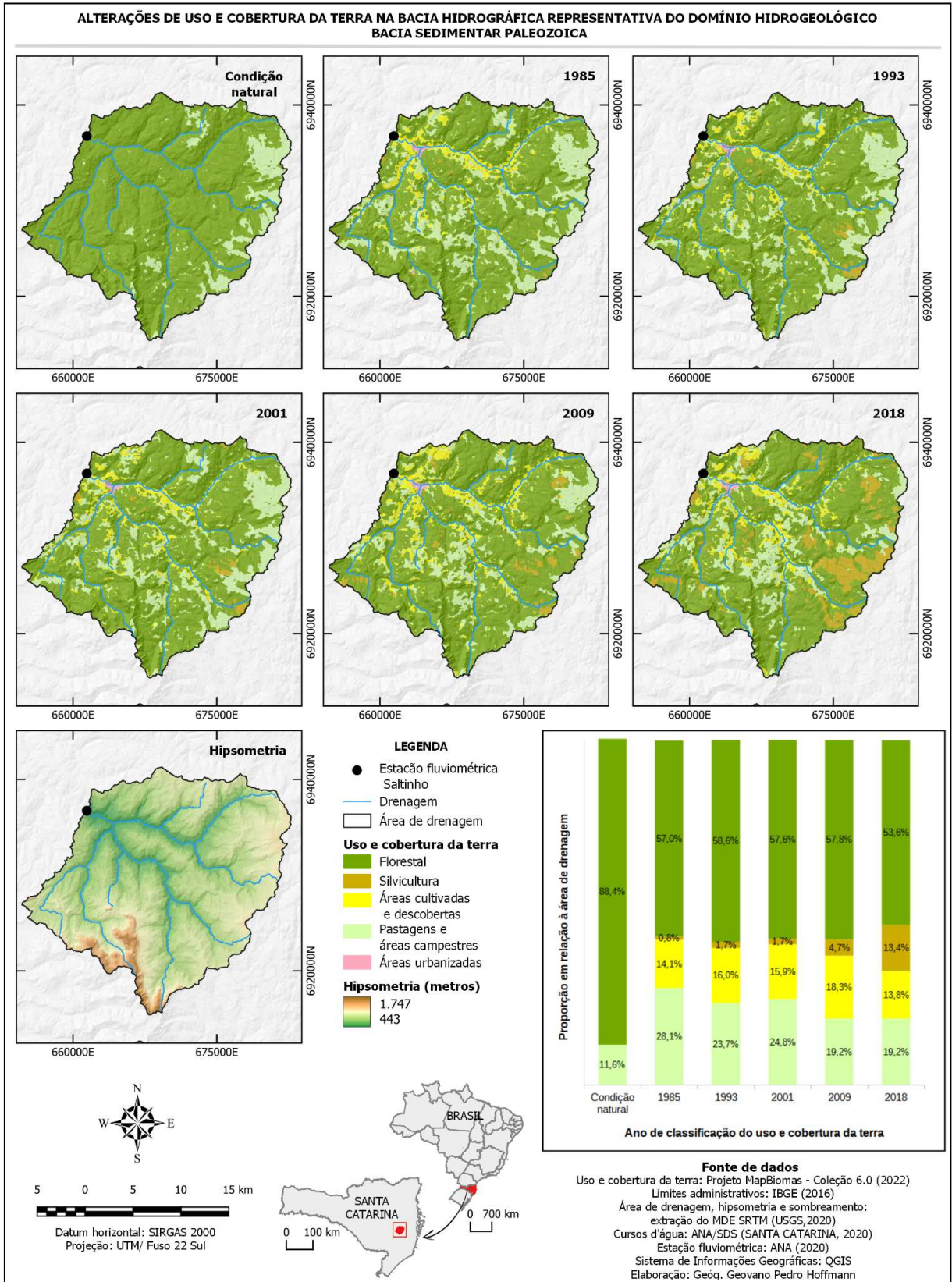


Fonte: Elaboração própria.

A média da precipitação total anual dessa bacia hidrográfica representativa (Figura 58) é de 1615 mm/ano. A precipitação total anual oscilou entre 1025 mm (em 1981) e 2577 mm (em 1983). A tendência linear da precipitação é de aumento para o período entre 1981 e 2018. Nota-se que a tendência linear do BFI anual médio seguiu um comportamento oposto ao da precipitação total anual, passando possivelmente a haver menos recarga e maior produção de escoamento superficial direto, seja pela influência da modificação do uso e cobertura da terra ou da extração de águas para irrigação durante os períodos de estiagens.

Com relação às atividades antropogênicas (Figura 59), tratam-se de áreas cultivadas nos fundos de vale, das pastagens e das florestas nas encostas, e da silvicultura nos topos dos patamares. Comparativamente à condição natural simulada (florestas no fundo de vale e nas encostas e áreas campestres nos topos dos patamares), houve intensa modificação antropogênica. Entre 1985 e 2018, houve perda das áreas florestais (de 57,0% para 53,6%) e redução das áreas cultivadas (de 14,1% para 13,8%) e das pastagens e áreas campestres (de 28,1% para 19,2%). Todavia, houve uma expansão da silvicultura (de 0,8% para 13,4%), especialmente sobre as áreas campestres dos topos dos patamares.

Figura 59 – Alterações de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.



Fonte: Elaboração própria.

A configuração do relevo em patamares propiciaria a recarga nos topos e nas encostas suaves já desgastadas e erodidas, à exceção das escarpas. É o caso, por exemplo, das unidades hidroestratigráficas Rio do Sul e Rio Bonito, com as maiores áreas de rochas aflorantes e funcionam como aquíferos em condição livre em boa parte dessa bacia hidrográfica representativa. A entrada de águas em aquíferos porosos de arenitos possibilita uma razoável descarga subterrânea que, nessa área, corresponde a quase metade das vazões observadas na estação Saltinho, com BFI no valor de 0,452. Por outro lado, a composição dos demais aquíferos por folhelhos, argilitos e siltitos, dispostos de forma intercalada na sequência da Bacia Sedimentar do Paraná, provoca o confinamento e o semiconfinamento das águas, de modo que as camadas funcionam, por vezes, como obstáculo à percolação das águas subterrâneas (aquicludes).

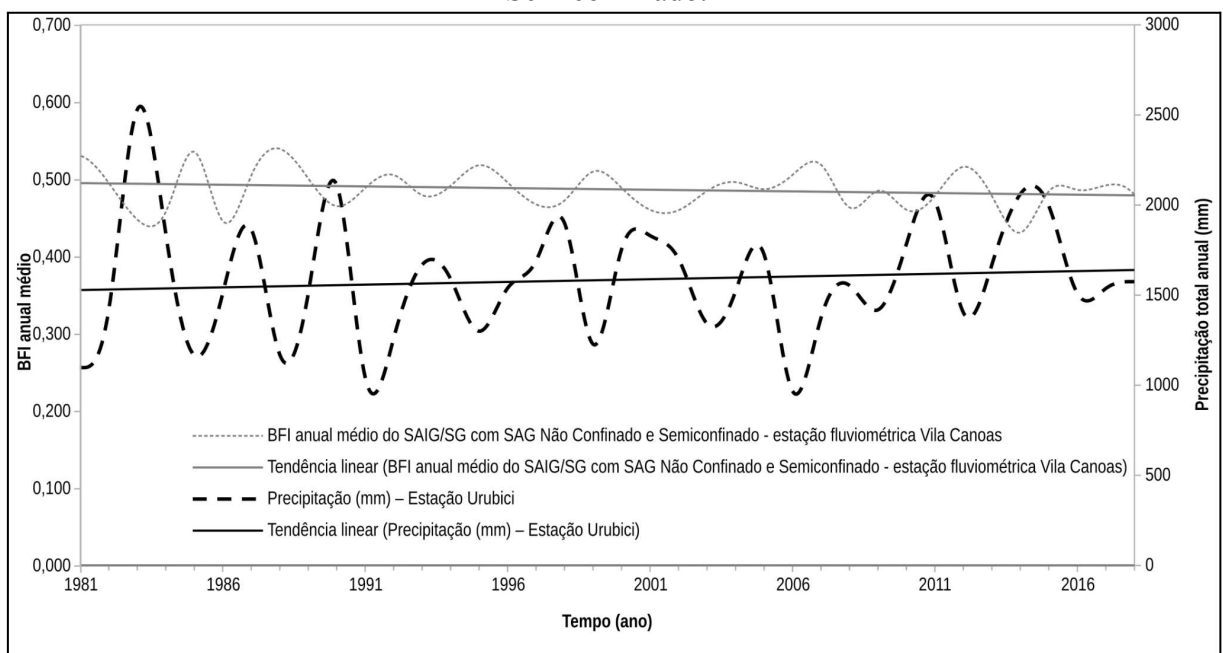
De modo geral, é possível que os solos argilosos sobrepostos aos aquíferos acarretem respostas rápidas de descarga subterrânea pela menor retenção de água que compõem os fluxos de base. Além disso, o relevo em patamares pode estar impedindo que se formem reservas subterrâneas mais abundantes, uma vez que as águas de recarga são direcionadas às nascentes no fundo dos vales em um trajeto mais curto pelo fato das vertentes serem mais íngremes. Isso é evidenciado pela constante de recessão (a), de 0,966, e pelo índice de recessão (k), de 26,98 dias/ciclo log, que apontam para um baixo armazenamento e um rápido esgotamento do escoamento de base, resultando em uma relativa quantidade de água disponível superficialmente nos momentos de secas, mas que perdura por pouco tempo, aproximadamente menos de um mês.

4.1.3 SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado

O BFI_{máx} identificado pelo método do filtro inverso de Collischonn e Fan (2013) para a estação fluviométrica Vila Canoas (71200000) foi de 0,480, ou seja, esse valor indica que, em média, 48,0% da vazão observada da série histórica dessa estação é proveniente da liberação de águas dos aquíferos. A separação do hidrograma pelo método do filtro de Eckhardt (2005) mostra que o valor máximo da média anual do BFI encontrado para a estação Vila Canoas foi de 0,540 e o valor mínimo de 0,432 (Figura 60), representando uma baixa amplitude de 0,108, a menor dentre as bacias hidrográficas representativas e um indicativo de estabilidade no fornecimento de águas aos rios, com tendência linear de redução para o

período entre 1981 e 2018. É, portanto, uma das bacias hidrográficas representativas mais permeáveis quanto à disponibilidade do escoamento de base (Figura 55), ficando atrás apenas da bacia hidrográfica representativa do Cristalino (estação fluviométrica Poço Fundo) em termos de contribuição subterrânea. A curva do BFI assemelha-se à curva da estação Saltinho (Bacia Sedimentar Paleozoica), possivelmente pela proximidade espacial dos eventos de precipitação durante os momentos de recarga.

Figura 60 – BFI anual médio e precipitação total anual para a Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado.



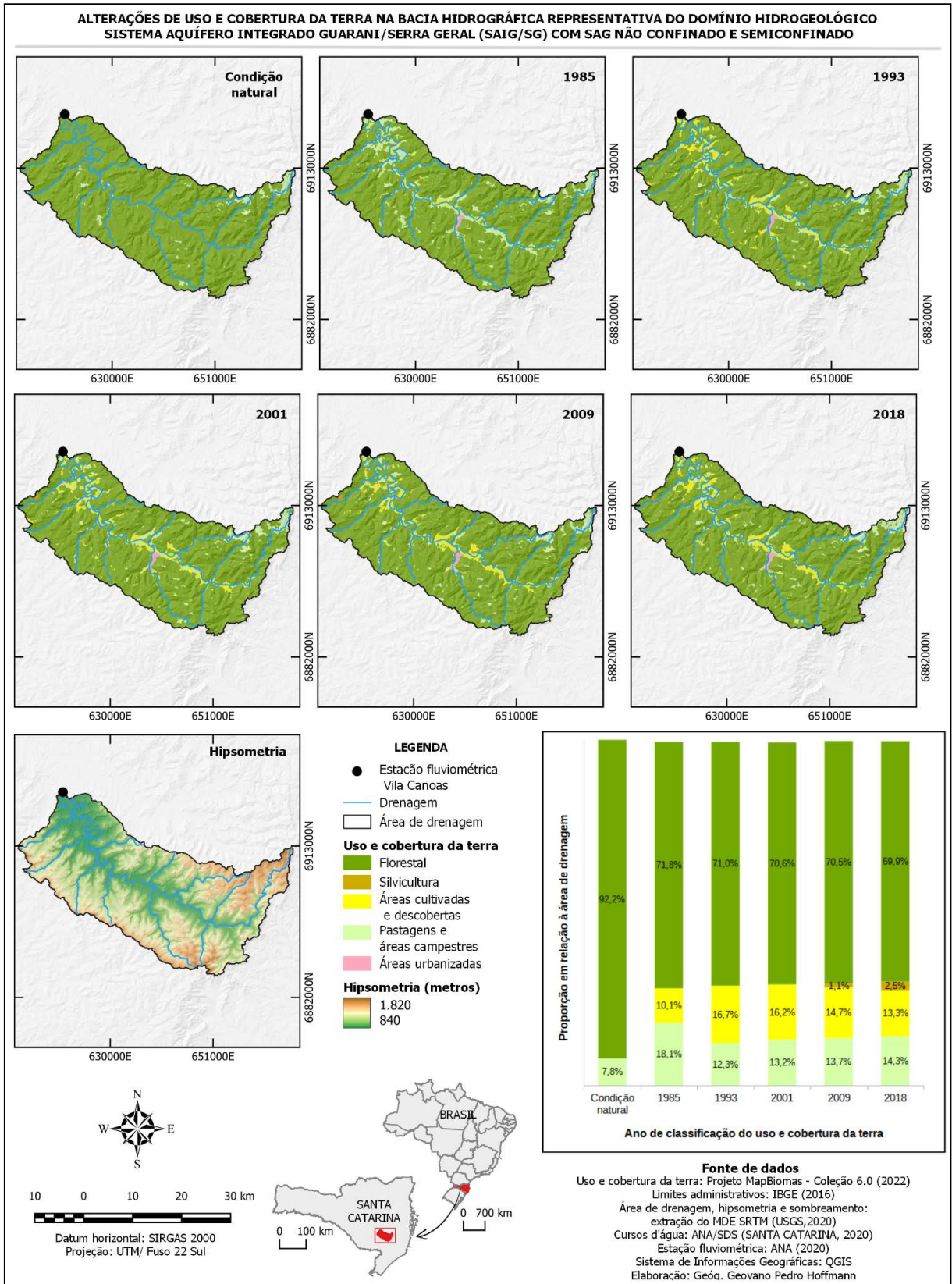
Fonte: Elaboração própria.

A média da precipitação total anual dessa bacia hidrográfica representativa (Figura 60) é de 1584 mm/ano, a segunda menor média dentre as bacias hidrográficas representativas. A precipitação total anual oscilou entre 968 mm (em 2006) e 2530 mm (em 1983). A tendência linear da precipitação é de aumento para o período entre 1981 e 2018. Nota-se que a tendência linear do BFI anual médio seguiu um comportamento oposto ao da precipitação total anual para esse período, passando possivelmente a haver menos recarga e maior produção de escoamento superficial direto.

Grande parte da área da bacia hidrográfica representativa é coberta por florestas nas encostas, enquanto na planície há áreas cultivadas e pastagens (Figura 61). Comparativamente à condição natural simulada (florestas na planície e encostas e áreas campestres no topo do

Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai), houve pouca modificação antropogênica nos cenários entre 1985 e 2018, mas que pode ter condicionado uma piora nas condições de recarga subterrânea. Nesse período, houve aumento das áreas cultivadas (de 10,1% para 13,3%) e de silvicultura (de proporção insignificante para 2,5%) em substituição às pastagens e áreas campestres (de 18,1% para 14,3%) e de florestas (de 71,8% para 69,9%).

Figura 61 – Alterações de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Não Confinado e Semiconfinado.



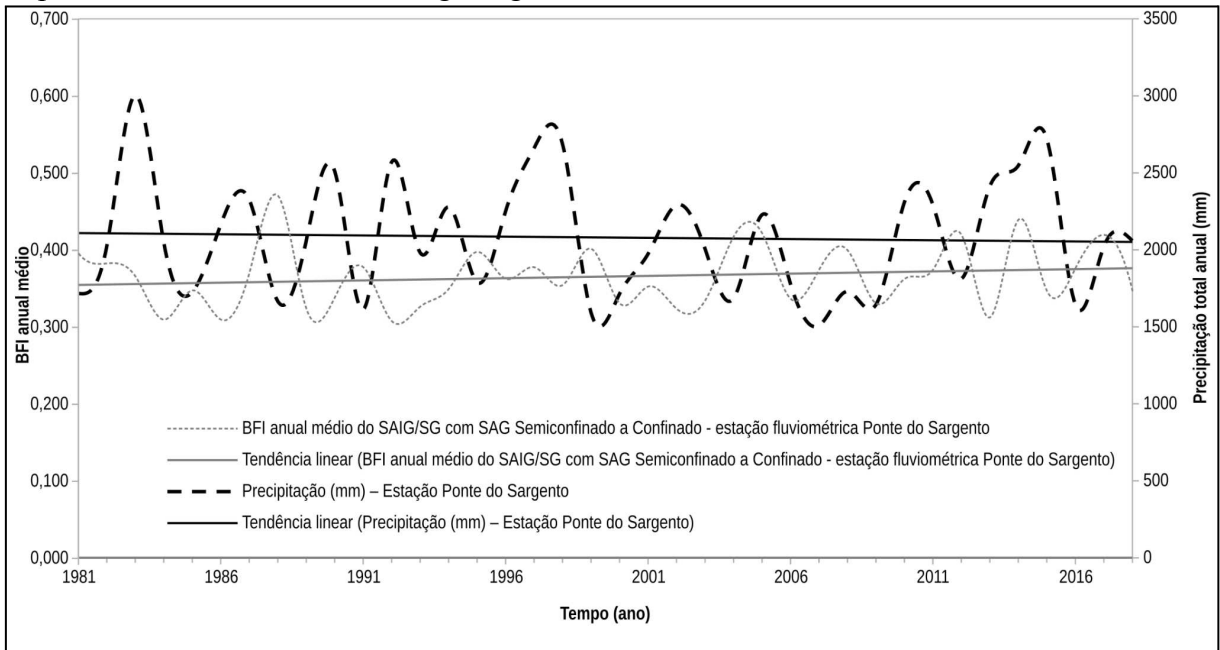
Fonte: Elaboração própria.

As unidades hidroestratigráficas que constituem o fundo de vale e parte das encostas do vale do Rio Canoas nessa bacia hidrográfica representativa pertencem à sequência de rochas da Bacia Sedimentar do Paraná. São formadas por argilitos, siltitos, folhelhos, assim como por arenitos vinculados a essas litologias, assinalando que elas tenham pouca efetividade na percolação das águas subterrâneas. Dessa maneira, o papel de recarga, armazenamento e liberação de águas aos rios em nascentes se deve à configuração do SAIG/SG nessa bacia hidrográfica representativa, situado no topo da sequência sedimentar e ao longo dos divisores de águas, com a recarga preferencialmente a partir dos neossolos litólicos. Em função disso, as unidades hidroestratigráficas Rio do Rasto e Teresina são os locais preferenciais de descarga do fluxo de base, considerando-se a altitude inferior dessas unidades hidroestratigráficas com base na projeção da superfície potenciométrica do SAIG/SG. Durante os longos períodos secos, as vazões permanecem, confirmado através do elevado índice de recessão (k), de 41,24 dias por ciclo/log, e do alto armazenamento verificado pelo coeficiente de recessão (a), de 0,975, quando comparado com as demais bacias hidrográficas representativas (Figura 55), estando atrás apenas da estação Poço Fundo (Cristalino).

4.1.4 SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado

O BFI_{máx} identificado pelo método do filtro inverso de Collischonn e Fan (2013) para a estação fluviométrica Ponte do Sargento (74320000) foi de 0,311. Ou seja, esse valor indica que, em média, 31,1% da vazão observada da série histórica dessa estação é proveniente da liberação de águas dos aquíferos. A separação do hidrograma pelo método do filtro de Eckhardt (2005) mostra que o valor máximo da média anual do BFI encontrado para a estação Ponte do Sargento foi de 0,471 e o valor mínimo de 0,308 (Figura 62), representando uma moderada amplitude de 0,163, com uma certa inconstância das vazões mínimas, porém com uma tendência linear de aumento. É uma das bacias hidrográficas representativas mais impermeáveis quanto à disponibilidade do escoamento de base (Figura 55), ficando atrás apenas da bacia hidrográfica representativa dos Depósitos Cenozoicos (estação fluviométrica Ermo) quanto à contribuição subterrânea, da qual tem uma oscilação semelhante da curva do BFI.

Figura 62 – BFI anual médio e precipitação total anual para a Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.

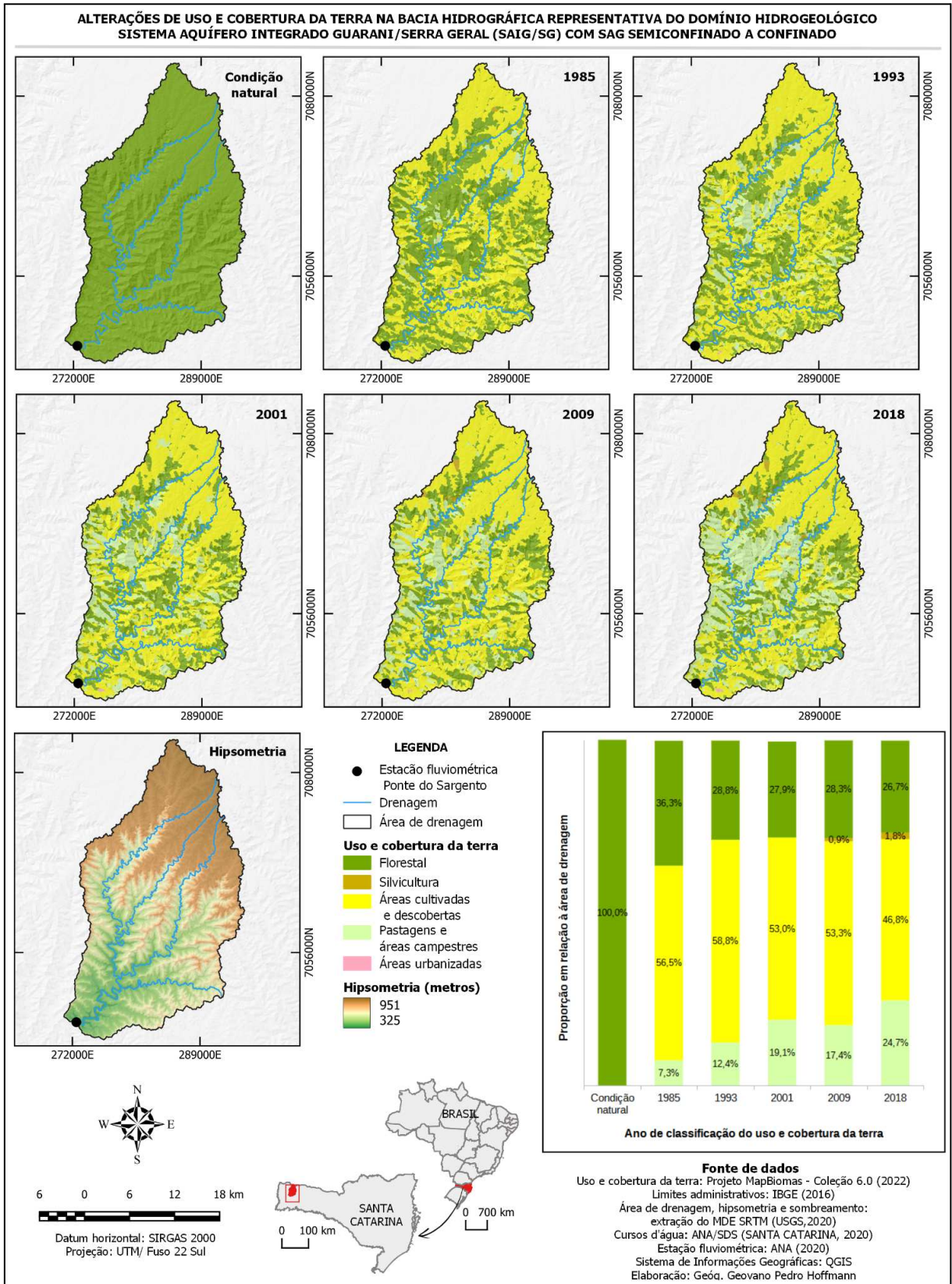


Fonte: Elaboração própria.

A média da precipitação total anual dessa bacia hidrográfica representativa é de 2080 mm/ano, a segunda média dentre as bacias hidrográficas representativas. A precipitação total anual (Figura 62) oscilou entre 1508 mm (em 2007) e 3004 mm (em 1983). A tendência linear da precipitação é de redução para o período entre 1981 e 2018. Nota-se que a tendência linear do BFI anual médio seguiu um comportamento oposto ao da precipitação total anual para esse período, ou seja, de aumento, passando possivelmente a haver mais recarga subterrânea pela mudança de cobertura da terra, presumivelmente pela substituição de parte das áreas cultivadas e descobertas pela atividade de pecuária na área do Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai.

Essa bacia hidrográfica representativa foi intensamente modificada pelas ações antropogênicas (Figura 63), quando comparados os cenários entre 1985 e 2018 com o cenário de condição natural simulada (formada inteiramente por florestas). Nesse período, houve perdas de áreas florestais (de 36,3% para 26,7%) e das áreas cultivadas (de 56,5% para 46,8%) que deram lugar à expansão das pastagens (7,3% para 24,7%), principalmente onde se localiza o Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai. Quando comparada com as demais bacias hidrográficas representativas, essa foi a que apresentou a maior proporção em área para diferentes usos que não fossem para florestas.

Figura 63 – Alterações de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Semiconfinado a Confinado.



Fonte: Elaboração própria.

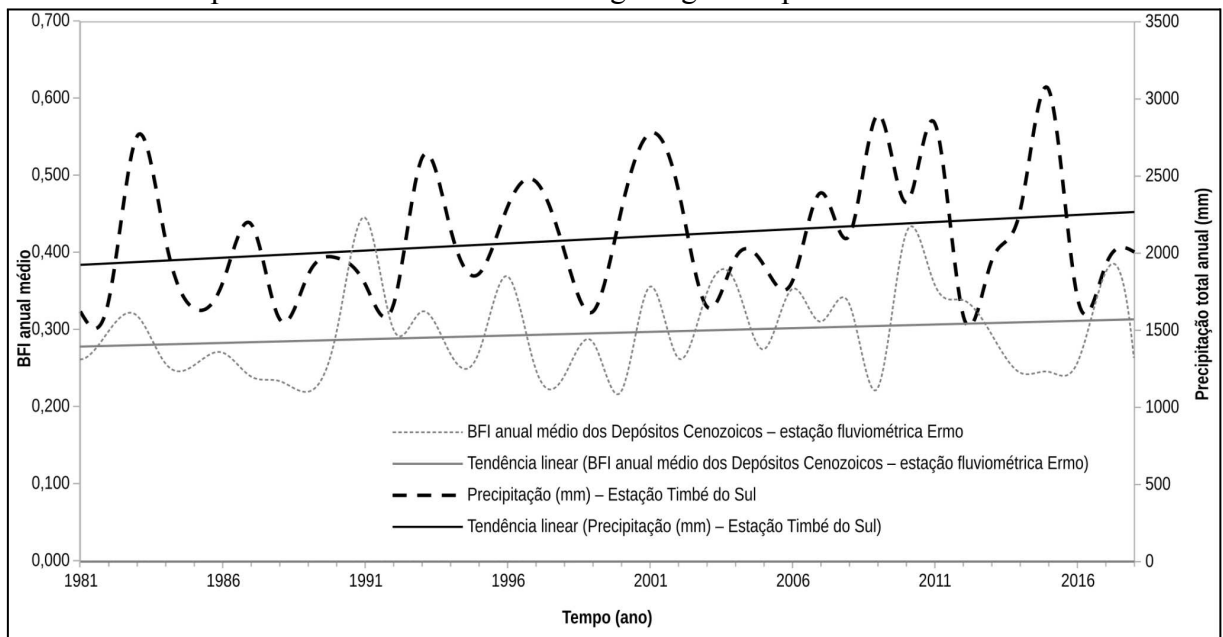
Nesse sentido, toda a área dessa bacia hidrográfica representativa apresenta solos muito argilosos que dificultam a recarga de águas sem a presença de áreas florestais. A porção que melhor favorece a infiltração de águas é o Planalto de Capanema, situado em uma posição potenciométrica superior na bacia hidrográfica representativa e onde a declividade é baixa e o relevo quase plano. Em contrapartida, na área do Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai, a presença de interflúvios estreitos e de encostas em patamares com alta declividade dificultam a recarga subterrânea, mas a tornam mais propícia à descarga de águas oriundas do Planalto de Capanema.

Esperava-se que as vazões de base fossem próximas da metade do fluxo total pelo fato de que se trata de um domínio hidrogeológico com aquíferos fraturados e de solos profundos. O escoamento de base permanece pouco tempo nos cursos d'água e deve se manter com reduzido volume nos períodos de maior necessidade hídrica, visto que o coeficiente de recessão (a), de 0,963, é o menor dentre as bacias hidrográficas representativas e corrobora para um índice de recessão (k), de 24,37 dias por ciclo/log, também baixo. Esses dados são condizentes com a situação de severidade das frequentes estiagens nessa região do estado de Santa Catarina.

4.1.5 Depósitos Cenozoicos

O BFI_{máx} identificado pelo método do filtro inverso de Collischonn e Fan (2013) para a estação fluviométrica Ermo (84949800) foi de 0,224, ou seja, esse valor indica que, em média, 22,40% da vazão observada da série histórica dessa estação é proveniente da descarga de aquíferos. A separação do hidrograma pelo método do filtro de Eckhardt (2005) mostra que o valor máximo da média anual do BFI encontrado para a estação Ermo foi de 0,445 e o valor mínimo foi de 0,219 (Figura 64), o que representa uma amplitude de 0,226, a maior dentre as estações fluviométricas avaliadas no presente trabalho, revelando uma inconstância na regularidade das vazões anuais, porém com tendência linear de ascensão. Observa-se que no comparativo com os demais domínios hidrogeológicos (Figura 55), essa bacia hidrográfica representativa dos Depósitos Cenozoicos seria a mais impermeável em termos de disponibilidade de escoamento de base (Figura 55), com os mais baixos valores de BFI, e, portanto, com uma contribuição subterrânea pequena.

Figura 64 – BFI anual médio e precipitação total anual para a Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.



Fonte: Elaboração própria.

A média da precipitação total anual dessa bacia hidrográfica representativa é de 2096 mm/ano, sendo o maior valor dentre as bacias hidrográficas representativas. A precipitação total anual (Figura 64) oscilou entre 1571 mm (em 1988) e 3059 mm (em 2015). A tendência linear da precipitação é de aumento para o período entre 1981 e 2018, acompanhando a tendência linear do BFI anual médio.

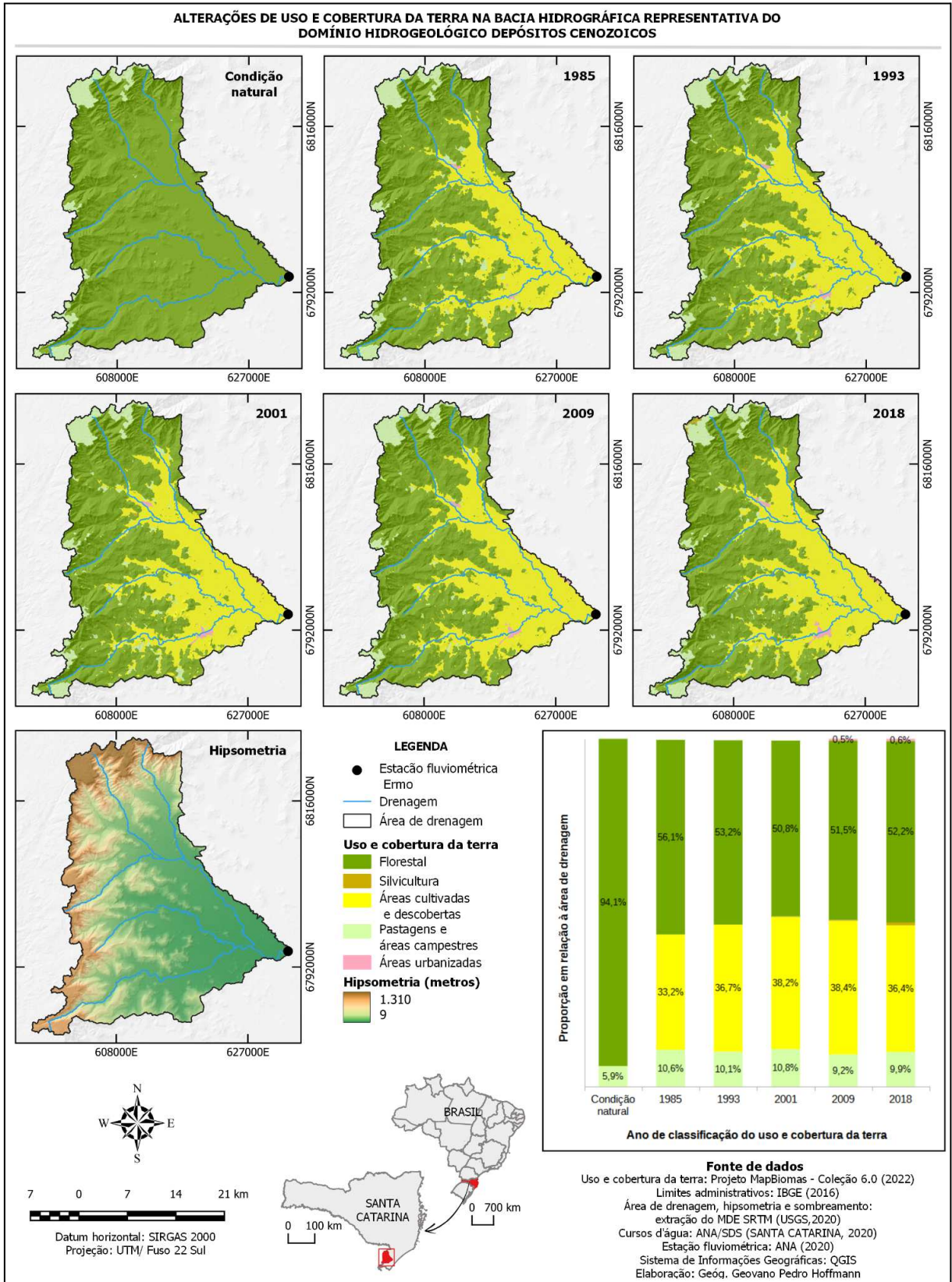
A condição das águas subterrâneas nessa bacia hidrográfica representativa se reflete na rede drenagem esparsa, onde estão os Depósitos Cenozoicos, tendo em vista que para haver nascentes em planícies são necessárias diferenças altimétricas e potenciométricas. A atuação dos processos de acumulação de sedimentos removidos das encostas leva a crer que se tem uma condição de rápida e constante saturação dos aquíferos locais quando há entrada de águas na bacia hidrográfica representativa, como evidenciado por Krebs (2004) pela existência de um nível estático junto à superfície. Assim, uma situação que pode estar ocorrendo é a propensão da precipitação estar sendo mais convertida em escoamento superficial do que em recarga subterrânea.

Em razão das litologias situadas nas encostas serem de reduzida condutividade hidráulica, o escoamento de base suprido a partir delas também é baixo. Aliado a isso, há a disposição estrutural das rochas nas encostas que comumente formam escarpas na borda leste da Bacia Sedimentar Paleozoica do Paraná nessa região, que não favorecem a recarga e o

armazenamento (KREBS, 2004). Isso implicaria em um controle dominante por parte dos sedimentos cenozoicos das várzeas (isto é, pelos depósitos colúvio-aluvionares e depósitos aluvionares), permitindo maior capacidade de recarga. Além disso, a condição do relevo em modelado de acumulação e de rápidas perdas pela maior condutividade hidráulica da litologia facilitariam maiores perdas de armazenamento em um tempo curto e é o que o comportamento do BFI aponta. Inclusive, o coeficiente de recessão (a) obtido é um dos menores dentre as bacias hidrográficas representativas (0,969), assinalando a baixa capacidade de retenção de águas pelos aquíferos. Uma maior amplitude do BFI anual é um indício de que as águas subterrâneas não são mantidas durante um longo tempo nos aquíferos para serem descarregadas nas bacias hidrográficas na forma de vazões de base nos momentos de maior necessidade hídrica.

A rizicultura é a atividade dominante das áreas cultivadas, desenvolvidas sobre a planície formada pelos Depósitos Cenozoicos (Figura 65). As encostas da Serra Geral são cobertas, em grande parte, pelas florestas, e os planaltos apresentam áreas campestres que podem conter a atividade de pecuária. Comparativamente à condição natural simulada (florestas na planície e encostas e áreas campestres no planalto), houve uma acentuada modificação de cobertura dos solos onde estão situados os Depósitos Cenozoicos. Entre 1985 e 2018, houve perdas de áreas de florestas (de 56,1% para 52,2%) e de pastagens e áreas campestres nas planícies (10,6% para 9,9%), principalmente em razão do avanço das áreas cultivadas (de 33,2% para 36,4%).

Figura 65 – Alterações de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.



Fonte: Elaboração própria.

Em suma, o quadro da bacia hidrográfica representativa dos Depósitos Cenozoicos leva a crer que nos momentos de maior demanda hídrica, a contribuição do fluxo de base é baixa, como indicado pelos valores do BFI anual médio. Possivelmente, essa bacia hidrográfica representativa apresenta baixa regularidade natural da curva de vazão. Ou seja, grande parcela do volume de águas que entra na bacia hidrográfica representativa escoar durante os momentos de cheia. Dessa forma, o armazenamento subterrâneo que supre os cursos d'água durante os períodos mais longos de estiagem não é suficiente para manter as vazões mínimas de forma equivalente, refletindo em um índice de recessão (k) também baixo, de apenas 22,17 dias/log, não havendo uma permanência estável das vazões a longo prazo.

4.2 CENÁRIO BALIZADOR DO ESCOAMENTO DE BASE NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS DE DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS

A calibração do BFI médio global em um cenário de condição natural simulada por bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico envolveu os dados de VmES específica e global dos cenários observados de 1985, 1993, 2001, 2009 e 2018. Os resultados discutidos a partir daqui dizem respeito à inserção dos dados estimados para a condição natural simulada (VmES global e BFI médio global) ao rol de dados observados dessas mesmas variáveis. Os dados do BFI específico e do coeficiente de variação da VmES específica natural (CVmES), para obtenção do BFI médio global da condição natural simulada estão como Apêndice A, B, C, D e E do presente estudo, em razão da extensa quantidade de dados gerados.

No Quadro 29 são apresentados os anos aproximados de início de mudanças de cobertura da terra em cada bacia hidrográfica representativa. Aquelas dos domínios hidrogeológicos Depósitos Cenozoicos, Cristalino e Bacia Sedimentar Paleozoica tem registros de colonização desde a primeira metade do século XIX. Tardamente, as bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado e SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado tiveram a colonização registrada desde meados do século XIX até o início do século XX.

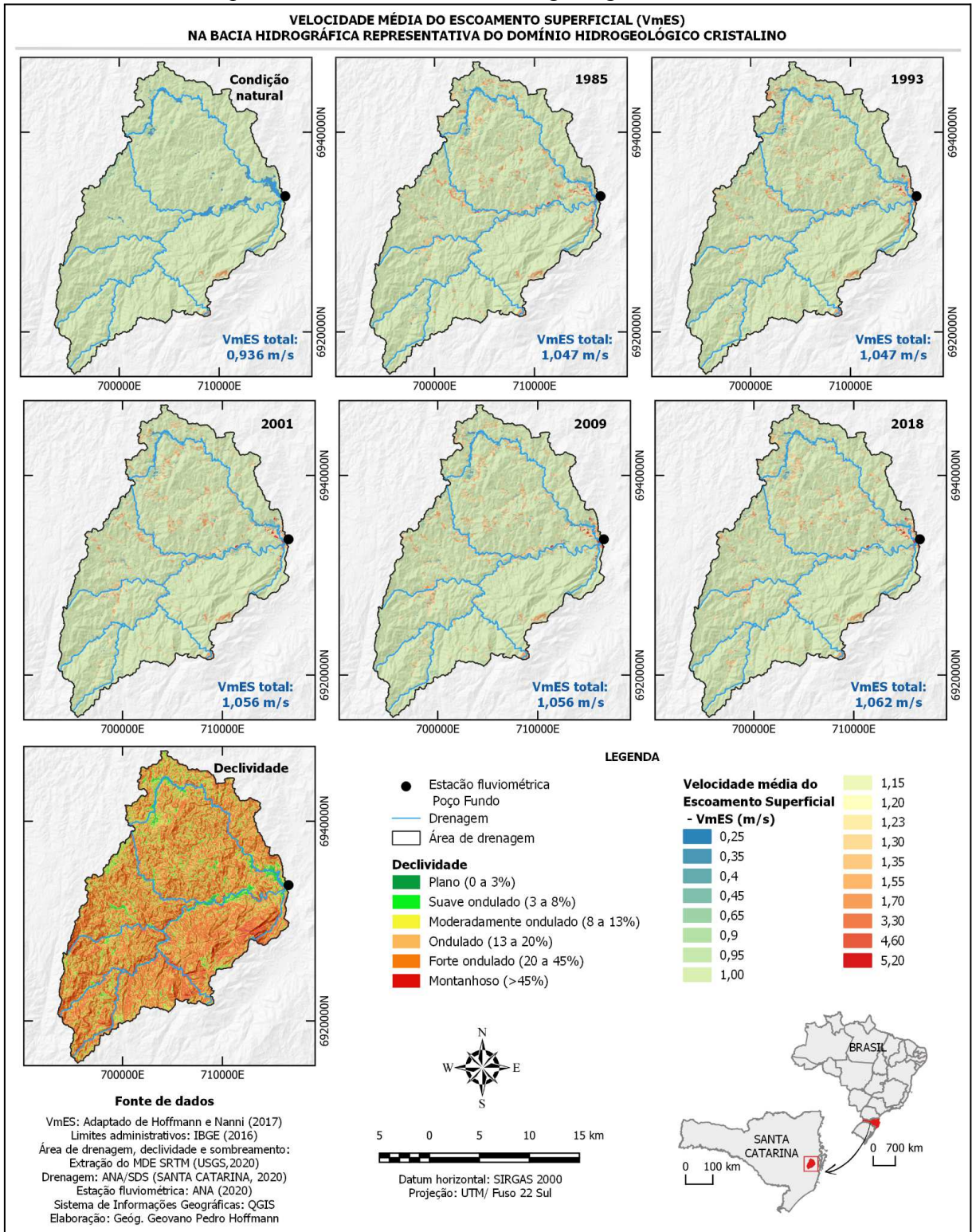
Quadro 29 – Ano aproximado da colonização dentre os municípios situados nas bacias hidrográficas representativas.

Bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico	Município com registro mais antigo de colonização	Ano aproximado
Cristalino	São Pedro de Alcântara	1829
Bacia Sedimentar Paleozoica	Alfredo Wagner	1840
SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado	Rio Rufino	1905
SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado	Campo Erê	1917
Depósitos Cenozoicos	Ermo	1848

Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Na condição natural simulada da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino (presumivelmente até o ano de 1829 - Quadro 29) nota-se que a VmES global natural (Figura 66) é a maior dentre as demais bacias hidrográficas representativas em função do relevo ter a característica de apresentar, predominantemente, encostas onduladas a fortemente onduladas, predispostas à geração de escoamento superficial direto. Entre 1985 e 2018, a VmES global dos cenários aumentou continuamente, porém, a uma taxa lenta, dispondo dos mesmos valores entre 1985 e 1993 e entre 2001 e 2009. Considerando apenas o período de dados observados, entre 1985 e 2018, nas poucas áreas planas dessa bacia hidrográfica representativa, houve o avanço das áreas urbanizadas (tons avermelhados de VmES próximos ao exutório). Tanto em áreas planas quanto nas encostas das Serras do Leste Catarinense, houve o abandono de algumas áreas de cultivo e de pastagens, promovendo o crescimento em área das florestas, mas que, proporcionalmente, foram compensadas pela manutenção da prática dessas atividades pela derrubada das florestas em outras áreas de serra dessa bacia hidrográfica representativa. Além disso, a introdução da silvicultura substituiu, especialmente, as áreas que até então eram de florestas em encostas.

Figura 66 – Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino.

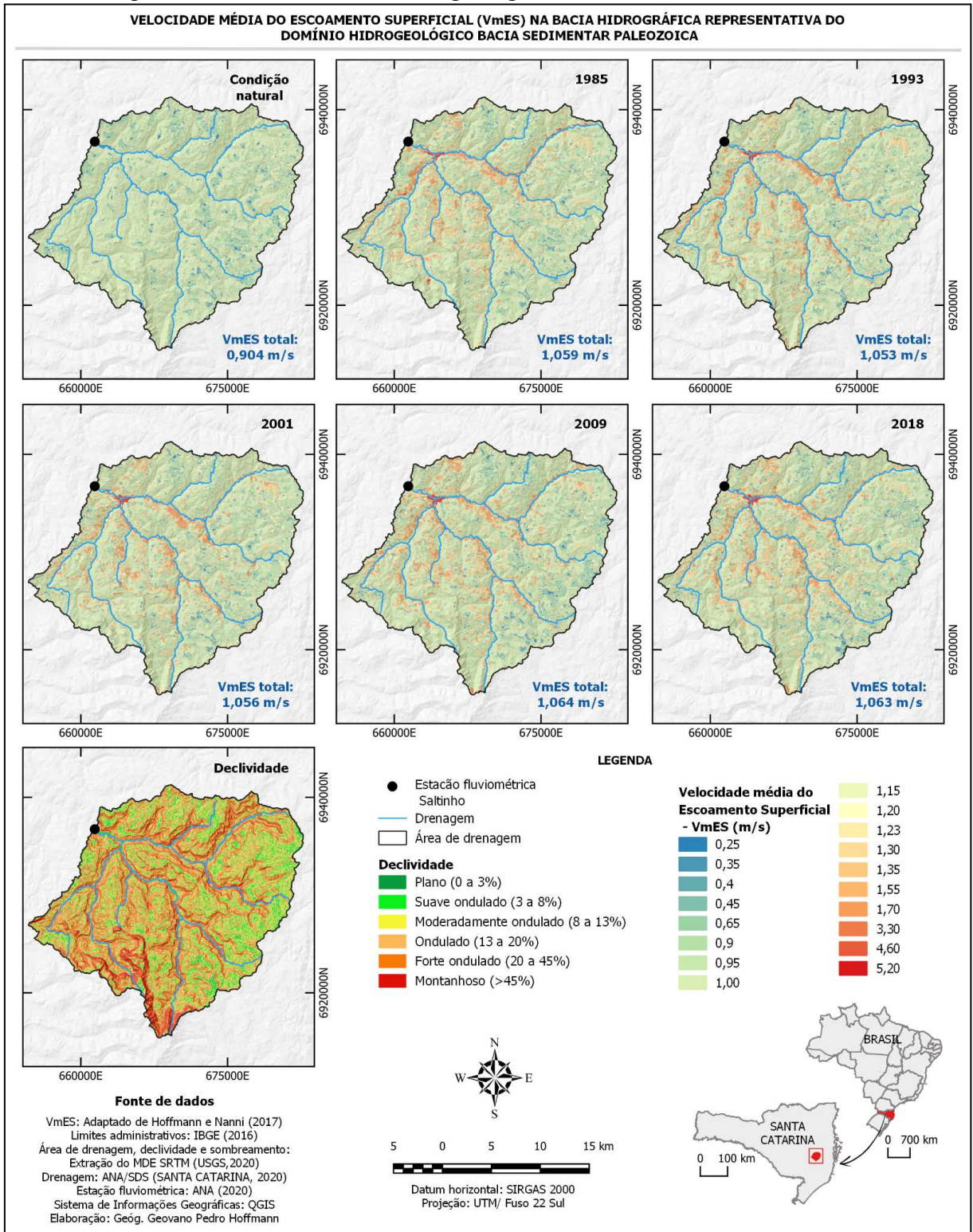


Fonte: Elaboração própria.

Assim como a bacia hidrográfica representativa dos domínios hidrogeológicos Cristalino e SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado, a bacia hidrográfica

representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica tem uma VmES global natural elevada (Figura 67) como condicionamento de um relevo suave ondulado a montanhoso da unidade geomorfológica Patamares do Alto Rio Itajaí (presumivelmente até o ano de 1840 - Quadro 29). Entre 1985 e 1993, a VmES global diminuiu pelo aumento das áreas florestais. No entanto, entre 1993 e 2018, houve perda de áreas florestais e de áreas de pastagens e campestres pelo considerável crescimento da silvicultura sobre as áreas topográficas mais altas e suavemente onduladas com essas coberturas. Da mesma maneira, as áreas cultivadas e de pastagens expandiram-se no médio curso, onde se encontram os degraus de relevo suave ondulado a forte ondulado dos Patamares do Alto Rio Itajaí, apesar de terem diminuído proporcionalmente em tamanho na bacia hidrográfica representativa.

Figura 67 – Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica.

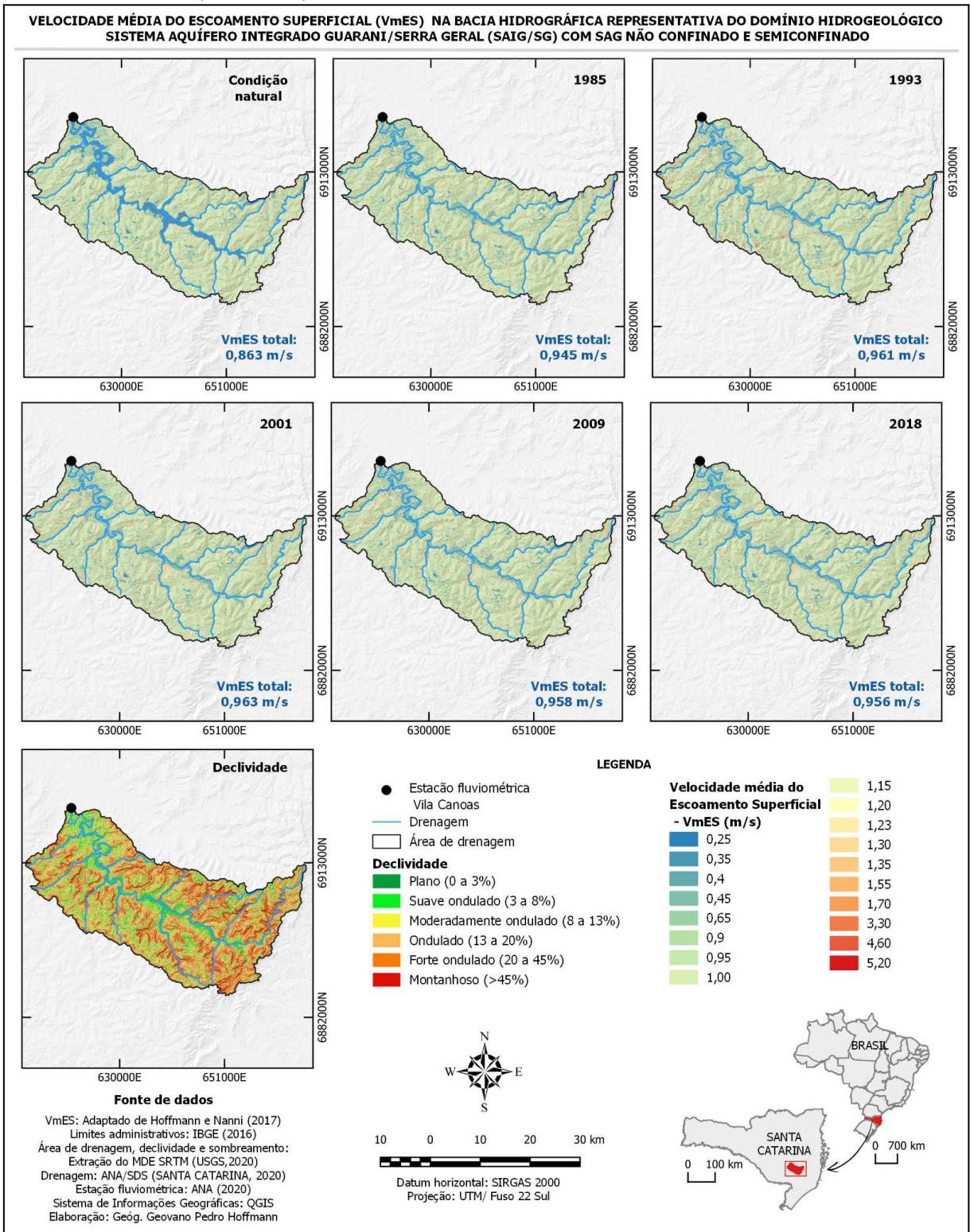


Fonte: Elaboração própria.

A bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado (Figura 68) apresenta a terceira maior VmES global de condição natural,

seguida das bacias hidrográficas representativas do Cristalino e Bacia Sedimentar Paleozoica, especialmente pelo fato do relevo predominante variar de suave ondulado a montanhoso (presumivelmente até o ano de 1905 - Quadro 29), áreas sensíveis à geração de escoamento superficial direto, e das áreas planas serem proporcionalmente restritas ao tamanho da área de drenagem. Entre 1985 e 2001, a VmES global aumentou por efeito da expansão das áreas cultivadas sobre as áreas de pastagens e campestres no baixo curso, constituído pelo Planalto de Lages, e no médio e alto curso, das unidades geomorfológicas Serra Geral e Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai. Entre 2001 e 2018, a VmES global apresentou redução das áreas cultivadas, principalmente no médio e alto curso, onde foram substituídas por pastagens e áreas campestres e a silvicultura.

Figura 68 – Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Não Confinado e Semiconfinado.

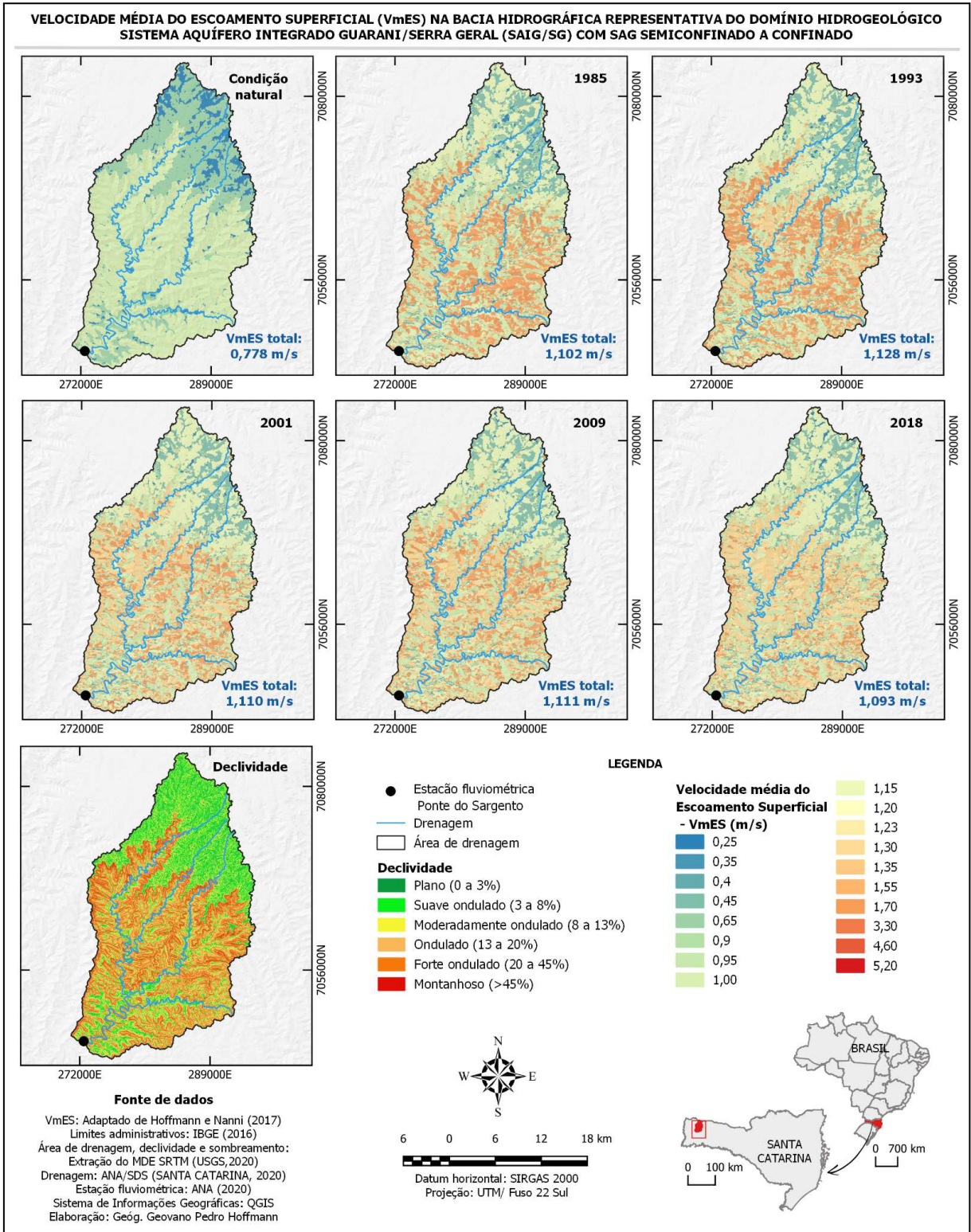


Fonte: Elaboração própria.

A bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado (Figura 69) tem a segunda menor VmES global para o cenário de condição natural

(presumivelmente até o ano de 1917 - Quadro 29), atrás apenas da bacia hidrográfica representativa dos Depósitos Cenozoicos. Isso se deve ao relevo, constituído, em boa parte, por áreas suavemente onduladas no baixo e alto curso, este último pertencente à unidade geomorfológica Planalto dos Campos Gerais, conhecida regionalmente como Serra da Fartura e Serra do Capanema, intercalado por um médio curso moderadamente ondulado a forte ondulado, da unidade geomorfológica Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai, com maior facilidade de produzir escoamento superficial direto. Entre 1995 e 1993, a VmES global aumentou com a perda de áreas florestais em detrimento das áreas cultivadas e das pastagens no médio curso, sendo visível a intensificação de tons alaranjados. Por outro lado, entre 1993 e 2018 a VmES global diminuiu pela substituição de áreas cultivadas pelas pastagens no médio curso, observando-se o abrandamento de tons alaranjados. Esse impacto na VmES global foi mais considerável, inclusive, que a perda de áreas florestais nativas pela prática da silvicultura.

Figura 69 – Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) com SAG Semiconfinado a Confinado.

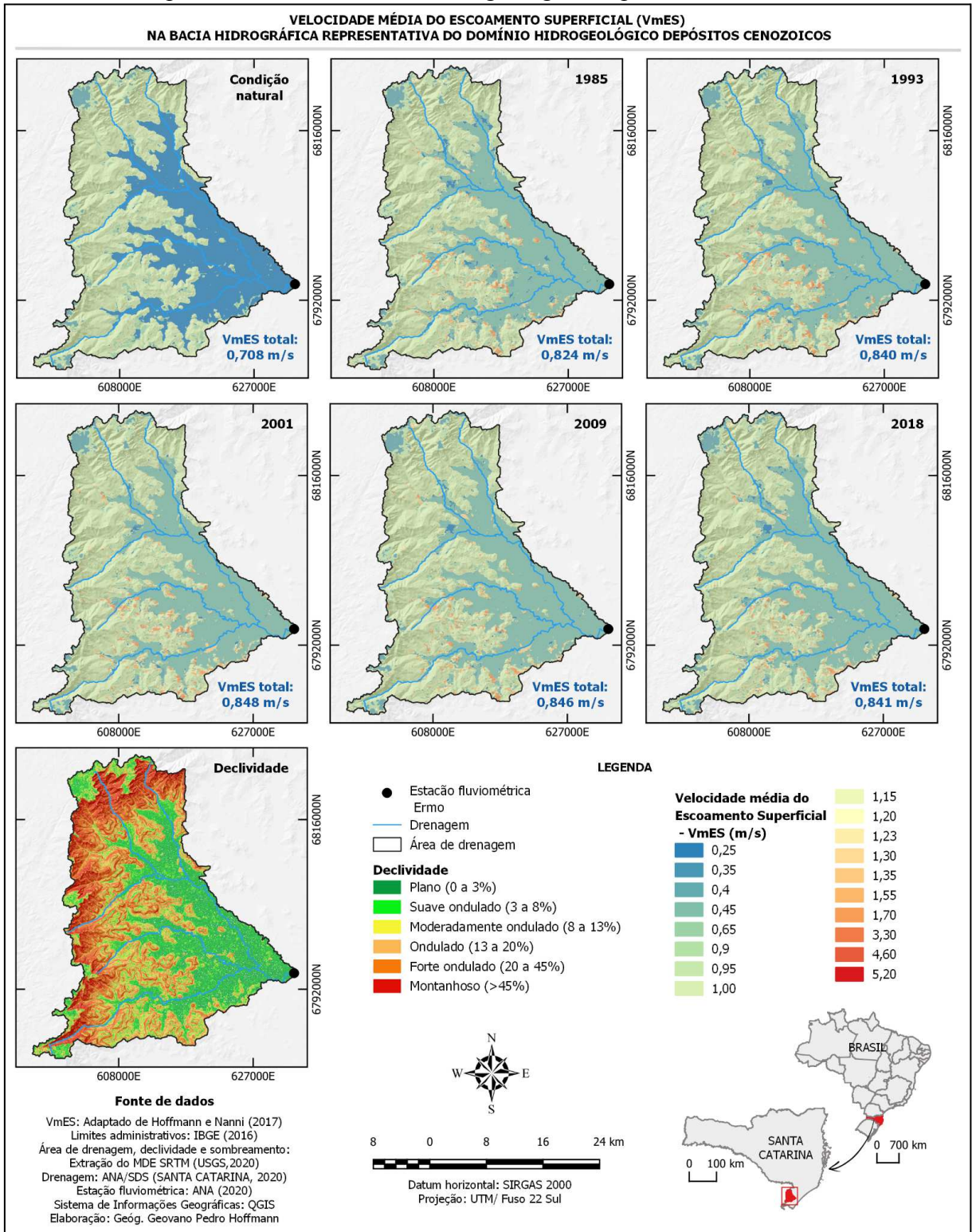


Fonte: Elaboração própria.

Observa-se na condição natural simulada (presumivelmente até o ano de 1848 - Quadro 29) da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos

Cenozoicos (Figura 70) que as áreas mais propensas à produção de escoamento superficial direto são as encostas das unidades geomorfológicas Serra Geral e dos Patamares da Serra Geral, predominantemente com relevo moderadamente ondulado a montanhoso, em tons de azul mais claros de VmES global. É a bacia hidrográfica representativa com a menor VmES global em condição natural, tendo em vista a maior presença de áreas planas (declividade entre 0 e 3%). Há uma evidente mudança de VmES no baixo curso, onde se encontram áreas planas de tom azul mais escuro, no cenário de condição natural simulada, para um tom mais claro, nos cenários observados (1985 a 2018). Isso está atrelado, principalmente, à substituição das áreas florestais das áreas úmidas pelas áreas cultivadas da atividade de rizicultura, identificadas a partir do cenário de 1985, as quais foram sendo espacialmente ampliadas, continuamente, até 2018. Percebe-se que a VmES global dessa bacia hidrográfica representativa aumentou também entre 1985 e 2001 como reflexo ao avanço das áreas cultivadas sobre o relevo suavemente ondulado a moderadamente ondulado dos Patamares da Serra Geral (áreas em tons alaranjados de VmES). A partir de 2001, a VmES global passou a diminuir até o cenário mais recente de 2018 em razão da redução das áreas cultivadas nos Patamares da Serra Geral, havendo uma retomada das florestas em áreas abandonadas, ou a substituição pelas pastagens, ou ainda, a introdução da silvicultura.

Figura 70 – Velocidade média do Escoamento Superficial (VmES) na Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos.



Fonte: Elaboração própria.

No que diz respeito ao cenário balizador de disponibilidade do escoamento de base das bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico, houve a aplicação da

Equação 25 para identificar o BFI médio global natural. O BFI médio global natural, da condição natural simulada (Tabela 12), está apresentado junto ao conjunto de valores de BFI médio global dos cenários antropogênicos de 1985, 1993, 2001, 2009 e 2018 para as bacias hidrográficas representativas do presente estudo.

Tabela 12 – BFI médio global estimado e BFI em condição natural para cada cenário de uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico.

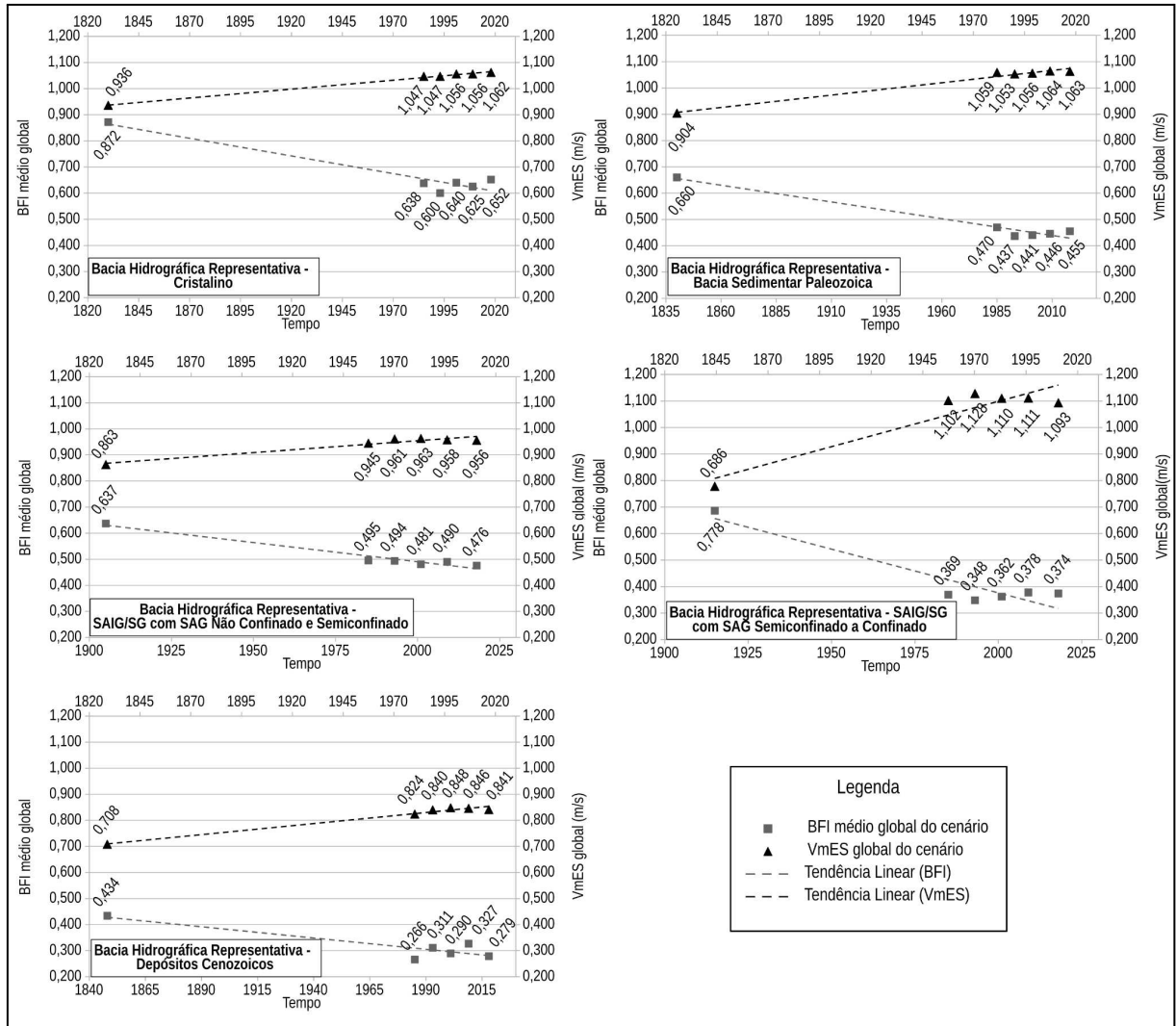
Bacia hidrográfica representativa	Cenário observado de uso e cobertura da terra	BFI médio global
Cristalino	Condição natural	0,872
	1985	0,638
	1993	0,600
	2001	0,640
	2009	0,625
	2018	0,652
Bacia Sedimentar Paleozoica	Condição natural	0,660
	1985	0,470
	1993	0,437
	2001	0,441
	2009	0,446
	2018	0,455
SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado	Condição natural	0,637
	1985	0,495
	1993	0,494
	2001	0,481
	2009	0,490
	2018	0,476
SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado	Condição natural	0,686
	1985	0,369
	1993	0,348
	2001	0,362
	2009	0,378
	2018	0,374
Depósitos Cenozoicos	Condição natural	0,434
	1985	0,266
	1993	0,311
	2001	0,290
	2009	0,327
	2018	0,279

Fonte: Elaboração própria.

Além do BFI médio global dos cenários observados e de condição natural simulada, na Figura 71 é apresentada a distribuição em ordem temporal dos dados de VmES global. Nas bacias hidrográficas representativas, a condição natural foi estipulada como sendo do momento anterior ao início dos desflorestamentos decorrentes da colonização do Estado de Santa Catarina (Quadro 29). Definiram-se essas décadas, na Figura 71, para efeito

comparativo entre as bacias hidrográficas representativas. Também foi traçada uma linha de tendência linear entre a condição natural simulada e os dados observados dos cenários de 1985, 1993, 2001, 2009 e 2018 para as variáveis VmES global e BFI médio global.

Figura 71 – Comportamento da Velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES) global, em m/s, e do Índice do Fluxo de base (BFI) médio global estimados para os cenários observados e de condição natural simulada de uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos de Santa Catarina.



Fonte: Elaboração própria

Aplicando a linha de tendência temporal para a VmES global e para o BFI médio global (Figura 71), é notável que as formulações teóricas de calibração na metodologia proposta retratam um comportamento geral de uma variável sendo proporcionalmente inversa ao comportamento da outra, ou seja, com a VmES aumentando, à medida que avança a degradação das paisagens ao longo do tempo, e o BFI diminuindo. Na situação de condição natural, a VmES global é mínima e o BFI médio global é máximo em todas as representações,

com valores que se diferenciam em razão das configurações ambientais particulares às bacias hidrográficas representativas. Verifica-se que quanto mais distante um cenário modificado em relação ao valor original de VmES da condição natural simulada (reta com declividade positiva), menor será o BFI médio global (reta com declividade negativa).

Porém, em uma escala temporal menor (como do período de 1981 a 2018), desconsiderando a VmES e o BFI médio global estimados para uma condição natural, nem sempre é perceptível a variação do BFI em função da VmES global do cenário. Isso porque pode haver momentos de redução da VmES (pelo avanço, em áreas e intervalos de declividade, em que determinados usos favorecem melhor a recarga na bacia hidrográfica representativa) e isso não se refletir na resposta hidrológica no escoamento de base (BFI médio global) entre os cenários. É o caso, por exemplo, da Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica (estação fluviométrica Saltinho), em que houve uma redução da VmES global do cenário de 1985 para 1993, e, em seguida, um aumento entre 1993 e 2018. No entanto, o BFI não seguiu, na mesma proporção, esse mesmo comportamento linear de forma idêntica à VmES global para essa escala temporal.

Outro caso é o da Bacia Hidrográfica Representativa do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado (estação Vila Canoas). Em pesquisa anterior, Hoffmann *et al.* (2022) identificaram também a relação inversa entre a VmES global e o BFI médio global para os cenários de 1957, 1976, 1997 e 2017. No comparativo entre os cenários, a VmES global reduziu entre 1957 e 1997 e se estabilizou entre 1997 e 2017, enquanto o escoamento de base apenas aumentou durante todo o período que compreendeu os 60 de anos de dados. No presente estudo, de menor escala temporal de análise, é possível observar um aumento da VmES global entre 1985 e 2001 e uma redução entre 2001 e 2018. Para esse mesmo período, o BFI diminuiu entre 1985 e 2001, porém teve uma tendência de redução entre 2001 e 2018, com exceção do ano de 2009.

Por isso, é necessário ressaltar que não há uma relação linear direta no comportamento entre essas duas variáveis na escala temporal entre 1981 e 2018, por apresentarem comportamentos distintos. Para esse período de dados, outras variáveis podem interferir nessa análise, como a variabilidade da precipitação, a retenção no manejo de águas (reservatórios ou manejo de águas pelas atividades agrícolas, como a rizicultura) ou o bombeamento por captações superficiais e subterrâneas. Essa questão indica que a capacidade de recarga subterrânea das águas conforme a configuração de uso e cobertura da terra não é o único fator que pode explicar o escoamento de base. Mesmo assim, os resultados apresentados

na Figura 71 ilustram, em caráter instrutivo, como a VmES global e o BFI médio global podem ter se distanciado de uma condição original do cenário balizador de disponibilidade do escoamento de base, respectivamente, com a primeira variável aumentando e a segunda variável diminuindo, à medida que as paisagens das bacias hidrográficas representativas foram sendo modificadas ao longo dos séculos.

4.3 AVALIAÇÃO FÍSICO-TEMPORAL DA INTERAÇÃO AQUÍFERO-RIO

A avaliação físico-temporal incluiu o comparativo de dados do Índice Geoambiental do Escoamento de Base (IGEB) dos cenários de condição natural simulada e observados (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018) para cada bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico do Estado de Santa Catarina, estimados com a Equação 26. A interpretação do IGEB dos cenários de cada bacia hidrográfica representativa mostra como os gestores poderiam recorrer à presente proposta metodológica, a partir do indicativo de melhora ou de piora na disponibilidade do escoamento de base ao longo do tempo. Ao final, procedeu-se com um comparativo dessa disponibilidade entre as bacias hidrográficas representativas de diferentes domínios hidrogeológicos do presente estudo e a relação com a configuração de uso e cobertura da terra.

Os dados do IGEB para a bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino (Figura 72) mostram que os cenários com dados observados oscilam a classificação de disponibilidade do escoamento de base entre preocupante (1993) e razoável (1985, 2001, 2009 e 2018), comparados à classificação sustentável do cenário de condição natural. Houve uma piora da disponibilidade do escoamento de base no período de 1985 (73%) a 1993 (69%); seguida de uma melhora em 2001 (73%), que retorna ao patamar do cenário de 1985; novamente com uma piora no cenário de 2009 (72%); e uma melhora em 2018 (75%), sendo o cenário que detém a maior disponibilidade dentre os cenários com dados observados. De modo geral, mesmo com a piora para o período de 1985 a 1993, há uma tendência de aumento da disponibilidade hídrica desde então até o cenário de 2018, havendo uma aproximação ao IGEB com classificação satisfatória.

Figura 72 – Aplicação do IGEB para estimativa da disponibilidade do escoamento de base nas bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos do Estado de Santa Catarina para os cenários de condição natural simulada e cenários observados (1985, 1993, 2001, 2009 e 2018).



Fonte: Elaboração própria.

Na bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica, além da disponibilidade sustentável para o cenário de condição natural, o IGEB dos cenários com dados observados aponta para um cenário razoável (1985) e quatro cenários consecutivos classificados como preocupantes (1993, 2001, 2009 e 2018). Na ordem cronológica de eventos do IGEB, nota-se que houve uma piora da disponibilidade hídrica entre 1985 (71%) e 1993 (66%), seguida de uma melhora gradativa nos cenários de 2001 (67%), 2009 (68%) e 2018 (69%), aproximando-se novamente de um cenário de classificação razoável de 33 anos anteriores (cenário de 1985).

Por sua vez, os dados usados para o IGEB do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado mostram um cenário de disponibilidade sustentável (condição natural) e cinco cenários consecutivos em situação razoável (1985 a 2018). Ao longo do tempo, observa-se estabilidade entre os cenários de 1985 e 1993; seguida de uma redução da disponibilidade em 2001 (76%); novamente um aumento em 2009 (77%); e outra redução em 2018 (75%). Observa-se uma tendência geral de redução sutil na disponibilidade do escoamento de base, que passa a aproximar-se de um cenário com situação preocupante.

Os dados do IGEB para a bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico do SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado apresentam um cenário de disponibilidade sustentável (condição natural) e cinco cenários consecutivos em situação de disponibilidade crítica (1985 a 2018). Dentre os cenários observados, a distribuição do IGEB ao longo do tempo evidencia que houve uma redução entre 1985 (54%) e 1993 (51%), passando para um aumento em 2001 (53%) e uma estabilização entre 2009 (55%) e 2018 (55%). O IGEB indica ainda que essa bacia hidrográfica representativa apresentou quase a metade do escoamento de base disponível ao longo dos cenários entre 1985 e 2018 em relação ao cenário de condição natural. Nota-se uma tendência geral do IGEB para de aumento gradativo da disponibilidade hídrica, podendo deixar a situação crítica para aproximar-se de uma classificação preocupante.

Por fim, em avaliação da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos, além da disponibilidade sustentável para o cenário de condição natural, o IGEB mostra que os cenários com dados observados oscilam a classificação de disponibilidade do escoamento de base entre preocupante (1985, 2001 e 2018) e razoável (1993 e 2019). Em ordem cronológica de eventos, os dados do IGEB indicam que, comparativamente ao cenário de disponibilidade sustentável (condição natural), os cenários observados alternam a classificação entre preocupante e razoável para o período de 1985 a 2018. Houve uma melhora da disponibilidade do escoamento de base no período de 1985 (61%) a 1993 (72%); uma piora entre 1993 e 2001 (67%); seguida de outra melhora, entre 2001 e 2009 (75%); e novamente com outra piora, entre 2009 e 2018 (64%). Apesar de ter havido uma melhor disponibilidade nos cenários de 1993 e 2018, a alternância da classificação do IGEB entre cenários representa não haver estabilidade na disponibilidade do escoamento de base na bacia hidrográfica, permanecendo maioritariamente em situação

preocupante. É o caso do cenário de 2018, que se assemelha ao IGEB de 17 anos anteriores (cenário de 2001) e, até mesmo, de 33 anos anteriores (cenário de 1985).

De modo geral, comparativamente ao único cenário em situação sustentável do IGEB (de condição natural), houve uma intensa redução na disponibilidade do escoamento de base em todas as bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico. É possível inferir que, à medida que houve a substituição das áreas de vegetação nativa em estágio de clímax por outros tipos de usos e coberturas da terra induzidos por ocupações territoriais, houve o rebaixamento da classificação do IGEB em cada uma delas, de sustentável para satisfatória, e, em seguida, para razoável, preocupante e crítica, como nos cenários entre 1985 e 2018. Além disso, podendo até mesmo já ter havido alguma situação alarmante em determinados momentos do passado anterior ao período avaliado.

Nenhum dos cenários do IGEB para as bacias hidrográficas representativas apresentaram uma disponibilidade de escoamento de base satisfatória para os anos identificados. A maioria delas encontra-se entre uma situação razoável e preocupante de disponibilidade de escoamento de base para os cenários com dados observados (1985-2018), inclusive no cenário mais recente (2018). A bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado é a que detém a maior disponibilidade hídrica para os cenários do IGEB (oscilando entre 75% e 78%), seguida da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Cristalino (oscilando entre 69% e 75%). São essas bacias hidrográficas representativas, portanto, que, em momentos de escassez de chuvas, podem ter um melhor enfrentamento ao estresse hídrico em razão da configuração territorial dispor de extensas áreas florestais que permitem uma melhor recarga subterrânea e disponibilidade do escoamento de base.

Em contrapartida, a bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado é ainda a única que permanece na classificação crítica de disponibilidade. É a bacia hidrográfica representativa com a pior disponibilidade hídrica para os cenários do IGEB no período 1985-2018, variando entre 51% e 55%. Nessa perspectiva, é a bacia hidrográfica representativa que pode apresentar o pior enfrentamento diante de estresse hídrico pelo fato da situação de disponibilidade do escoamento de base estar em situação crítica, com área de cobertura predominantemente constituída por áreas cultivadas e pastagens, que dificultam a recarga subterrânea em detrimento da geração do escoamento superficial

A situação crítica da bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado mostra que já há claros sinais de escassez de águas em períodos de estiagem dado à limitação no armazenamento e percolação de longo prazo nos aquíferos da bacia hidrográfica, de modo que a perfuração de poços torna-se mais acentuada. Geralmente, opta-se pela procura por águas subterrâneas ao invés do incentivo à recarga de águas subterrâneas pela melhoria na gestão de uso da terra. Pode ser também a bacia hidrográfica que mais simboliza a situação de boa parcela das bacias hidrográficas que se encontram com a cobertura da condição natural drasticamente suprimida por áreas cultivadas, pastagens e/ou silvicultura, especialmente nas regiões Extremo Oeste, Meio Oeste e Oeste do estado de Santa Catarina.

Seguidamente em ordem de pior enfrentamento ao estresse hídrico, conforme a classificação do IGEB, estão as bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos Bacia Sedimentar Paleozoica (variação entre 66% e 71%) e Depósitos Cenozoicos (variação entre 61 e 75%), que apresentam considerável modificação antropogênica da paisagem que se encontrava em condição natural, porém, ainda com área de cobertura formada, predominantemente, de florestas e áreas campestres.

4.4 DIAGNÓSTICO DA DISPONIBILIDADE DO ESCOAMENTO DE BASE COMO INSTRUMENTO NA GESTÃO DE ÁGUAS

Os resultados obtidos no presente estudo mostram ser possível a definição de um cenário balizador, ou nível de medida máximo, para a disponibilidade do escoamento de base em bacias hidrográficas (IGEB) através da mensuração indireta do escoamento superficial, conforme a declividade e o tipo de cobertura da terra, pelos cenários de VmES. Essa é uma nova perspectiva de estudo das vazões mínimas que inclui a inserção do fator humano de interferência nas paisagens, usando uma condição natural simulada de cobertura da terra.

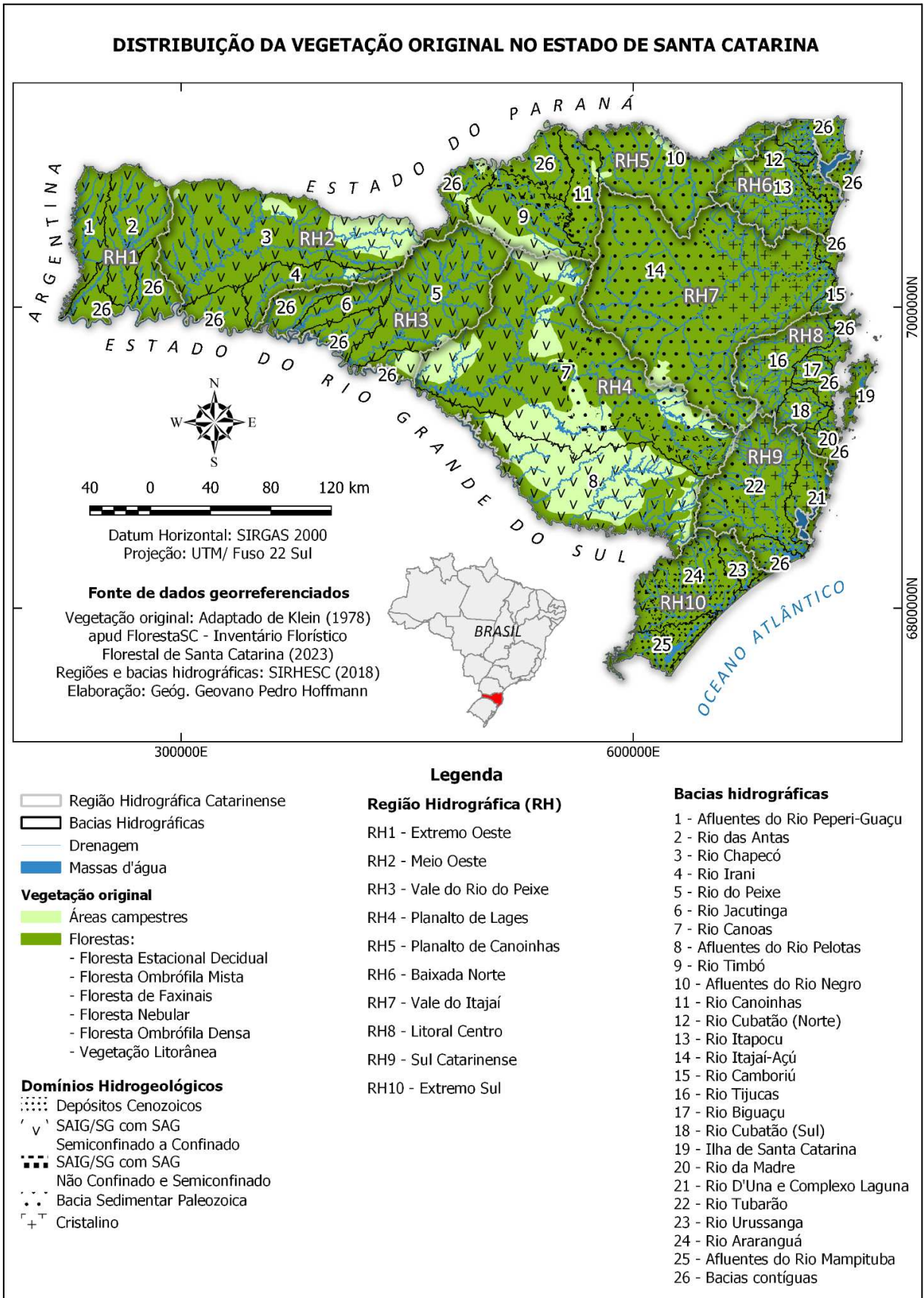
O cenário balizador de disponibilidade do escoamento de base é útil como referência comparativa de avaliação entre o escoamento de base natural aferido e aquele resultante dos cenários de modificação antropogênica. Para além das paisagens, permite identificar como as cidades e suas relações com as cadeias produtivas, de diferentes hierarquias, circuitos e escalas geográficas ligadas a elas, reproduzem na superfície das bacias hidrográficas as suas ações, influenciando no armazenamento dos aquíferos e, conseqüentemente, na

disponibilidade do escoamento de base em bacias hidrográficas de cada domínio hidrogeológico.

É preciso a leitura de como a manutenção de águas nas paisagens está sendo comandada pelos tipos de uso e cobertura da terra sobre o relevo (declividade) das bacias hidrográficas. No gerenciamento, caberia o incentivo aos tipos de cobertura da terra que diminuíssem a VmES global da bacia hidrográfica ao longo do tempo como uma maneira de reter as águas nas paisagens. A retenção de águas nas paisagens significa, além da redução na geração do escoamento superficial direto, a melhoria na perenidade das bacias hidrográficas e na resiliência aos cenários de escassez hídrica.

O momento imediatamente anterior às transformações das paisagens nas bacias hidrográficas de Santa Catarina, e às mudanças ambientais na região Sul do Brasil, é apresentado por Klein (1978) (Figura 73) pela representação da vegetação nativa distribuída sobre a sua área fitofisionômica original no estado de Santa Catarina. Observa-se na Figura 73 como seria a vegetação original pela sobreposição da classificação em domínios hidrogeológicos do presente estudo, assim como pela regionalização da gestão de águas em Santa Catarina por região hidrográfica e por comitês de bacias hidrográficas. Nesse cenário de condição natural em Santa Catarina, as curvas de vazão provavelmente eram mais suaves durante os períodos sem chuvas caso fossem mensuradas, de modo que os cursos d'água permaneceriam por mais tempo fluindo, mantendo as vazões dos rios com uma melhor regularidade. Considerando os resultados obtidos no presente estudo, o escoamento de base em Santa Catarina estava no seu auge nesse cenário até ocorrer o início do período de colonização no estado.

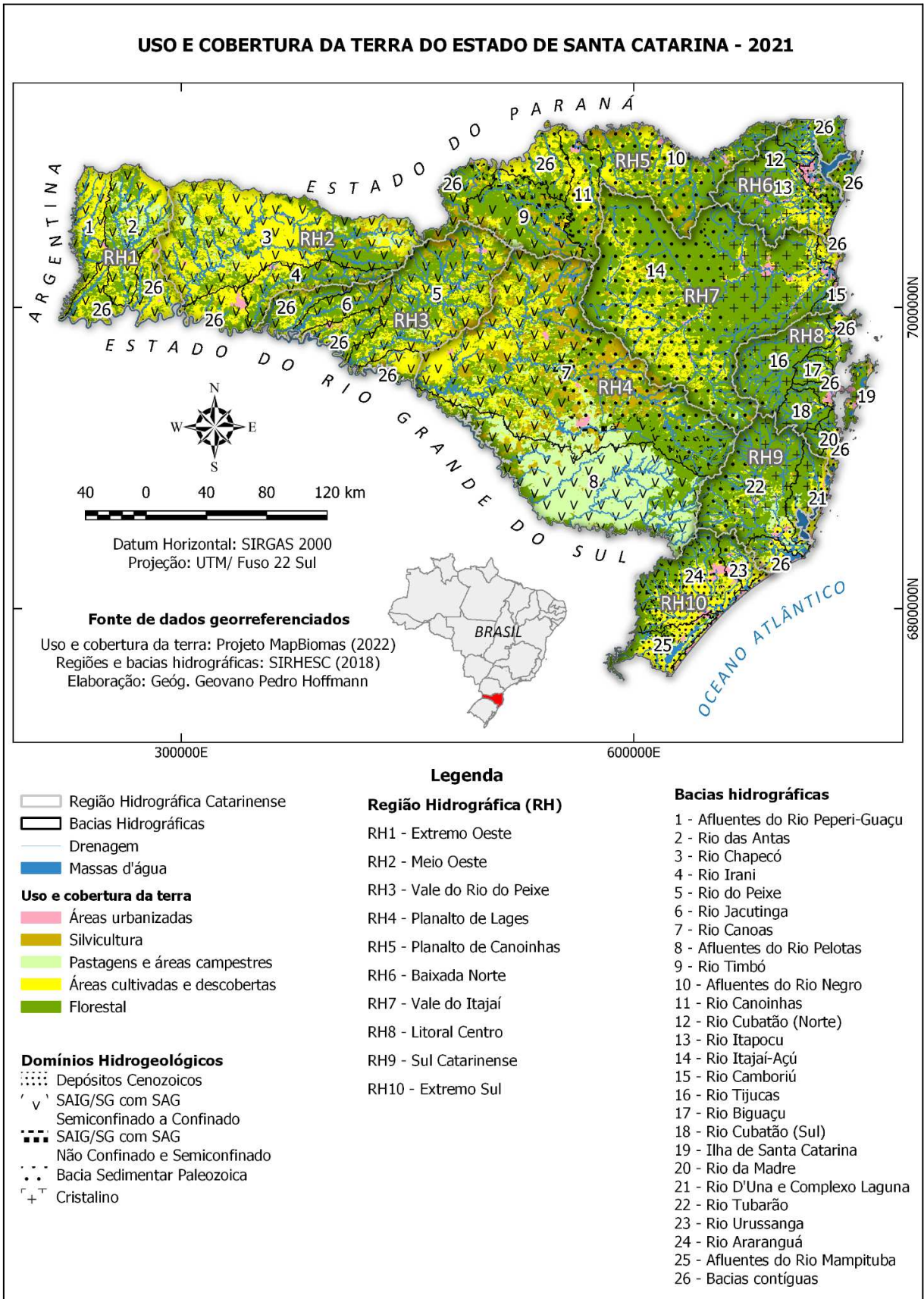
Figura 73 – Distribuição da vegetação original no estado de Santa Catarina.



Fonte: Adaptado de Klein (1978) apud FLORESTASC - IFFSC (2023).

Com o passar do tempo, houve a substituição das florestas pela pecuária, pelas lavouras e pelo crescimento das cidades. Como resposta hidrológica à desidratação das paisagens nas bacias hidrográficas de Santa Catarina, possivelmente, houve o acentuamento das curvas de vazão, proporcionando o encurtamento do tempo de fluxo base para os rios. As águas provenientes das chuvas foram sendo drenadas das bacias hidrográficas mais rapidamente, justamente por não estar ocorrendo a sua entrada nos solos e nos aquíferos pela alteração das condições ambientais de recarga, que passaram a favorecer a geração do escoamento superficial direto conforme o grau de impermeabilização. Na Figura 74, é apresentado o cenário mais recente do Projeto MapBiomias (2022) para o estado de Santa Catarina, usando as classes de uso e cobertura da terra do presente estudo, por domínio hidrogeológico, por região hidrográfica e por bacia hidrográfica.

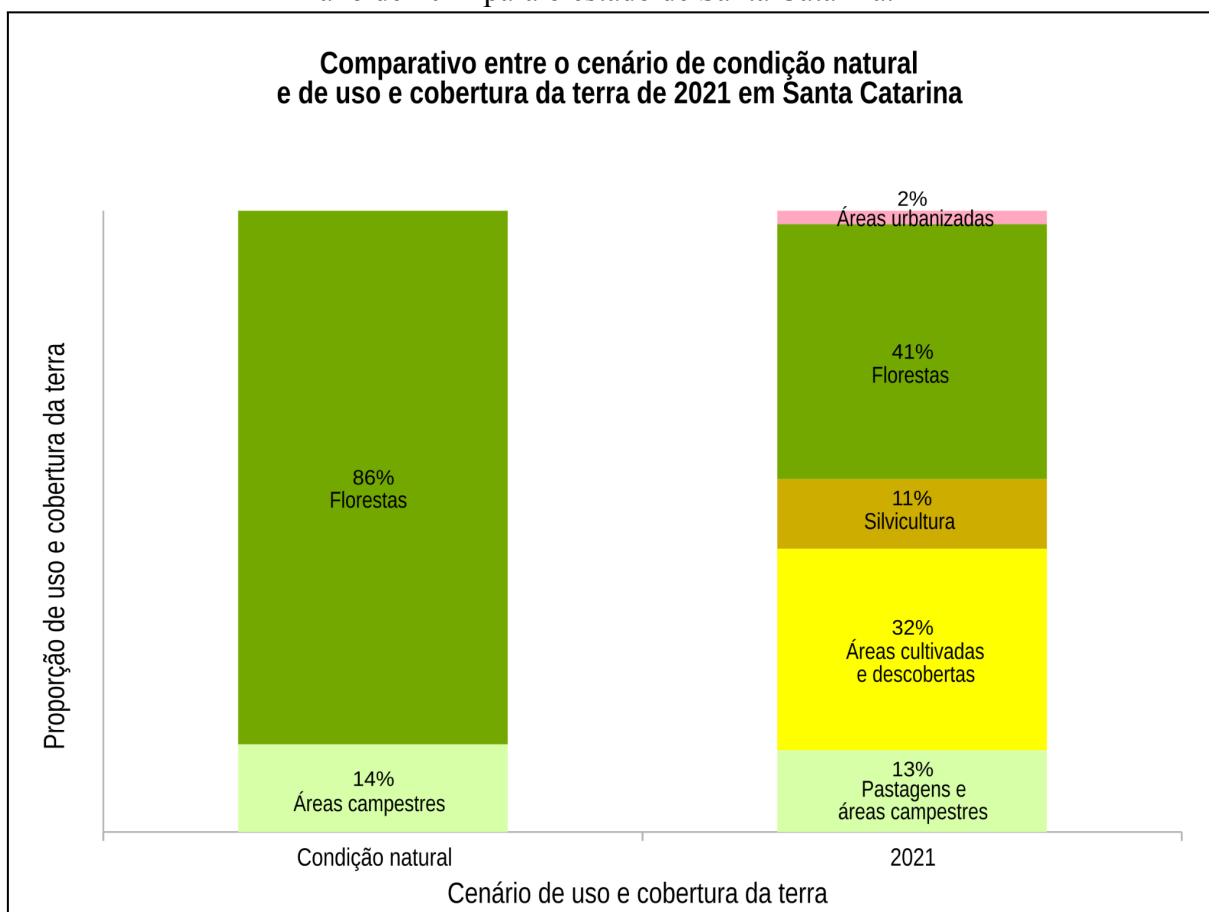
Figura 74 – Uso e cobertura da terra do estado de Santa Catarina no ano de 2021.



Fonte: Adaptado de Projeto Mapbiomas (2022).

O cenário mais recente de modificação antropogênica no estado, do ano de 2021, (Figura 74), revela que a vegetação original foi drasticamente substituída em todas as regiões hidrográficas do estado em diferentes níveis (Figura 75). Atualmente, as áreas de florestas em Santa Catarina compreendem 41%, abrangendo menos da metade do que já cobriram no passado as bacias hidrográficas, bem como os domínios hidrogeológicos, em condição natural (86%). As áreas cultivadas e descobertas são, a seguir, as mais expressivas (32%), seguidas das pastagens e áreas campestres (13%), da silvicultura (11%) e, por último, em menor proporção, das áreas urbanizadas (2%).

Figura 75 – Comparativo entre o cenário de condição natural e de uso e cobertura da terra do ano de 2021 para o estado de Santa Catarina.



Fonte: Elaboração própria.

Quando há o planejamento de atividades que poderão ser permitidas em uma bacia hidrográfica, avaliando-se os impactos que poderão interferir no aumento da VmES, é necessário ponderar se ela cumprirá uma mera função de drenagem frente à continuidade da degradação ambiental, deixando aparecer os leitos rochosos dos rios durante os momentos em

que mais se precisa (nas estiagens e secas); ou se a decisão é por uma mudança de paradigma, com ações que impliquem na restauração do seu equilíbrio natural de acumulação de águas pela recarga dos aquíferos que a suprem.

As regiões hidrográficas com modificação antropogênica mais notável na Figura 74 são a RH1 (Extremo Oeste), a RH2 (Meio Oeste), a RH3 (Vale do Rio do Peixe), a RH4 (Planalto de Lages), a RH5 (Planalto de Canoinhas) e a RH10 (Extremo Sul). Essas seriam as regiões hidrográficas que exigiriam maior atenção para a melhoria da disponibilidade do escoamento de base pela melhor gestão de uso e cobertura da terra, o que incluiria grande parte da área de afloramento dos domínios hidrogeológicos SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado e Depósitos Cenozoicos. Nota-se que na RH4 (Planalto de Lages) continua presente uma extensa área campestre com vegetação de Campos. As demais regiões, situadas unicamente na vertente do litoral do estado, ainda apresentam as áreas florestais dominantes em relação aos demais usos, principalmente por serem áreas íngremes de vales e serras.

Possivelmente no passado anterior à colonização do estado, Santa Catarina apresentava uma melhor disponibilidade hídrica, com as pontes de água constituídas por uma evapotranspiração mais acentuada que atraía mais umidade com regularidade (situação E da Figura 24), fornecendo um escoamento de condição natural mais elevado e mais estável. Após a transformação das paisagens de condição natural, as bacias hidrográficas, especialmente aquelas da vertente do interior, passaram a ter menos áreas florestais e a interrupção de regularidade dos ciclos locais de evapotranspiração. O caso mais extremo relacionado, evidenciado pelos resultados apresentados sobre a disponibilidade hídrica do escoamento de base, é o da bacia hidrográfica representativa do SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado (próximo do cenário B da Figura 24).

A condição natural das fitofisionomias de vegetação no estado de Santa Catarina será dificilmente restabelecida por completo, considerando o atual modelo de desenvolvimento econômico. Por isso, são apresentadas possíveis ações estratégicas de planejamento para aumentar a disponibilidade pela reidratação das paisagens e evitar ou minimizar o estresse hídrico em Santa Catarina na gestão de águas das bacias hidrográficas. Considera-se, sobretudo, a relação entre a vegetação original (florestas e campos de altitude do bioma Mata Atlântica) e os domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina, usando os recursos e mecanismos do ciclo hidrológico. Considerando a matriz de cruzamento da VmES, as menores velocidades para os diferentes usos da terra encontram-se nas classificações de 0-3%

e 4-7%, enquanto as maiores velocidades abrangem as classificações de 8-11% e acima de 12%. A ideia é que haja redução na área dos usos que proporcionam as maiores VmES, conforme a declividade e o tipo de uso e cobertura da terra em combinação às estratégias sugeridas no Quadro 30.

Quadro 30 – Estratégias que permitem aumentar a disponibilidade do escoamento de base pelo uso e cobertura da terra.

Uso e cobertura atual	Estratégia de aumento da disponibilidade do escoamento de base
Áreas cultivadas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Diversificação da produção nas propriedades, como o incentivo à produção agroflorestal nas atuais áreas de cultivo; ○ Conservação dos solos através do sistema de plantio direto; ○ Aplicação das técnicas de terraceamento em áreas de declive;
Áreas de pastagens	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pecuária com incentivo ao pastoreio racional rotativo; ○ Incentivo à implantação de sistemas agrossilvopastoris; ○ Diversificação das atividades nas propriedades com apicultura, aquicultura, etc.;
Áreas urbanizadas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Trincheiras de infiltração; ○ Exigência de áreas verdes para construções; ○ Desestímulo de indústrias em áreas de recarga; ○ Evitar a retinização de cursos d'água; ○ Criação de parques;
Para todo tipo de uso e cobertura, incluindo a silvicultura	<ul style="list-style-type: none"> ○ Regeneração e recomposição florestal nativa das áreas de recarga sobre: <ul style="list-style-type: none"> ■ os mantos de intemperismo espessos (médio curso); ■ as porções do relevo na condição de patamares e chapadas; ■ as unidades hidrogeológicas situadas no médio e alto curso das bacias hidrográficas; ■ as unidades hidrogeológicas aflorantes com condutividade hidráulica mais lenta, porém não impermeáveis; ■ as áreas do baixo curso, combinada à preservação e reconstituição das áreas úmidas situadas em planícies e planaltos, especialmente nas declividades entre 0 e 3%; ○ Exigência, no mínimo, de aplicação das regras às áreas de proteção previstas no Código Florestal brasileiro (áreas de preservação permanente em torno de cursos d'água, topos de morros, encostas, nascentes e manguezais; e de áreas de reserva legal); ○ Criação de áreas protegidas.

Fonte: Elaboração própria.

Outras estratégias podem ser consorciadas como instrumento de melhoria no armazenamento dos aquíferos pelo uso e cobertura da terra. É o caso de uso de tecnologias para a captação de águas de nascentes para consumo humano, como, por exemplo, a

tecnologia do tipo Caxambu¹⁵, bem como a implementação de programas, tal como o Programa Produtor de Águas¹⁶.

Ao passo que ocorre o aumento da disponibilidade hídrica com a restauração florestal e o desenvolvimento econômico aliado a práticas conservacionistas, a dependência da extração de águas dos poços pode ser minimizada. Os próprios comitês de bacia hidrográfica, ao menos no estado de Santa Catarina, estão amparados por dispositivo legal para participar junto ao órgão gestor de recursos hídricos para restringir a captação e o uso de águas subterrâneas, conforme prevê a Resolução nº 02/2014, do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-SC, 2014):

Art. 6º O órgão gestor de recursos hídricos, com a participação dos Comitês de Bacias, pode restringir a captação e o uso das águas subterrâneas, no interesse: I – dos serviços de abastecimento coletivo de água; II – da proteção, conservação ou manutenção do equilíbrio natural; e III – de questões geológicas, geotécnicas ou ecológicas.

É preciso ressaltar que nem todo problema ambiental é resolvido com a expansão de florestas, como a contaminação de águas, por exemplo. Porém, no caso da disponibilidade do escoamento de base é a tecnologia natural mais viável, e a mais importante, a longo prazo. Pode ser que agricultores “percam” com áreas de lavoura, mas a continuidade da desidratação físico-temporal da paisagem poderá acarretar perdas financeiras ainda maiores. A grande questão é não enxergar a vegetação nativa como problema, mas como solução para uma nova maneira de fazer o uso conservacionista do território.

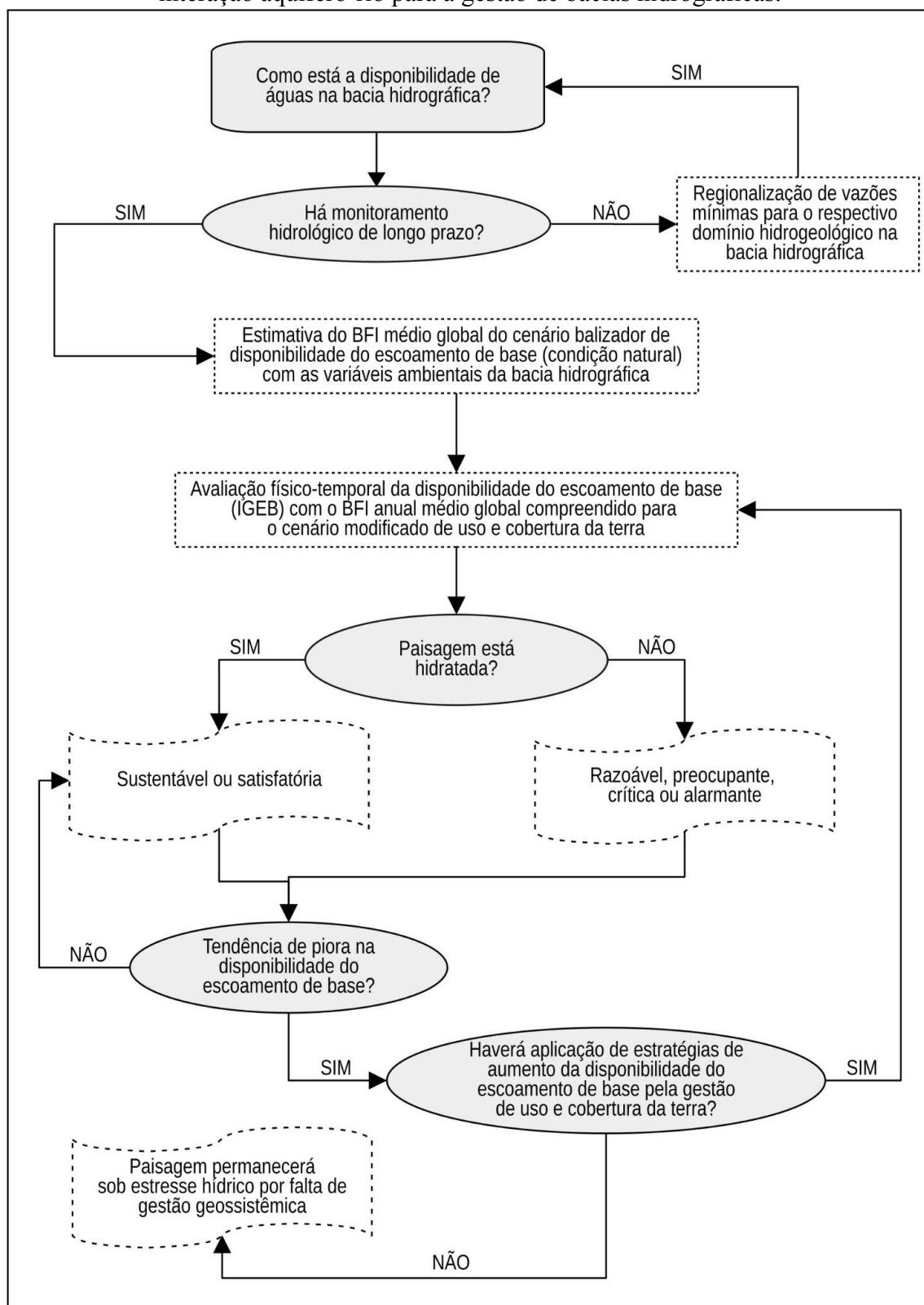
Por isso, o fluxograma de suporte à decisão aos gestores de águas (Figura 76) ilustra o que pode ser feito em relação ao comportamento da interação aquífero-rio nas bacias hidrográficas de Santa Catarina com o uso metodologia desenvolvida no presente estudo. A

¹⁵ A fonte de água do modelo Caxambu, desenvolvida pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), é um dispositivo de proteção das nascentes usado para captação de águas subterrâneas que afloram na superfície. Faz parte de um sistema de abastecimento individual, mas que para ter sucesso, requer o isolamento com cobertura florestal da área a montante do ponto de implantação para manter a perenidade. Além da tecnologia do tipo Caxambu, outras usadas na proteção de nascentes são a captação com drenos cobertos e também as trincheiras (CALHEIROS *et al.*, 2004; WEBER *et al.*, 2022).

¹⁶ O Programa Produtor de Águas é uma iniciativa, do âmbito federal, da ANA. É um incentivo para os proprietários rurais manterem e ampliarem as áreas de cobertura florestal nativa. Baseia-se no princípio do provedor-recebedor, do instrumento de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA), em que o usuário paga e o proprietário conservacionista que fornece o serviço ecossistêmico recebe. Para o produtor rural, a remuneração pode ser uma fonte principal ou complementar de renda. A fonte dos recursos é variada, podendo envolver a União, Estados, municípios, comitês de bacia hidrográfica, bancos, organizações não governamentais, empresas de saneamento, etc. Geralmente, os projetos são realizados a partir de parcerias firmadas por prefeituras, comitês de bacia, agências de regulação, associações locais ou regionais e dependem, ainda, da adesão voluntária dos produtores rurais (ANA, 2012). A participação dos produtores rurais em um programa como esse requer a conscientização ambiental, e a disponibilidade de informações acompanhada de assistência técnica e fiscalização, como percebido em experiência no município de Rio Claro, no Rio de Janeiro (PAIVA e COELHO, 2015).

verificação de disponibilidade do escoamento na bacia hidrográfica de atuação dos gestores ocorre com o levantamento de dados de monitoramento de vazão de longo prazo (compreendendo uma série histórica acima de 30 anos de dados, por exemplo). Caso não haja o monitoramento contínuo de vazões, opta-se por outros métodos de estimativa, como a regionalização de vazões mínimas a partir de bacias hidrográficas do mesmo domínio hidrogeológico. Em seguida, procede-se com a estimativa do BFI médio global do cenário balizador de disponibilidade do escoamento de base (condição natural) com as variáveis ambientais da bacia hidrográfica (integradas pela Velocidade Média do Escoamento Superficial - VmES).

Figura 76 – Fluxograma de suporte à decisão pela avaliação de disponibilidade hídrica da interação aquífero-rio para a gestão de bacias hidrográficas.



Fonte: Elaboração própria.

Com o BFI médio global do cenário de condição natural, é realizada a avaliação físico-temporal da disponibilidade do escoamento de base (IGEB) para os cenários antropogênicos de uso e cobertura da terra. Através dos resultados dessa avaliação, os gestores saberão se a paisagem da bacia hidrográfica está com maior disponibilidade do escoamento de base (classificações sustentável e satisfatória do IGEB) ou menor disponibilidade (classificações razoável, preocupante, crítica ou alarmante). Ao mesmo tempo, o comparativo entre cenários de uso e cobertura da terra permite identificar se as paisagens da bacia hidrográfica estão tornando-se mais hidratadas com o passar do tempo ou mais ressecadas.

Se uma bacia hidrográfica encontra-se nos cenários mais recentes das classificações entre razoável, preocupante, crítica ou alarmante, com indicativo das paisagens em desidratação, por uma tendência de piora do IGEB nos cenários de disponibilidade do escoamento de base, os gestores podem optar pela aplicação de estratégias de melhoria do escoamento de base listadas anteriormente (Quadro 30) usando a gestão do uso e cobertura da terra como instrumento. O mesmo aplica-se às bacias hidrográficas presentes nas classificações sustentável ou satisfatória, mas que estão apresentando redução do IGEB. Após a aplicação das estratégias de melhoria e, com o passar dos anos, realiza-se novamente a avaliação físico-temporal da disponibilidade do escoamento de base a fim de identificar se as medidas cumpriram o efeito esperado. Caso os gestores optem por não agir, a disponibilidade hídrica diminuirá em razão da paisagem permanecer sob aumento do estresse hídrico pela falta de uma gestão geossistêmica das águas.

Optar por não gerir as águas significa incorrer em erro do ponto de vista do planejamento ambiental. A elevação do estresse hídrico nas bacias hidrográficas catarinenses já é uma realidade e acarreta inúmeros prejuízos, com perdas do capital financeiro. Inclusive, é um empecilho para as indústrias, os agronegócios e à produção de energia hidrelétrica e à redução de uma biodiversidade bastante degradada, bem como propicia a ampliação dos conflitos e desigualdades no acesso à água no campo e nas cidades.

4.5 OUTRA FORMA DE PENSAR A GESTÃO DE ÁGUAS: PRESSUPOSTOS PARA UMA ABORDAGEM GEOSSISTÊMICA

O escoamento de base não deve ser encarado somente como mais um dado ou variável a ser incluída nos planos de gestão das águas, haja vista que os aquíferos mantêm os

rios fluindo nos períodos em que não chove através dos fluxos de base. A gestão de águas é a gestão da fluidez do ciclo hidrológico, que ora percola os aquíferos pela infiltração, ora aflora na superfície das bacias hidrográficas e retorna à atmosfera. Nesse sentido, por representar o saldo do balanço hídrico, o gerenciamento do escoamento de base é o ponto-chave da gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas. E isso é muito claro pelo fato do episódio histórico da magnitude da seca na região Sudeste do Brasil, em 2014, e pela sua ocorrência recente, e generalizada, na região Sul do país, onde é observada a necessidade de mais atenção às áreas de recarga subterrânea.

Um estudo de escoamento de base, dentre as diferentes formas de avaliar o seu comportamento na gestão de bacias hidrográficas, utiliza dados de vazão de estações fluviométricas situadas em algum ponto de um rio. As publicações sobre escoamento de base, em sua grande maioria, tendem a apresentar uma definição genérica e mostram a sua aplicação de estimativa com base em modelos estatísticos para um estudo de caso. A identificação do comportamento dessa contribuição dos aquíferos é essencialmente baseada em estimativas com fundamento em modelos teóricos, tendo em vista a dificuldade em haver um monitoramento direto e contínuo. Os modelos contêm incertezas e erros, sendo dificilmente mensurado o seu comportamento por métodos empíricos ao longo de anos ou décadas. Por isso, talvez seja um tema pouco explorado e que não tenha a visibilidade que deveria. Mesmo os artigos de revisão sobre o escoamento de base não se aprofundam em discutir a gestão de águas. Em vista disso, é preciso atentar-se em como a interação aquífero-rio poderá ser o ponto-chave da gestão de bacias hidrográficas.

O escoamento de base, popularmente conhecido como vazão mínima (ou também como as vazões mínimas de referência Q_{95} , Q_{98} e $Q_{7,10}$) é considerado de grande utilidade, por exemplo, para avaliar as possibilidades de instalação de usinas hidrelétricas, de pequenas centrais hidrelétricas ou, sobretudo, de reservatórios de captação de águas para o abastecimento público. Quando se trata da gestão das águas subterrâneas, é bastante comum lembrar da outorga de poços, das formas de proteção desses tipos de captações, ou ainda das contaminações por resíduos, como se as águas subterrâneas fossem relevantes apenas pelas perfurações. Por mais óbvio que pareça ser, os aquíferos também tem importância fundamental no escoamento dos rios a partir da interação aquífero-rio, tornando necessário outros estudos nesse campo de conhecimento, como o de levantamentos sobre a recarga diretamente ligada à existência de falhamentos geológicos ou também sobre a descarga em lagos, lagoas e áreas úmidas.

Além disso, o escoamento de base não é apenas a água fluindo em superfície a partir de um conjunto de aquíferos, já que ele é também um “termômetro” que indica a situação socioambiental do ciclo hidrológico. O escoamento de base permite que se faça a comunicação do que está indo bem, ou do que está funcionando como previsto, e daquilo que foi deteriorado pela ação antropogênica, isto é, que precisa ser melhorado para aproximar-se do equilíbrio ambiental a que estavam submetidas as componentes físicas de constituição de uma bacia hidrográfica.

Por não serem estáticas, as águas subterrâneas variam os mecanismos da circulação espacialmente conforme a interação do ciclo hidrológico com as condições ambientais de cada bacia hidrográfica, que não seja apenas pela precipitação e a sua regularidade. A começar pelas águas subterrâneas apresentarem diferentes tempos de circulação, sendo mais rápidas ou mais lentas em uma mesma bacia hidrográfica, a depender da regularidade da precipitação e, simultaneamente, da taxa de recarga da superfície. É aí que entra o uso e ocupação do solo, a partir do estudo da VmES. Nesse sentido, o escoamento de base não é uma questão inerente à gestão de águas. É, sobretudo, uma temática fundamental aos gestores preocupados em realizar uma gestão de águas com outros instrumentos, que podem não ser apenas o convencional plano de recursos hídricos, para executar ações apropriadas às condições ambientais da sua bacia hidrográfica de atuação, e que, ao mesmo tempo, possam estar articuladas e ser incorporadas ao plano diretor municipal ou a um zoneamento ambiental.

O uso indiscriminado de poços, muitas vezes perfurados irregularmente, provocando o rebaixamento do nível freático com a sobreexploração, pode fazer as fontes de águas secarem, convertendo drasticamente os rios perenes em intermitentes. Isso implica em questões de ordem econômica (englobam o desenvolvimento das culturas agrícolas, das exportações, a navegação, etc.), ambiental (alteração da recarga e da descarga de águas e implicações na biodiversidade) e social (o acesso à água conforme o nível de renda, por exemplo). Requer-se, assim, um uso sustentável dessas águas, por serem o limiar a um cenário de completo desabastecimento e, mesmo assim, há uma carência de estudos sobre as águas subterrâneas em Santa Catarina e, especialmente, em como a interação aquífero-rio supre as bacias hidrográficas presentes no estado.

Um dos papéis do profissional das geociências, especialmente do geógrafo, desse modo, é o de compreender como as diferentes variáveis ambientais, incluindo as modificações antropogênicas, interferem na disponibilidade do escoamento de base ao longo do tempo,

permitindo identificar se vem ocorrendo maior retenção ou redução dessa disponibilidade no período de algumas décadas, como uma forma de detectar a situação de disponibilidade do escoamento de base para os diferentes usos. Como consequência da execução desse levantamento, é possível dar seguimento ao planejamento ambiental e ao ordenamento territorial para não ultrapassar a capacidade de equilíbrio ambiental do ciclo hidrológico na sua passagem pelos aquíferos, e, portanto, das bacias hidrográficas através da redução do armazenamento e do encurtamento da duração do escoamento de base.

Não é algo que deva ser compreendido apenas no âmbito técnico-científico, ou na esfera de tomada de decisões, mas também é necessário que essa informação possa chegar à população que reside nas bacias hidrográficas de jurisdição dos comitês de bacia. É também a esse público que a metodologia desenvolvida no presente trabalho é destinada, por meio de sinalização semafórica e classes qualitativas do IGEB, para facilitar a compreensão de algo que, muitas vezes, pode ser uma informação distante da realidade de determinados grupos da população.

A gestão de águas não envolve somente as águas por si só. Nesse sentido, norteado por Sotchava (1977), Christofletti (1999), Monteiro (2001), Press *et al.* (2006) e Christopherson (2012), que discutem sobre o conceito de geossistema, ousa-se propor, no presente estudo, uma “abordagem geossistêmica” para a gestão de águas, diferentemente da abordagem somente do tipo integrada, cujo objetivo principal é a integração institucional entre os órgãos gestores do SINGREH. Na abordagem proposta, sugere-se que a gestão de águas seja pensada espacialmente. Ou seja, com a noção de que as variáveis ambientais que controlam uma bacia hidrográfica estão conectadas e configuram-se como um conjunto natural único (geossistema), e que se diferencia conforme a localização georreferenciada das suas componentes (distribuição das rochas, do relevo, dos solos, do tipo de cobertura da terra, etc.). Além disso, que sobre esse conjunto atuam processos altamente imbricados, e que se autorregulam, como: a) o clima, pela distribuição da chuva e da umidade, em anos de El Niño, de La Niña e de mudanças climáticas com o aquecimento atmosférico do planeta, bem como pela interferência nos padrões de ventos; b) os oceanos, através das correntes marítimas, quando se intensificam ou se enfraquecem; e c) a biodiversidade, incluindo a distribuição diferenciada de espécies e o seu papel nos ecossistemas, dentre os quais está a espécie humana e os seus efeitos antropogênicos.

O quadro regional de avaliação dos fluxos em circulação e, pelos quais são geridos, é a bacia hidrográfica, o que não é novidade na gestão de águas como é realizada pelos comitês

de bacia no país, conforme a Lei das Águas (BRASIL, 1997). Porém, considera-se que é outra forma de compreendê-la por uma abordagem geossistêmica, a partir de três pressupostos sugeridos: que inclua o ciclo hidrológico como integrante de um equilíbrio natural geossistêmico; que trate a segurança hídrica como uma questão de déficit hídrico e do modelo civilizatório; e que, dessa maneira, viabilize à gestão de águas ser integrada, integradora e participativa.

4.5.1 O ciclo hidrológico é integrante de um equilíbrio natural geossistêmico

Em razão da sua mobilidade espacial, as águas movimentam-se e interagem com diferentes paisagens e estruturas geológicas, dispondo-se em diferentes formas (sólida, líquida e gasosa). Comparativamente, da mesma forma que se diz que os aquíferos são equivalentes a caixas d'água, pode-se dizer que as bacias hidrográficas são como casas, cada uma tem as suas particularidades para condicionar a recarga e a descarga de águas pelos sistemas de fluxos subterrâneos, com tamanhos diferentes, cada uma com uma forma, cada uma com componentes socionaturais posicionados de modos diferenciados. Todavia, nas bacias hidrográficas elas são limitadas e apresentam fronteiras físicas, territoriais e sociais de diferentes escalas geográficas.

As civilizações, organizadas em grupos políticos-econômicos-sociais, realizaram o controle sobre os recursos naturais ao longo da história. No caso das águas, o controle é feito com o represamento, a canalização ou a perfuração de poços. Entretanto, é preciso atentar-se que esse controle é geralmente acompanhado de consequências em resposta a tudo aquilo que vai contra ao equilíbrio geossistêmico dos ambientes. É a situação, por exemplo, da extração excessiva de águas por poços em uma cidade, que mesmo dispondo de rios perenes, apresenta águas contaminadas. Ou da aspensão de águas subterrâneas retiradas pelos pivôs centrais para a irrigação de áreas em superfície. Torna-se um problema porque, naturalmente, não há poços escavados que não o sejam pela ação humana e, a depender da configuração hidrogeológica do aquífero, essas águas dificilmente podem ser repostas no tempo de vida humana. Por isso, seria interessante acompanhar o ritmo da energia e matéria que flui na natureza, ou seja, no equilíbrio geossistêmico no ciclo hidrológico, e as perturbações nesse equilíbrio que já existem pela modificação antropogênica, considerando as particularidades na escala de cada bacia hidrográfica. Isso quer dizer, por exemplo, que poderia ser reduzida a dependência de poços e melhorada a quantidade e qualidade do escoamento de base como foco nos rios do

país. A conexão natural entre as águas subterrâneas e superficiais é a resposta das diferentes conexões das componentes constituintes de uma bacia hidrográfica (atmosfera, solos, aquíferos, biodiversidade, etc.).

Conhecer os processos hidrológicos e hidrogeológicos é importante pela análise de dados hidrológicos, mas é preciso relacioná-los com as características naturais da bacia hidrográfica e em como o desenvolvimento do campo e das cidades está interferindo. O que pode influenciar na permanência da vazão nos rios de uma bacia hidrográfica é a disponibilidade de águas nos aquíferos, seja por razões climáticas ou de consumo da água. Além da presença de um clima úmido, com chuvas frequentes, a cobertura do solo interferirá na infiltração das chuvas, ou seja, na recarga dos aquíferos. E é aí que entra o planejamento ambiental do espaço urbano-rural das bacias hidrográficas. Isso quer dizer que a transformação das paisagens, e a sua relação com o planejamento ambiental do espaço urbano e rural, afeta a gestão das águas subterrâneas e superficiais nas bacias hidrográficas.

O crescimento das áreas de desflorestamento no país em virtude do avanço do agronegócio também tem os seus impactos no ciclo hidrológico, modificando o padrão de distribuição das chuvas regionais e continentais, ora ocasionando a sua concentração em pouco tempo, ora a sua falta em uma escala de tempo maior. No modelo econômico e hegemônico do Brasil (urbano/agroexportador), a influência na disponibilidade do escoamento de base se reflete na forma como a urbanização das cidades está associada à expansão das áreas produtivas, com atividades agrícolas e pecuárias especializadas, avançando sobre biomas que até então eram constituídos por florestas primárias e em estágio de clímax. A modificação intensa do uso e cobertura da terra em função da ampliação dessas áreas do agronegócio acarreta consequências locais e regionais na variabilidade do escoamento de base das bacias hidrográficas.

É o caso, por exemplo, das veredas situadas em vales no Cerrado, que chegam a secar e tornam-se contaminadas pela conversão das chapadas, áreas naturalmente de recarga, em áreas agrícolas, agravado pela captação nos aquíferos de águas dos fluxos subterrâneos por pivôs centrais nos sistemas de agricultura irrigada em superfície. Em 35 anos de análise da ocupação pelo agronegócio no Cerrado, estima-se que tenha havido uma redução na ordem de 49,2% na alimentação do Rio São Francisco pelo Sistema Aquífero Urucuia. Dessa maneira, o impacto na variabilidade do escoamento de base pela urbanização e pelo agronegócio não é apenas ditado pela demanda produtiva interna do país, mas também é

operado pela conexão e circulação com outros lugares e regiões do planeta que firmam acordos comerciais por *commodities* (EGGER *et al.*, 2021).

4.5.2 A segurança hídrica é uma questão de *déficit* hídrico e do modelo civilizatório

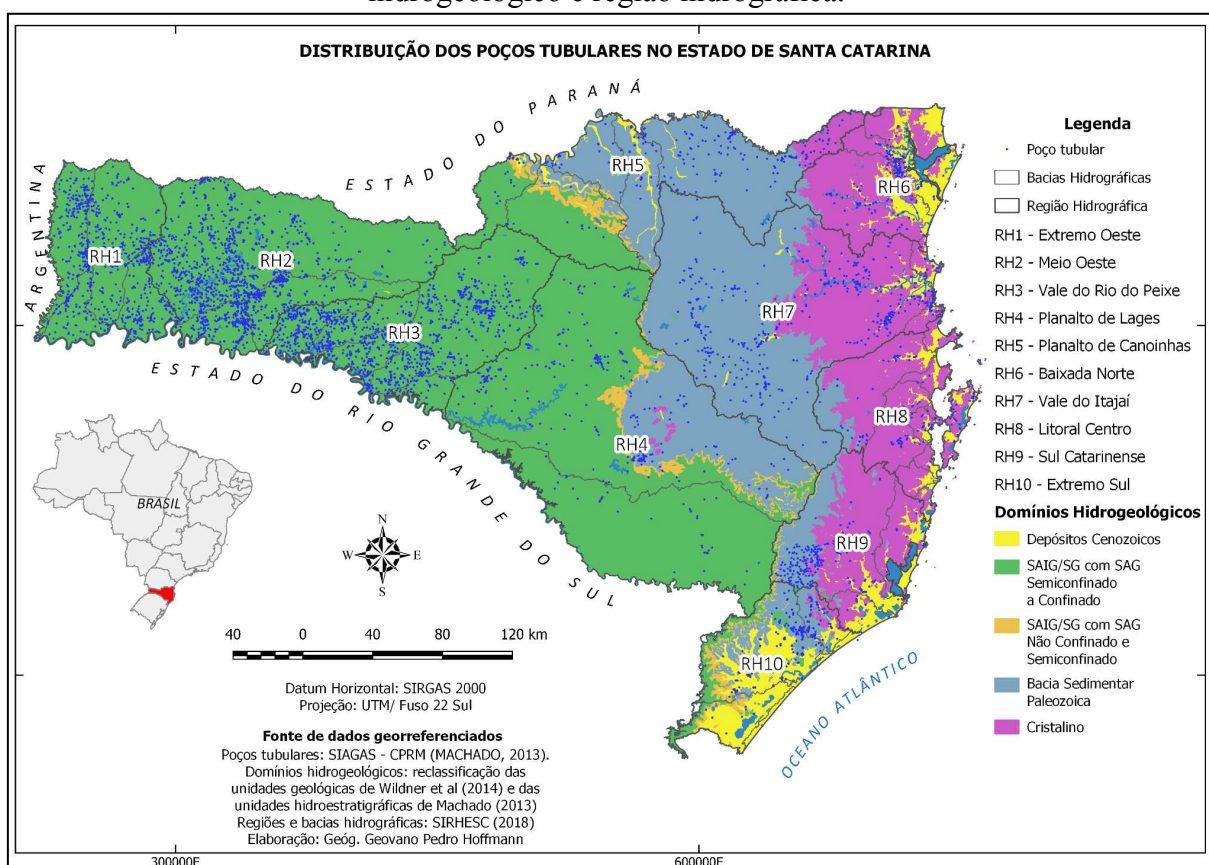
O escoamento de base é duradouro, mas isso não significa que seja permanente. Quando se pensa na disponibilidade de águas ao longo do tempo (hidrograma), verifica-se que há um decaimento do fluxo de águas, especialmente naquelas bacias hidrográficas supridas por fluxos locais e intermediários. Ou seja, em situações de estiagem ou seca, as bacias hidrográficas terão uma resposta hidrológica diferenciada, com algumas delas apresentando um maior ou menor tempo de duração desse fluxo, a depender da configuração do armazenamento nos aquíferos. Determinadas bacias hidrográficas, em sua condição natural, apresentam uma tendência de reter mais ou menos águas do que outras, exigindo uma gestão dessas águas também diferenciada conforme o domínio hidrogeológico. Além disso, captações por poços e diretamente dos rios afetam o tempo da disponibilidade das águas do escoamento de base, bem como o descarte de resíduos gerados pelos agronegócios, indústrias e cidades, que poluem significativamente, no momento da recarga das águas ou no descarte diretamente nos cursos d'água.

O escoamento de base é um indicador hídrico superficial, tendo em vista que constitui a interface entre os períodos chuvosos e os períodos secos, e cuja característica intrínseca da água é ser finita no tempo. Essa finitude também se aplica ao seu armazenamento em diferentes rochas e que, quando não é repostada, leva à escassez de águas na superfície. O problema em nossa sociedade está no fato de que a retirada de águas subterrâneas ocorre na informalidade, de forma que as extrações são realizadas para qualquer interesse, em boa parte das vezes, de maneira irregular, sem contar a introdução de contaminantes ou dos casos de águas que naturalmente são impróprias para consumo. São essas mesmas águas que deveriam ser usadas, cautelosamente, nas situações de eventos climáticos extremos, já que cumpririam com a função de reserva e onde o ciclo hidrológico exige um tempo maior para a reposição através das recargas subterrâneas. Ainda mais por essa razão é que as atenções precisam ser dadas ao aumento do tempo de duração e do volume do escoamento de base, para reduzir a extração e a contaminação dessas águas e permitir o melhor aproveitamento das águas superficiais alimentadas pelos fluxos subterrâneos com o

maior tempo possível e considerando, além disso, os conflitos de uso inerentes. É preciso evitar que os rios, até então perenes, tornem-se intermitentes.

O esgotamento do escoamento de base é o estado mais crítico de disponibilidade de águas em uma bacia hidrográfica. É o cenário que se deseja evitar. Apesar disso, o tempo de diminuição até a interrupção por completo gera inúmeros conflitos hídricos pela redução da disponibilidade. O número e a distribuição de poços (Figura 77) é uma evidência da dificuldade de acesso às águas superficiais, pela falta de qualidade necessária para determinados usos ou pela insuficiência da oferta em quantidade. Na falta das águas superficiais, tem-se a intensificação da extração das águas subterrâneas por poços, contribuindo para o esvaziamento dos aquíferos durante os períodos de seca e estiagens.

Figura 77 – Mapa de distribuição de poços tubulares no Estado de Santa Catarina por domínio hidrogeológico e região hidrográfica.



Fonte: Elaboração própria.

No Estado de Santa Catarina, até maio de 2023, dos 8.259 poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS (CPRM, 2023), 28% (2.287 poços) estavam situados nas regiões hidrográficas da Vertente Litorânea ou do Atlântico Sul-Sudeste, que compreendem os domínios hidrogeológicos Depósitos Cenozoicos, Cristalino e Bacia

Sedimentar Paleozoica (RH6, RH7, RH8, RH9 e RH10). Em contrapartida, na Vertente do Interior, que compreende os dois domínios hidrogeológicos do SAIG/SG (com SAG Não Confinado e Semiconfinado; e, em maior área de afloramento, o SAG Semiconfinado a Confinado - RH1, RH2, RH3, RH4 e RH5) e parcialmente na Bacia Sedimentar Paleozoica (RH4 e RH5), há mais poços. Parte deles, 69% (5.667 poços), na área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai, e o restante, 3% dos poços (251 registros), na área de drenagem dos afluentes da Bacia Hidrográfica do Rio Paraná (RH5).

A maior quantidade de poços na área de drenagem dos afluentes da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai não é explicada unicamente pela sua extensão abrangente no estado. É também perceptível a concentração desses dois terços de pontos de extração de águas dos aquíferos de Santa Catarina, especialmente nas regiões hidrográficas do Extremo Oeste (RH1), Meio Oeste (RH2) e Vale do Rio do Peixe (RH3), frequentemente afetadas pelos episódios de estiagens, secas e o quadro de poluição dos cursos d'água pelas sedes urbanas e o agronegócio. Reflexo de uma gestão de uso e cobertura da terra que privilegia a expansão de atividades econômicas, conforme mostrado na avaliação físico-temporal do IGEB para o caso da bacia hidrográfica representativa de Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado.

Nesse sentido, a realidade é que boa parte dos municípios de Santa Catarina são abastecidos por poços, com uma distribuição concentrada principalmente nas regiões Extremo Oeste, Oeste e Meio-Oeste do estado, onde há uma dependência de extração de águas exacerbada dos aquíferos, mesmo sendo, conforme Monteiro e Mendonça (2005), as regiões de maior volume de chuvas no estado. Esses poços são usados diretamente nas cadeias produtivas agroindustriais e nas cidades para amenizar os efeitos das estiagens e secas, assim como para contornar a questão da poluição hídrica ao longo dos cursos d'água.

Transposição de águas entre bacias hidrográficas, excesso na concentração de poços tubulares e pivôs centrais de irrigação, presença de contaminantes, encurtamento da duração e do volume do fluxo de base em uma bacia hidrográfica são sinais de que os aquíferos não estão incorporados na gestão de águas. Aliados à supressão da vegetação original, esses são fatores que podem diminuir consideravelmente a oferta hídrica na forma da disponibilidade de escoamento de base. Fazem as águas subterrâneas deixarem de ser uma opção para tornarem-se uma decisão prioritária no abastecimento urbano e nas atividades econômicas vinculadas ao agronegócio. Bacias hidrográficas dependentes do suprimento de aquíferos livres são as que mais refletem essa situação, já que a alimentação ocorre principalmente por

fluxos subterrâneos locais. Assim, a gestão de águas exige uma preparação para o enfrentamento de situações de comprometimento do armazenamento subterrâneo e, como consequência, do superficial.

A gestão de águas não é apenas em particular das águas e, menos ainda, nem apenas das águas superficiais, mas também engloba a gestão ambiental das bacias hidrográficas e a gestão territorial das cidades e do campo. O planejamento das situações desejadas para a bacia hidrográfica de interesse tem como orientações fundamentais uma legislação própria das águas (Lei das Águas e Resoluções do CNRH), mas que devem ser compatíveis com a legislação ambiental, tal como o Código Florestal, e os planos diretores municipais e os planejamentos regionais. Todos eles têm em comum o papel de estabelecer restrições de uso e ocupação do solo para possibilitar a manutenção das atividades urbanas e rurais com o menor impacto sobre ou a partir dos recursos naturais, como solo, ar, biodiversidade e águas. Como normativas, as resoluções do CNRH são as únicas que, até hoje, mencionam diretamente e alicerçam a regulação da interação entre águas subterrâneas e superficiais no Brasil, abrindo discussão para um dos hiatos deixados pela própria Lei das Águas: a importância dos aquíferos para o escoamento de base dos rios.

Especificamente no caso das águas é comum haver normas que destacam a contaminação de águas superficiais e subterrâneas em atividades domésticas, rurais e industriais (Resoluções CONAMA) e a outorga de recursos hídricos com um aparato jurídico próprio de cada estado do país. Entretanto, a disponibilidade hídrica durante os períodos de estiagem não recebeu a atenção na legislação vigente. Nesse sentido, a gestão de águas apresenta falhas de tomadas de decisão e também de compreensão sobre as conectividades entre as águas que escoam pelos rios e as águas que circulam pelos aquíferos subjacentes. Em uma abordagem geossistêmica de gestão de águas, a prioridade seria de maximizar a disponibilidade do escoamento de base (volume e duração) nos períodos sem chuvas ou a continuidade de vazões por mais tempo. Essas condições dependem de medidas de longo prazo, como o avanço no estágio de sucessão ecológica/florestal do bioma onde a bacia hidrográfica está situada e novas práticas econômicas conservacionistas.

O princípio da precaução admite que cenários inimagináveis podem acontecer, como secas históricas, sendo preciso se antecipar às situações extremas de estresse hídrico, onde os rios e os reservatórios de captação de água e de energia hidrelétrica podem atingir níveis críticos, perceptíveis em nível regional no Brasil nos últimos anos e especialmente nas maiores bacias hidrográficas em extensão. Situações como o uso do “volume morto” das

represas para o abastecimento urbano, como ocorreu no estado de São Paulo, seriam um concludente exemplo de como se chegou ao extremo na região Sudeste, situada em um país que concentra uma boa parcela das águas do planeta. Há de se pensar em estratégias que permitam melhorar a segurança hídrica. Isso significa melhorar a disponibilidade do escoamento de base, justamente com um planejamento de longo prazo de enfrentamentos para esses momentos em que não chove durante estações secas prolongadas, quando em uma considerável quantidade de meses não ocorre precipitação ou nos quais as chuvas tornam-se irregulares em intensidade, frequência e distribuição espacial.

Medidas como a transposição de água de outras bacias hidrográficas são formas de se obter águas para o abastecimento doméstico e das indústrias. No decorrer de algumas décadas, mostram-se insustentáveis, pelos custos operacionais e pela questão de que as próprias bacias hidrográficas de captação em algum momento ultrapassam a condição de suprimento de disponibilidade hídrica, seja pelo escoamento de base, seja pela extração de água através dos poços. A alta demanda por água é um problema, principalmente nas áreas metropolitanas, com uma tendência de aumento, tendo em vista o crescimento urbano acelerado. Nem sempre águas de uma única bacia hidrográfica são suficientes para suprir a demanda para os diferentes usuários, de maneira que a transposição de águas passa a gerar conflitos de uso em outras bacias hidrográficas vizinhas e cada vez mais distantes da área de consumo, até o momento em que poderá ser uma medida inviável.

A bacia hidrográfica geralmente personifica a circulação das águas e, por isso, a depender da escala geográfica de alcance do suprimento pelo sistema de fluxos subterrâneos (locais, intermediários e/ou regionais), é a melhor unidade de gestão para a garantia da perenidade. A segurança hídrica deveria ser pensada considerando a diversidade de alternativas existentes, que podem ser complementares entre si, como a preservação das áreas úmidas, o reúso da água, o controle de perdas das redes de abastecimento, a extração de águas dos aquíferos apenas em momentos estratégicos e a proteção das áreas de recarga.

4.5.3 A gestão de águas precisa ser integrada, integradora e participativa

O modelo de gestão de águas vigente no Brasil tem a sua consolidação no aspecto de integração. A organização integrada é verificada na matriz institucional do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), entre os órgãos normativos/deliberativos e os órgãos executivos nacionais e estaduais, através dos

instrumentos de planejamento e controle administrativo previstos na Lei das Águas (BRASIL, 1997). Apesar da gestão de águas no país ser integrada do ponto de vista dos órgãos que a compõem, ela não é inclusiva da sociedade a ponto de atrair a atenção e a ação das pessoas nessa temática. A descentralização da gestão de águas é prevista na Lei Federal nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997), devendo ter “a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades”.

No modelo atual de gestão de águas no Brasil, a descentralização está sujeita à composição na forma dos comitês de bacia hidrográfica, unidades básicas do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Onde ainda há ausência de atuação do SINGREH, a gestão é controlada de forma setORIZADA pelas companhias de abastecimento de água ou pelas prefeituras municipais (RGSG, 2020). Grande parte da população desconhece a importância da participação coletiva, enquanto outra parcela detém o poder de manipulação nas decisões pelos próprios interesses privados. Por isso, uma gestão de viés participativo abrangeria a inclusão da sociedade em um espaço que é devidamente público a fim de que os comitês de bacia hidrográfica pudessem agir efetivamente como um fórum integrador de políticas e de discussões (KEMERICH, RITTER e DULAC, 2014) em detrimento da influência explícita de determinados grupos políticos e econômicos nas tomadas de decisão (WOLFF e MARCHINHACKI, 2013).

A inclusão participativa na gestão de águas envolve, ao mesmo tempo, uma questão da categoria de escala geográfica. Isso porque a atuação torna-se mais restritiva nos comitês pela população que habita uma bacia hidrográfica compartilhada em gestão de âmbito nacional ou estadual do SINGREH. A atuação a partir da escala do lugar, com os conhecimentos e saberes de vivência no ambiente físico e social em que se encontra, permitem os questionamentos, a adaptação e/ou a proposição de outras soluções do que aquelas que, muitas vezes, podem ser impositivas pelo poder decisório direcionado pelos setores produtivos e dos grandes usuários de águas.

Apesar do atual modelo de gestão de águas no país ser considerado de caráter participativo em comparação aos modelos anteriores, com representação da população civil nos comitês de bacia hidrográfica, não é permitida a inclusão participativa direta nas decisões. Ou seja, a descentralização na gestão de águas é institucionalizada administrativamente até o nível dos comitês de bacia hidrográfica, porém, de certa forma, torna-se um impeditivo para que as posições das comunidades e dos cidadãos sejam percebidas, discutidas e/ou atendidas. Assim, depende do que cada representação no comitê de bacia hidrográfica procura de

envolvimento com esse público. O envolvimento representa um somatório de forças para o debate de ideias e, sobretudo, para a implementação de ações de melhoria das condições de proteção e conservação de águas. É necessário compreender que os habitantes da bacia hidrográfica são agentes que poderão ser potenciais multiplicadores para outras comunidades ou cidadãos que não tem o mesmo engajamento.

A discussão da interação aquífero-rio emerge nesse contexto de uma gestão integrada de águas que requer o avanço da participação popular, com atuação local e articulada à gestão das bacias hidrográficas. A incorporação normativa recente sobre as avaliações hidrológicas integradas, pela Resolução nº 202, de 28 de junho de 2018 (CNRH, 2018), indica a obrigatoriedade de constarem dados e informações sobre o comportamento do escoamento de base nos planos de recursos hídricos. É um avanço inédito no ordenamento jurídico sobre a indissociabilidade de águas subterrâneas e superficiais, tornando integradora a gestão de águas. Contudo, é preciso avaliar o que pode ser feito com esses dados e informações se estiverem somente compreensíveis aos profissionais com formação acadêmica especializada ou a uma parcela de representantes nos comitês de bacia hidrográfica.

A água não deveria ser tratada isoladamente como se fosse um assunto apenas de especialistas (PORTO-GONÇALVES, 2005). As soluções técnicas partem da noção do ciclo hidrológico, porém costumam colocar a natureza e a sociedade dissociadas, como se as pessoas, organizadas em uma sociedade, não tivessem nenhuma relação com a crise da água (PORTO-GONÇALVES, 2011). O conhecimento sobre os mananciais, especialmente dos aquíferos, continua muito limitado ao campo científico, à esfera dos governos e das agências de concessão de águas. Muitas vezes, a população não tem acesso a esse conhecimento, inclusive de noções básicas sobre as águas subterrâneas e do ciclo hidrológico. A consequência é que também não é construído um sentimento de pertencimento e de defesa dos aquíferos como um patrimônio ambiental, tornando-os invisíveis (CASTILHO-BARBOSA *et al.*, 2020).

Nesse sentido, a inclusão da sociedade abarca a gestão em um nível que não se encontra na hierarquia de instâncias da matriz do SINGREH, a da autogestão cidadã. Refere-se a um nível de gestão de águas no âmbito das comunidades, que ocorre tanto em espaços urbanos quanto rurais, ou no âmbito de percepção de um cidadão e sua unidade familiar, como em uma propriedade, por exemplo. Distingue-se de um comitê de bacia hidrográfica, especialmente quanto à atuação em uma escala geográfica local de percepção da comunidade ou do cidadão; ao uso de recursos; à execução; e à maneira que as decisões são

tomadas (Quadro 31). Uma forma de autogestão cidadã é através do abastecimento de água. Segundo Santos e Santana (2020), estima-se que no Brasil, cerca de 31 milhões de pessoas dependam de serviços de abastecimento de água no meio rural por soluções coletivas de gestão comunitária ou individuais.

Quadro 31 – Diferenças na perspectiva entre a gestão realizada pelo comitê de bacia hidrográfica e pelo cidadão.

Perspectiva do comitê de bacia hidrográfica	Perspectiva do cidadão/comunidade
Gestão realizada na escala de bacia hidrográfica	Gestão realizada a partir da escala de percepção do cidadão
Uso de recursos financeiros provenientes da agência de águas e/ou repasses de fundos estaduais	Uso de recursos financeiros próprios
Realizada por representantes	Executada pelo cidadão
Replica as leis definidas nas esferas federal e estadual e define o plano de bacias	Segue as diretrizes do plano de bacia hidrográfica definido pelo comitê
Gestão participativa por representações em cadeiras limitadas	Gestão protagonista, descentralizada e participativa

Fonte: Adaptado de RGSG (2020, p. 114-115).

No estado de Santa Catarina, um exemplo de autogestão de águas são as associações de águas do município de São Pedro de Alcântara/SC, como verificado por Virtuoso (2014). Cerca de quatro associações autônomas realizam o abastecimento público descentralizado à população urbana do município. Em duas das quatro microbacias hidrográficas analisadas, a captação superficial e distribuição de águas brutas a partir de microbacias hidrográficas com a predominância de áreas florestais mostrou que havia o atendimento aos padrões de qualidade quanto à potabilidade da legislação na época (a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde e a Resolução CONAMA nº 357/2005). Além disso, informação verbal repassada por um dos operadores desses quatro sistemas é de que, diante de um período de estiagem de aproximadamente 40 dias, houve a garantia do escoamento de base para a oferta de águas sem haver interrupção, demonstrando a importância da conservação de recursos naturais em áreas de captação.

Conforme RGSG (2020), mesmo com distinções, as perspectivas da comunidade/cidadão podem ser complementarmente integradas às perspectivas dos comitês de bacia hidrográfica, uma vez que o cidadão/comunidade e os comitês de bacia hidrográfica estão sob a tutela do mesmo dispositivo legal (Lei das Águas) que estabelece o planejamento por bacias hidrográficas. Em Santa Catarina, o exemplo mais próximo dessa condição de relação entre Estado e comunidades voltada à conservação das águas já implementado foi o Programa Microbacias, executado em duas fases.

Usando como referência os trabalhos para manejo de solo e da água em microbacias hidrográficas do estado do Paraná, desenvolvidos a partir do final da década de 1970, Santa Catarina adaptou a metodologia após as intensas enchentes ocorridas nos anos de 1983 e 1984, através da extensão rural (SIMON, 1993). As atividades do Programa seguiram até 2017, com o encerramento do Projeto SC Rural (RGSG, 2020).

A primeira experiência do Microbacias 1 foi realizada em microbacias-piloto na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí, a partir de 1984, estendendo-se, mais tarde, para 68 municípios em Santa Catarina, contemplando uma por município. Considerou-se que uma das maiores fragilidades na primeira fase foi, justamente, a falta de inclusão social. Desse modo, em meados dos anos de 1990 foi lançada a segunda fase, denominada de Programa de Recuperação Ambiental e de Apoio ao Pequeno Produtor Rural - Prapem/Microbacias 2, ou simplesmente Projeto Microbacias 2, tendo sido executada entre 2002 e 2008. O Programa teve uma abrangência e interinstitucionalidade atípicas. Envolveu cerca de 880 microbacias hidrográficas, representando quase metade da quantidade de microbacias no estado, distribuídas por quase todos os municípios catarinenses, abrangendo 105 mil famílias rurais. Foi um projeto executado pelo Governo de Santa Catarina e financiado pelo Banco Internacional para a Reconstrução e o Desenvolvimento (BIRD), mais conhecido como Banco Mundial, sob a responsabilidade de diversas organizações públicas estaduais, tendo a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) como a principal executora. Apesar de ter sido só parcialmente atendido, o objetivo era o empoderamento das representações das famílias rurais em relação aos agentes públicos e privados com os quais se relacionavam, nas atividades comunitárias em cada localidade para o desenvolvimento rural. Na instância de nível da microbacia, a gestão ocorria através da chamada Associação de Desenvolvimento da Microbacia (ADM), formada por uma diretoria eleita de forma democrática pelas famílias residentes (MARCONDES, 2011).

Trata-se de situar, não somente os gestores, mas também as comunidades e os cidadãos no ciclo hidrológico, do qual também fazem parte, modificam e sentem as consequências da falta de um planejamento geossistêmico, com cada um possuindo um poder de ação dentro da sua própria escala geográfica de alcance. O acesso às informações sobre a situação do escoamento de base permite a garantia da perenidade dos aquíferos pelo protagonismo das pessoas empenhadas em querer melhorar as condições hidrológicas da bacia hidrográfica a partir do local onde habitam. No caso da metodologia proposta no presente estudo, implica em atentar-se à disponibilidade do escoamento de base mediante às mudanças

de longo prazo nas paisagens a partir das configurações de uso e cobertura da terra. Nesse sentido, a gestão não deveria ser apenas das águas, mas também uma gestão das pessoas para a condução a um pensamento geossistêmico e ao desenvolvimento social para a sustentabilidade ambiental dos aquíferos e das bacias hidrográficas.

Dessa maneira, é possível delinear uma gestão sistêmica de águas que seja **integrada** (institucional entre as entidades do sistema de gestão), **integradora** (entre as águas superficiais e as águas subterrâneas) e também **participativa** (com a participação de todos), inclusive com a possibilidade de autogestão cidadã. Para isso, além de uma base de dados confiável, também é necessário que ela seja de fácil acesso e interpretação aos diferentes públicos. A metodologia aqui proposta pode ser usada como um dispositivo de sensibilização e de mobilização na sociedade a partir da pesquisa científica, ao passo que tem a capacidade de ser uma ferramenta que facilita a divulgação de dados e a comunicação de resultados a respeito da abordagem de associação entre as águas subterrâneas e superficiais.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Analisando os resultados produzidos e discutidos no presente estudo, é possível afirmar que a hipótese levantada de que a metodologia proposta de integração entre variáveis ambientais para a avaliação da interação entre águas subterrâneas e superficiais em diferentes domínios hidrogeológicos possibilitaria indicar a disponibilidade do escoamento de base ao longo do tempo em bacias hidrográficas representativas de domínio hidrogeológico foi confirmada. A aplicação do Índice Geoambiental do Escoamento de Base (IGEB) usa um cenário de condição natural simulada como balizador da disponibilidade hídrica do escoamento de base em cada bacia hidrográfica representativa de domínio hidrogeológico. O IGEB foi atribuído às bacias hidrográficas representativas dos domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina a partir do conjunto de cenários observados das variáveis Velocidade Média do Escoamento Superficial (VmES) global e dos respectivos períodos de abrangência do Índice do Fluxo de Base (BFI) médio global. A seguir são apresentadas as conclusões da presente pesquisa quanto às vantagens de uso da metodologia desenvolvida no presente estudo, as implicações da execução dessa metodologia na gestão de águas por bacia hidrográfica e as limitações encontradas.

5.1.1 Vantagens de uso da metodologia desenvolvida no presente estudo

- Entende-se que a oscilação das vazões mínimas nas bacias hidrográficas representativas usadas nas estimativas do BFI médio anual por domínio hidrogeológico representa o saldo do balanço hídrico de cada bacia hidrográfica representativa, e considera a influência das variações de longo prazo nos dados de entrada (precipitação), ao menos, para o período 1981-2018, e que resultaram nos dados do IGEB.
- O IGEB permite a avaliação da disponibilidade de águas nas bacias hidrográficas com uma relação inversamente proporcional entre o escoamento de base, ou seja, o fluxo de descarga de águas proveniente dos aquíferos durante os períodos secos (BFI médio global); e as condições de recarga subterrânea deduzidas indiretamente pela influência humana nas paisagens que constituem a cobertura da terra nas bacias hidrográficas (VmES global), mesmo com as limitações intrínsecas da metodologia proposta. Ou seja,

quando estabelecida uma condição natural simulada em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), traduzida por uma VmES global desse cenário simulado, bem como estipulado o respectivo BFI médio global da condição natural a partir dos cenários observados de VmES global da bacia hidrográfica, a relação inversamente proporcional é incorporada como uma técnica de estimativa que identifica quanto e como as ações humanas comandam a manutenção de águas na paisagem pela aferição do escoamento superficial gerado com o avanço das modificações antropogênicas sobre a vegetação nativa, substituindo as florestas e campos nativos por silvicultura, pastagens, áreas cultivadas e áreas urbanizadas.

- Houve a estimativa de um cenário balizador de disponibilidade do escoamento de base (condição natural) usando a própria série de dados de vazão, nos períodos de recessão, entre 1981 e 2018, da contribuição dos domínios hidrogeológicos do estado de Santa Catarina (BFI) para as respectivas bacias hidrográficas representativas. Assim, verificaram-se distintos padrões espaciais do escoamento de base no estado de Santa Catarina, pelo uso das mesmas variáveis ambientais e para um mesmo intervalo de tempo, com a aplicação da metodologia em domínios hidrogeológicos. Portanto, o emprego de domínios hidrogeológicos viabiliza a diferenciação do comportamento do BFI na metodologia de quantificação do escoamento de base para as bacias hidrográficas, envolvendo, assim, uma abordagem multidisciplinar entre Hidrologia, Hidrogeologia e Geografia.
- A metodologia desenvolvida, expressa em sua forma final no IGEB, desempenha um papel pedagógico e orientativo na avaliação físico-temporal da disponibilidade do escoamento de base, pela necessidade comparativa da disponibilidade hídrica entre os cenários observados com um cenário de condição natural simulada, pouco explorada em modelos hidrológicos no Brasil. Isso porque a avaliação demonstra que a contribuição dos aquíferos às bacias hidrográficas, mensurada através do BFI médio global, pode ser drasticamente alterada frente às mudanças antropogênicas na condição natural da cobertura vegetal, como foi para o intervalo de 37 anos de dados para a maioria das bacias hidrográficas representativas usadas no presente estudo.
- Os dados e os *softwares* usados no desenvolvimento do IGEB são livres e disponíveis gratuitamente em instituições oficiais, sendo este um estímulo ao seu uso por equipes técnicas de gestão de águas.

- A metodologia pode ser aplicada em bacias hidrográficas de outros estados do Brasil e/ou outras regiões do planeta, bastando ter os dados disponíveis e considerar as limitações intrínsecas. Dentre elas, que os aquíferos, na maioria, estão em condição livre; e que as bacias hidrográficas representativas usadas estão sob clima subtropical, dispondo de excedente hídrico durante boa parte do ano.

5.1.2 Implicações da execução da metodologia na gestão de águas por bacia hidrográfica

- A metodologia de identificação do comportamento do escoamento de base por domínio hidrogeológico, e que se traduz pela matriz semafórica do IGEB, mostra-se como uma ferramenta efetiva de suporte à decisão aos comitês de bacia hidrográfica para a gestão de águas e de apoio territorial aos gestores municipais e estaduais. É, inclusive, de simples compreensão para um público leigo com o uso de cores e atributos que indicam a melhora ou a piora da disponibilidade do escoamento de base ao longo do tempo.
- De certa forma, a metodologia proposta evidencia que os problemas de disponibilidade hídrica com a seca prolongada não são explicados somente pela irregularidade da distribuição espacial e temporal da precipitação. A avaliação do IGEB permite mensurar, indiretamente, se as políticas de ordenamento territorial estão sendo eficazes na garantia da disponibilidade para um melhor enfrentamento nos momentos de estresse hídrico. Sobretudo, se esse ordenamento está surtindo efeito ou não conforme as particularidades do planejamento regional com a hidratação das paisagens nas quais a bacia hidrográfica está inserida.
- A avaliação da disponibilidade físico-temporal do escoamento de base pode ser usada para comparar bacias hidrográficas, independentemente do domínio hidrogeológico, e verificar quais delas requerem uma atenção prioritária para o restabelecimento da disponibilidade hídrica do escoamento de base. Por exemplo, verifica-se uma provável situação de piora do escoamento de base para as bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina com o avanço extensivo do mesmo modelo econômico existente sobre as áreas de vegetação nativa. Com a aplicação do IGEB, podem ser permitidas ou restringidas determinadas atividades, como o direcionamento do crescimento de cidades, o estabelecimento de indústrias ou de áreas agrícolas e, igualmente, operações nas áreas de

recarga e descarga de águas, como as perfurações de poços, em função da distribuição da VmES específica.

- Dificilmente, uma bacia hidrográfica modificada retornará a um cenário de condição natural. Entretanto, é possível uma aproximação à situação sustentável do IGEB a partir do manejo dos usos da terra que estimulem aqueles de menor VmES na maior área possível, especialmente em áreas planas. Por isso, as florestas e outras áreas de formação natural são elementos centrais para manter o escoamento de base por mais tempo nas bacias hidrográficas e, por isso, estão incluídas como cenários de condição natural na metodologia para mensurar o escoamento de base. A regeneração, a preservação ou a conservação de áreas de vegetação nativa de uma bacia hidrográfica podem ser usadas como exemplos imprescindíveis para a melhoria da disponibilidade hídrica a partir da manutenção da interação aquífero-rio pela recarga dos aquíferos subjacentes.

5.1.3 Limitações da metodologia desenvolvida

- A própria ausência de dados observados do BFI para os cenários balizadores das bacias hidrográficas representativas é uma limitação da metodologia, ao passo que se torna necessário simular a condição natural para obter BFI médio global natural.
- A estimativa e diagnóstico do IGEB em outras bacias hidrográficas poderá ter influência do represamento de águas do escoamento de base (por usinas hidrelétricas, Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCHs, barragens de contenção de enchentes, reservatórios de abastecimento de águas, transposição entre bacias hidrográficas etc.) e a extração de águas não controlada por bombeamento de poços (pontualmente por grandes usuários de águas ou de forma difusa pela soma de sistemas de captação individuais) durante os períodos de recessão. Nesse sentido, uma questão que fica em aberto é como estimar o BFI global da condição natural para essas bacias hidrográficas, o qual pode ser induzido pelas atividades humanas. No presente estudo, o caso mais semelhante é o da bacia hidrográfica representativa do Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos, onde é realizado o manejo das águas pela rizicultura.
- Há uma longa lacuna temporal entre o cenário de condição natural simulada e os cinco cenários de dados observados para as bacias hidrográficas do presente estudo. Em razão disso, apesar de se partir de uma relação inversamente proporcional entre as variáveis VmES global e o BFI médio global, não é possível aplicá-las em regressão linear simples

para regionalização do BFI médio global em bacias hidrográficas sem monitoramento do mesmo domínio hidrogeológico. Apesar do período de 37 anos de dados observados, de uso e cobertura da terra e de vazão das bacias hidrográficas representativas usadas no presente estudo, há outras variáveis que podem estar influenciando nessa escala de tempo, como a oscilação da precipitação ou da taxa de extração de águas através captações de águas superficiais e subterrâneas pelas atividades humanas durante os períodos de recessão de chuvas.

- A heterogeneidade geológica pode influenciar, em diferentes níveis, a contribuição dos aquíferos ao escoamento de base da bacia hidrográfica. Assim, serão exigidas adaptações metodológicas pelo fato de nem todas as bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina estarem abrangidas por um único domínio hidrogeológico, caso seja realizada a regionalização das vazões de estiagem para bacias hidrográficas sem monitoramento. Além disso, não foram identificados, e nem contabilizados, os sistemas de fluxos subterrâneos regionais, ou ainda usados modelos que reconhecessem a não-linearidade de outros possíveis mananciais que também podem alimentar as bacias hidrográficas (como as ocorrências de neve, fluxos ascendentes de água, etc.).
- Não houve a interpretação de aerofotografias históricas por conta do período delimitado para as séries de vazão usadas na metodologia desenvolvida. No entanto, considerando os resultados obtidos, as aerofotografias históricas são uma fonte valiosa de dados que podem auxiliar no entendimento da dinâmica do escoamento de base em uma escala temporal maior. Em Santa Catarina, por exemplo, os levantamentos aerofotogramétricos dos anos de 1938, 1957, 1966 e 1978 podem ser usados complementarmente às imagens orbitais, tanto para uma nova interpretação em relação à metodologia proposta, mediante a disponibilidade de dados de vazão para o período abrangido, quanto para os gestores de recursos hídricos no diagnóstico do escoamento de base, quando podem ser estabelecidos cenários com mudanças antropogênicas mais notáveis.
- Deve-se considerar ainda as limitações e escalas cartográficas dos materiais e métodos empregados na estimativa do escoamento de base, por serem também parte das limitações da metodologia proposta.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir são apresentadas as considerações finais da presente pesquisa quanto às perspectivas de estudos que ainda podem ser desenvolvidos e os elementos para o necessário aperfeiçoamento da gestão de águas.

5.2.1 Perspectivas de estudos que ainda podem ser desenvolvidos

- Com base nos resultados da metodologia proposta com o IGEB, podem ser desenvolvidas estimativas sobre como o reflorestamento, com espécies de cada fitofisionomia florestal, impactaria no retardamento do escoamento superficial nos períodos de intensa precipitação e, por consequência, em uma melhor disponibilidade do escoamento de base em cada bacia hidrográfica. A partir disso, podem ser definidas áreas prioritárias de recomposição florestal, de modo a formar corredores ecológicos e de evapotranspiração dentro de cada domínio hidrogeológico, como nos divisores de águas e nos relevos em chapadas. Da mesma forma, poderiam ser criados dispositivos legais voltados à gestão de águas e que contemplassem as particularidades regionais da interação aquífero-rio.
- Apesar do IGEB ter como foco bacias hidrográficas que apresentam séries históricas de vazão, a avaliação do diagnóstico de disponibilidade pode ser aplicada também em bacias hidrográficas sem monitoramento, desde que realizada a regionalização de vazões sob recessão de chuvas (vazões mínimas). Uma replicação da metodologia proposta em bacias hidrográficas de um mesmo domínio hidrogeológico seria o mais adequado para melhor identificar os padrões espaciais do comportamento do escoamento de base, incorporando não somente o uso e cobertura da terra, mas também outras variáveis (a distribuição da precipitação, por exemplo) para a estimativa do BFI.
- No intuito de facilitar a realização do diagnóstico físico-temporal do escoamento de base das bacias hidrográficas nos estados federativos, poderia ser usada também uma ferramenta de algoritmos a fim de proceder com maior agilidade nos cálculos resultantes na classificação do IGEB. Do mesmo modo, torna-se necessário deixar disponível a todos os comitês de bacia hidrográfica possíveis soluções para as bacias hidrográficas que se encontram em condição de piora. Todavia, a condução dessa análise requer profissionais das geociências para a inserção de dados georreferenciados e para estabelecer estratégias particulares a cada bacia hidrográfica que melhorem as condições ambientais de recarga subterrânea.

5.2.2 Elementos para o necessário aperfeiçoamento da gestão de águas

- Do mesmo modo que as águas não são estáticas em permanência ao longo do tempo e em distribuição espacial, a sociedade também não é, podendo haver aperfeiçoamento dos meios convencionais de gestão de águas. Para a garantia da perenidade das bacias hidrográficas, é necessária a incorporação dos princípios da gestão de águas de abordagem geossistêmica como conhecimento a ser compartilhado com os comitês de bacia hidrográfica. É notória a demanda por estratégias de melhoria do armazenamento subterrâneo, confluindo com o tipo de desenvolvimento, ao menos nas bacias hidrográficas representativas de domínios hidrogeológicos analisadas, tendo em vista que o atual modelo já se verifica insuficientemente satisfatório ou sustentável em termos de disponibilidade do escoamento de base. Soluções paliativas para a resolução de conflitos, com um prazo de uso determinado, como a perfuração de poços ou a transposição de águas, não bastam para interromper a degradação ambiental. Por isso, estratégias foram mencionadas ao final do presente estudo, as quais não dependem de tecnologias avançadas, complexas ou caras para a implementação em bacias hidrográficas. Desconsiderar o que apontam os diagnósticos espaço-temporais do escoamento de base do presente estudo é um prejuízo ecossistêmico, social e econômico.
- É natural a resistência cultural na aceitação a novas ideias, que não sejam apenas compartimentadas, tal como a incorporação de uma compreensão físico-temporal das interações aquífero-rio, sob a teoria do ciclo hidrológico, ao invés do uso de critérios puramente econômicos nas tomadas de decisão. A atenção à qualidade ambiental das áreas de recarga dos aquíferos depende diretamente do engajamento para aplicação das estratégias de melhoria da disponibilidade hídrica do escoamento de base usando a gestão do uso da terra como instrumento. E esse engajamento parte, primeiramente, da inovação de uma cultura de gestão de águas que ainda apresenta as suas próprias limitações e contradições. É o caso, por exemplo, da descentralização da gestão de águas, que até o momento costuma ser de gerenciamento centralizado. A gestão de águas nas bacias hidrográficas deveria ter maior envolvimento das comunidades para uma melhor organização da estrutura gerencial; no atendimento aos padrões mínimos de potabilidade; e na assistência técnica, e mesmo financeira, via Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), por exemplo, na gestão de uso e cobertura da terra em áreas de captação dos mananciais.

- Uma gestão geossistêmica das águas considera a gestão da perenidade do ciclo hidrológico, para estender o tempo e o volume das vazões nas bacias hidrográficas mantidas pela interação aquífero-rio, considerando a relação estrita com outros instrumentos de gestão territorial e ambiental do espaço. Da mesma maneira, ela possibilita a noção de que a gestão não é somente das águas em si, como um recurso natural, mas do seu papel ecológico e para a própria vida dos seres humanos.
- Entende-se que existem grupos que detêm as relações de poder em comitês de bacia hidrográfica e que podem não desejar a participação e mobilização social. Do mesmo modo, pode haver a recusa no atendimento da replicação da presente metodologia e das ações para a reidratação das paisagens com fins de aumento da disponibilidade hídrica. Isso dependerá da realidade em cada comitê de bacia hidrográfica, incluindo a situação de maturidade no seu próprio desenvolvimento (estrutural e do plano de recursos hídricos) e também da representatividade dos membros na sua composição. Contudo, assim como a água é única, conectando os diferentes meios em que se encontra no geossistema, a gestão de águas também deveria sê-la, com base em um só tripé articulado, de gestão integrada-integradora-participativa.

REFERÊNCIAS

- ABOELNOUR, M.; GITAU, M. W.; ENGEL, B. A. A comparison of streamflow and baseflow responses to land-use change and the variation in climate parameters using SWAT. **Water**, v. 12, n. 191, p. 1-29, 2020.
- AHIABLAME, L.; CHAUBEY, I.; ENGEL, B.; CHERKAUER, K.; MERWADE, V. Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana USA. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 13-27, 2013.
- AITH, F. M. A.; ROTHBARTH, R. O estatuto jurídico das águas no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 163-177, 2015.
- AKSOY, H.; WITTENBERG, H. Nonlinear baseflow recession analysis in watersheds with intermittent streamflow. **Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 56, n. 2, p. 226-237, 2011.
- ALBUQUERQUE, J. P. T. Água subterrânea no planeta água. **Estudos geológicos**, v. 17, n. 1, p. 23-39, 2007.
- ALLEY, W. M.; REILLY, T. E.; FRANKE, O. L. **Sustainability of ground-water resources**. US Department of the Interior, US Geological Survey Circular 1186, 1999. 79p.
- AMARAL, L. C. M. **Blocos hidrogeológicos do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral em Santa Catarina**. Florianópolis, 2018. 98p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Geociências, 2018.
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). O Comitê de Bacia Hidrográfica: o que é e o que faz? **Cadernos de capacitação em recursos hídricos - volume 1**. Brasília: SAG, 2011. 64p.
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). **Manual Operativo do Programa Produtor de Água**. Agência Nacional de Águas. 2ª Edição. Brasília: ANA, 2012. 92p.
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). **O Progestão em Santa Catarina – Síntese do primeiro ciclo do programa (2014-2018)**. Brasília: ANA, 2019. 20p.
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO). **Sistema de informações hidrológicas HidroWeb**. 2020. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 05 abr. 2020.
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO). **Catálogo de Metadados da ANA - Hidroeletricidade**. Disponibiliza informações sobre o quadro atual do setor elétrico no país, contendo *shapefiles* das Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e Usinas Hidrelétricas (UHEs). 2021a. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/56ac7cb5-aa22-4081-a135-c7fc0938a449>. Acesso em: 05 maio. 2023.

ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO). **Atlas Águas – Segurança Hídrica do Abastecimento Urbano**. Brasília: ANA, 2021b. 332p.

ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021**: relatório pleno. Brasília: ANA, 2022. 132p.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Banco de dados contendo as informações dos empreendimentos de geração de energia elétrica. 2023. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel/source/11ec447d-698d-4ab8-977f-b424d5deee6a>. Acesso em: 05 maio. 2023.

ANTUNES, R. B.; CONSTANTE, V. T. Hidrografia. *In*: OLIVEIRA, I. (org.). **Atlas Geográfico de Santa Catarina**: diversidade da natureza – Fascículo 2. Santa Catarina. Secretaria de Estado do Planejamento. Diretoria de Estatística e Cartografia, 2ª ed. Florianópolis: Ed. da UDESC, 2016. p. 121-140.

ARAÚJO, R. S.; ALVES, M. G.; MELO, M. T. C.; CHRISPIM, Z. M.; MENDES, M. P.; JÚNIOR, G. C. S. Water resource management: A comparative evaluation of Brazil, Rio de Janeiro, the European Union, and Portugal. **Science of the Total Environment**, v. 511, p. 815-828, 2015.

ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. M.; ROSA FILHO, E. F.; LICHT, O. A. B. Contribuição ao estudo da conectividade entre os Sistemas Aquíferos Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG) no Estado do Paraná, Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 71, n. 1, p. 36-45, 2014.

BARBOSA, M. C.; ALAM, K.; MUSHTAQ, S. Water policy implementation in the state of São Paulo, Brazil: Key challenges and opportunities. **Environmental Science & Policy**, v. 60, p. 11-18, 2016.

BARLOW, P. M; CUNNINGHAM, W. L.; ZHAI, T.; GRAY, M. **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**. U.S. Department of the Interior: USGS Techniques and Methods, Livro 3, cap. B10, 2015. 27p.

BARLOW, P. M; CUNNINGHAM, W. L.; ZHAI, T.; GRAY, M. **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: 08 mar. 2023.

BARNES, B. S. The structure of discharge–recession curves. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 20, p. 721–725, 1939.

BART, R.; HOPE, A. Inter-seasonal variability in baseflow recession rates: the role of aquifer antecedent storage in central California watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 205-213, 2014.

BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I. J. M.; MIRALLES, D. G.; DE JEU, R. A.; SAMPURNO BRUIJNZEEL, L. A.; MCVICAR, T. R.; SCHELLEKENS, J. Global patterns in base flow

index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments. **Water Resources Research**, v. 49, n. 12, p. 7843-7863, 2013.

BERHAIL, S.; OUERDACHI, L.; BOUTAGHANE, H. The use of the recession index as indicator for components of flow. **Energy Procedia**, v. 18, p. 741-750, 2012.

BEVANS, H. E. Estimating stream-aquifer interactions in coal areas of eastern Kansas by using streamflow records. **Selected papers in the Hydrologic Sciences: US Geological Survey Water-Supply Paper**, v. 2290, p. 51-64, 1986.

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 em Geologia). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Geociências, 2017.

BLOOMFIELD, J. P.; ALLEN, D. J.; GRIFFITHS, K. J. Examining geological controls on baseflow index (BFI) using regression analysis: An illustration from the Thames Basin, UK. **Journal of Hydrology**, v. 373, n. 1-2, p. 164-176, 2009.

BOHN, N.; GOETTEN, W. J.; PRIMO, A. P. Governança da água subterrânea no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA)**, v. 11, n. 1, p. 33-43, 2014.

BOMFIM, L. F. C. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: concepção e metodologia. *In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 2010, São Luís, MA. Anais [...].* São Luís, MA: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2010

BONGIOLO, A. B. S.; SOARES, A. P.; BITTENCOURT, A. V. L.; FERREIRA, F. J. F. Compartimentação estrutural e conectividade hidráulica dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani: caracterização hidrogeoquímica na região central do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 2, p. 319-333, 2011.

BORGES, L. A. C.; REZENDE, J. L. P.; AVANZI, J. C. Evolution of legal protection of water in Brazil. *In: BILIBIO, C.; HENSEL, O.; SELBACH, J. F. Sustainable water management in the tropics and subtropics - and case studies in Brazil.* RS: Fundação Universidade Federal do Pampa/UNIKASSEL/PGCult-UFMA, 2012. p. 217-234.

BOSCH, D. D.; ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.; LIM, K.; SHIK, Y. Temporal variations in baseflow for the Little River experimental watershed in South Georgia, USA. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 10, p. 110-121, 2017.

BOUSSINESQ, J. Essai sur la théorie des eaux courantes. **Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences**, v. 23, n. 1, 1877.

BOWYER, J.; O'BREE, R. **Rehydrating the landscape at Yanget, Geraldton, Western Australia.** State of Western Australia: Department of Primary Industries and Regional Development, 2021. 9p.

BRAGA, B. P. F.; FLECHA, R.; PENNA, D. S.; KELMAN, J. Pacto federativo e gestão de águas. **Estudos Avançados**, v.22, n.63, p. 17-42, 2008.

BRASIL. **Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 15 jan. 2020.

BRITO NEVES, B. B.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; SILVA, A. B.; BARROS, C. A. F. Geologia e províncias hidrogeológicas de Santa Catarina. *In: XXVII Congresso Brasileiro de Geologia, Resumo das Comunicações - Sessões Técnicas (Hidrogeologia)*, p. 230-233, 1973, Aracaju, SE. **Anais [...]**. Aracaju, SE: Sociedade Brasileira de Geologia (Núcleo Bahia), 1973. Disponível em:

http://acervo.cprm.gov.br/rpi_cprm/docreaderNET/DocReader.aspx?bib=Anais&pesq=provincias%20hidrogeologicas%20de%20santa%20catarina. Acesso em: 12 fev. 2020.

BRITO NEVES, B.B.; SILVA, A.B.; ALBUQUERQUE, J.P.T.; FONTES, C.A. **Geologia e Províncias Hidrogeológicas de Santa Catarina**. Mineração e Metalurgia, p. 22-34, 1979.

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 New Zealand, 2005.

BROOKS, K. N.; FFOLIOTT, P. F.; MAGNER, J. A. **Hydrology and the management of watersheds**. 4ª ed. John Wiley & Sons, 2013. 533p.

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

BURITI, C. O.; BARBOSA, E. M. Políticas públicas de recursos hídricos no Brasil: olhares sob uma perspectiva jurídica e histórico-ambiental. **Veredas do Direito**, v. 11, p. 225, 2014.

CABRAL, J. J. S. P. Movimento das águas subterrâneas. *In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (org.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 77-91.

CALHEIROS, R. D. O.; TABAI, F. C. V.; BOSQUILIA, S. V.; CALAMARI, M. **Preservação e recuperação das nascentes (de água e de vida)**. Piracicaba: Comitê das Bacias hidrográficas dos rios PCJ-CTRN, 2004. 53p.

CAMPOS, V. N. D. O.; FRACALANZA, A. P. Governança das águas no Brasil: conflitos pela apropriação da água e a busca da integração como consenso. **Ambiente & Sociedade**, v. 13, n. 2, p. 365-382, 2010.

CARDOSO, F. B. F.; OLIVEIRA, F. R.; SILVA, M. A.; FLORES, P. M.; PAZ, R. N. **Mapa de Domínios Hidrogeológicos do Estado de Santa Catarina**. Escala 1:1.000.000. Florianópolis: ANA/SDS-SC, 2007a. Disponível em: http://www.sirhesc.sds.sc.gov.br/sirhsc/biblioteca_visualizar_arquivos.jsp?idEmpresa=1&idPasta=864. Acesso em 11 fev. 2020.

CARDOSO, F. B. F.; OLIVEIRA, F. R.; NETO, P. L. V.; PAZ, R. N. Mapa dos domínios hidrogeológicos de Santa Catarina: uma ferramenta para a gestão de águas subterrâneas do

Estado. *In*: XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços e I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste, p. 1-27, 2007, Gramado, RS. **Anais [...]**. Gramado, RS: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2007b.

CARVALHO, Y. M. C.; MORAES, J. F. L.; MENEZES, L. B.; MARTINS, S. S.; PAULO, S. P. A legislação brasileira de recursos hídricos como instrumentalização à gestão compartilhada. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, v. 1, n. 1, p. 112-134, 2008.

CASTILHO-BARBOSA, I. N. B.; CARVALHO, A. M.; MIGUEL, G. F.; CARNEIRO, C. D. R. **Conhecer e conservar aquíferos: como torná-los visíveis?** *Terræ Didática*, v. 16, p. 1-12, e020018, 2020.

CAVAZZANA, G. H.; LASTORIA, G.; GABAS, S. G. Surface-groundwater interaction in unconfined sedimentary aquifer system in the Brazil's tropical wet region. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, p. 1-15, 2019.

CERH-SC (CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS - SANTA CATARINA). **Resolução do CERH nº 02, de 14 de agosto de 2014**. Dispõe sobre o uso das águas subterrâneas no Estado de Santa Catarina. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/mvs/conselho/resolucao/Resolucao_CERH_n_002_Uso_Agua_Subterranea.pdf. Acesso em: 08 abr. 2023.

CERH-SC (CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS - SANTA CATARINA). **Resolução nº 20, de 23 abril de 2018**. Estabelece diretrizes gerais para a instituição e funcionamento das Entidades Executivas que apoiarão o funcionamento dos Comitês de Bacia Hidrográfica, integrantes do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos. 2018a. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/mvs/conselho/resolucao/Resolucao_CERH_n_020_entidades_executivas.pdf. Acesso em: 20 out. 2022.

CERH-SC (CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS - SANTA CATARINA). **Resolução nº 26, de 20 de agosto de 2018**. Dispõe sobre a Divisão Hidrográfica Estadual, em Regiões Hidrográficas e Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos, com a finalidade de orientar e implementar a Política Estadual de Recursos Hídricos. 2018b. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/mvs/conselho/resolucao/Resolucao_CERH_n_026_divisao_hidrografica_estadual.pdf. Acesso em: 20 out. 2022.

CERTI. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina – PERH/SC**: diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos de Santa Catarina. Relatório Técnico Preliminar. Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina. Florianópolis, 2017. 54p.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. **Nature Communications**, v. 13, n. 5136, p. 1-10, 2022.

CHAPMAN, T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. **Hydrological Processes**, v. 13, n. 5, p. 701-714, 1999.

CHENG, Y.; OGDEN, F. L.; ZHU, J.; BRETTFELD, M. Land use-dependent preferential flow paths affect hydrological response of steep tropical lowland catchments with saprolitic soils. **Water Resources Research**, v. 54, p. 5551-5566, 2018.

CHEREPANSKY, M. M.; VSEVOLOZHISKY, 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.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236p.

CHRISTOPHERSON, R. W. **Geosystems**: an introduction to physical geography. 8ª ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2012. 623p.

CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resolução do CNRH nº 09, de 21 de Junho de 2000**. Institui a Câmara Técnica Permanente de Águas Subterrâneas. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 05 fev. 2020.

CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resolução do CNRH nº 15, de 11 de Janeiro de 2001**. Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 05 fev. 2020.

CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resolução do CNRH nº 22, de 24 de Maio de 2002**. Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no instrumento Planos de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 05 fev. 2020.

CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resolução do CNRH nº 32, de 15 de Outubro de 2003**. Institui a Divisão Hidrográfica Nacional em regiões hidrográficas. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 10 out. 2022.

CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resolução do CNRH nº 91, de 5 de Novembro de 2008**. Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos, Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 05 fev. 2020.

CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resolução do CNRH nº 107, de 13 de abril de 2010**. Estabelece diretrizes e critérios a serem adotados para o planejamento, a implantação e a operação de Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo, Quantitativo de Águas Subterrâneas. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 05 fev. 2020.

CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resolução do CNRH nº 126, de 30 de junho de 2011**. Aprova diretrizes para o cadastro de usuários de recursos hídricos e para a integração das bases de dados referentes aos usos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 05 fev. 2020.

CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resolução do CNRH nº 145, de 12 de dezembro de 2012**. Estabelece diretrizes para a elaboração de Planos de

Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas e dá outras providências. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 05 fev. 2020.

CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resolução do CNRH nº 202, de 28 de junho de 2018**. Estabelece diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que contemplem a articulação entre a União, os Estados e o Distrito Federal com vistas ao fortalecimento dessa gestão. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/resolucoes>. Acesso em: 05 fev. 2020.

CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resoluções**. Disponibiliza normas referentes às águas superficiais e subterrâneas. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/cnrh>. Acesso em: 27 abr. 2023.

COELHO, G.; PONTES, L. M.; BATISTA, M. L.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Relação entre o escoamento de base e os diferentes sistemas hidrogeológicos do Estado de Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 3, p. 257-267, 2015.

COITINHO, J. B. L. **Águas minerais de Santa Catarina**. Florianópolis: 2000. 216p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, 2000.

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

COLLISCHONN W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013. 350p.

CONICELLI, B. P. **Gestão das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do Alto Tietê (SP)**. São Paulo: 2014. 164p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, São Paulo, 2014.

COSTA, F. M. **Análise por métodos hidrológicos e hidroquímicos de fatores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas-estudo de casos no Quadrilátero Ferrífero (MG)**. Ouro Preto: 2005. 147f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Ouro Preto, 2005.

COSTA, F. M.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização hidrogeológica de aquíferos a partir do fluxo de base. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, p. 173-183, 2010.

CPRM (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS). **Mapa Hidrogeológico do Brasil**. Escala 1:5.000.000. Nota explicativa. Convênio DNPM-CPRM, 1982. 126p.

CPRM (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS). **Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil**. Escala 1:2.500.000. Projeto SIG de disponibilidade hídrica do Brasil. Rio de Janeiro: CPRM, 2007.

CPRM (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS). **Mapa Hidrogeológico do Brasil**. Escala 1:5.000.000. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. 2014.

CPRM (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS) – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS**. Disponibiliza informações acerca de poços cadastrados no Brasil. 2023. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/>. Acesso em: 17 mai. 2023.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrología subterránea**. 2ª ed. Barcelona: Omega, 1983. 1161p.

DAVIE, T. **Fundamentals of hydrology**. 2. ed. Londres e Nova York: Routledge Fundamentals of Physical Geography, 2008. 221p.

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.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B. M.; SILVA, R. C.; PAULA, T. F. **Manual de cartografia hidrogeológica**. Recife: CPRM, 2014. 119p.

DOWNING, R.A.; WARD, R.S.; BELL, R.A.; PRICE, M. (org.). **Groundwater - Our Hidden Asset**. 2ª ed. British Geological Survey: Keyworth, Nottingham, 2016.

DUNCAN, H. P. Baseflow separation – A practical approach. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 308-313, 2019.

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

ECKHARDT, K. A **comparison** of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 1, p. 168-173, 2008.

EGGER, D. S.; RIGOTTO, R. M.; LIMA, F. A. N. S.; COSTA, A. M.; AGUIAR, A. C. P. Ecocídio nos Cerrados: agronegócio, espoliação das águas e contaminação por agrotóxicos. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 57, p.16-54, 2021.

EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina**. Apresenta dados em formato *shapefile* dos solos do Estado de Santa Catarina. 2004. Disponível: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Alev_sc_estado_solos_lat_long_wgs84. Acesso em: 25 nov. 2022.

EPAGRI (EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA). **Satélite visualiza imagens modificadas pela estiagem no Oeste catarinense**. 2020. Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2020/05/20/satelite-visualiza-imagens-modificas-pela-estiagem-no-oeste-catarinense/>. Acesso em: 01 fev. 2023.

ENGLE, N. L.; LEMOS, M. C. Unpacking governance: building adaptive capacity to climate change of river basins in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 1, p. 4-13, 2010.

FABIANOVICZ, R.; SILVA JUNIOR, G. C. Legislação e políticas de proteção de águas subterrâneas nos cenários nacional e internacional: tendência e resultados práticos. **Geociências**, v. 26, n. 1, p. 07-16, 2007.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). **Base de dados AQUASTAT**. 2016. Apresenta dados sobre recursos hídricos e gestão de água para agricultura. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>. Acesso em: 01 fev. 2023.

FEITOSA, E. C.; FEITOSA, F. A. C. Metodologia básica de pesquisa de água subterrânea. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 179-207.

FERREIRA, B. F. **Mapeamento estrutural-estratigráfico do Permiano Superior da Bacia do Paraná na região de Urubici, SC**. Porto Alegre: 2016. 64f. Monografia (Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Graduação em Geologia, Porto Alegre, 2016.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4 ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001. 615p.

FETTER JUNIOR, C. W. Hydrogeology: a short history, part 1. **Ground water**, v. 42, n. 5, p. 790-792, 2004a.

FETTER JUNIOR, C. W. Hydrogeology: A short history, part 2. **Ground Water**, v. 42, n. 6/7, p. 949-953, 2004b.

FIOROTTO, V.; CARONI, E. A new approach to master recession curve analysis. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 5, p. 966-975, 2013.

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

FITTS, C. R. **Groundwater Science**. 2ª ed. Oxford/New York: Academic Press, 2013. 692p.

FLORESTASC (INVENTÁRIO FLORÍSTICO FLORESTAL DE SANTA CATARINA). **Dados e Mapas**. Programa permanente do Governo do Estado de Santa Catarina, coordenado pela Universidade Regional de Blumenau (FURB) contendo informações atualizadas sobre as florestas catarinenses. 2023. Disponível em: <https://www.iff.sc.gov.br/dados-e-mapas>. Acesso em: 02 fev. 2023.

FORTES, E. **A planície costeira da região de Biguaçu – SC: abordagens dos aspectos ambientais da bacia hidrográfica do Rio Biguaçu**. Florianópolis: 1996. 216 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-graduação em Geografia, Florianópolis, 1996.

FOSTER, S.; AIT-KADI, M. Integrated Water Resources Management (IWRM): how does groundwater fit in?. **Hydrogeology Journal**, v. 20, n. 3, p. 415-418, 2012.

FREEZE, A. R.; CHERRY, J. A. **Águas subterrâneas**. Tradução de Oliveira *et al.* OLIVEIRA, E. (coord.). São Paulo: Everton de Oliveira, 2017. 698p.

FREITAS, M. A.; CAYE, B. R.; MACHADO, J. L. F. **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. 100p.

FREITAS, F. P. A dominialidade das águas subterrâneas no Brasil à luz da Constituição Federal de 1988 e o caso do Aquífero Guarani. **Espaço Jurídico**, v. 7, n. 1, p. 39-54, 2006.

FREITAS, M. J. C. C.; OLIVEIRA, F. H. **Estiagem no Oeste Catarinense**: diagnóstico e resiliência. Relatório Técnico Científico. Florianópolis, 2017. 268p.

FUCK, C. F. R.; PERIN, E. B.; SANTOS, E. V.; CONORATH, G. D.; COMERLATO, T.; MARIMON, M. P. C.; SANTO, M. A. D.; AD-VINCULA VEADO, R. W. Aspectos físicos. *In*: ROCHA, I. O.; MARIMON, M. P. C. **Diagnóstico socioambiental e proposições de planejamento territorial**: Alfredo Wagner e Bom Retiro (Santa Catarina). Florianópolis: Editora UDESC, 2014. p. 14-58.

FUREY, P. R.; GUPTA, V. K. A physically based filter for separating base flow from streamflow time series. **Water Resources Research**, v. 37, n. 11, p. 2709-2722, 2001.

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

GONÇALVES, J. A. C.; SCUDINO, P. C. B.; SOBREIRA, F. G. Reservas renováveis e caracterização dos aquíferos fissurais do Leste da Zona da Mata de Minas Gerais e adjacências. **Geologia USP**, v. 5, n. 1, p. 19-27, 2005.

GONZALES, A. L.; NONNER, J.; HEIJKERS, J.; UHLENBROOK, S. Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. **Hydrology & Earth System Sciences Discussions**, v. 13, p. 2055–2068, 2009.

GOULART FILHO, A. **Formação econômica de Santa Catarina**. 2ª ed. rev. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007. 473p.

GRANZIERA, M. L. M.; GRANZIERA, B. M. Desafios na gestão de águas subterrâneas. *In*: XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 1-14, 2014, Belo Horizonte, MG. **Anais [...]**. Belo Horizonte, MG: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2014.

GREGOR, M.; MALÍK, P. Construction of master recession curve using genetic algorithms. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 60, n. 1, p. 3-15, 2012.

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

HALL, F. R. Base-flow recessions — A review. **Water Resources Research**, v. 4, n. 5, p. 973-983, 1968.

HAMMOND, A.; ADRIAANSE, A.; RODENBURG, E.; BRYANT, D.; WOODWARD, R. **Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development.** Washington, D.C.: World Resources Institut, 1995. 58p.

HEALY, R. W.; WINTER, T. C.; LABAUGH, J. W.; FRANKE, O. L. **Water budgets: foundations for effective water-resources and environmental management.** Vol. 1308. Reston, Virginia: USGS, 2007.

HEATH, R. C. **Basic ground-water hydrology.** US Department of the Interior: US Geological Survey, Water-Supply Paper 2220, 1983. 86p.

HERRAIZ, A. S. La importancia de las aguas subterráneas. **La Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, v. 103, n. 1, p. 97-114, 2009.

HERRMANN, M. L. P.; MENDONÇA, M.; CAMPOS, N. J. São José-SC: Avaliação das enchentes e deslizamentos ocorridos em novembro de 1991 e fevereiro de 1994. **Geosul**, v. 16, p. 46-78, 1993.

HEWLETT, J. D.; HIBBERT, A. R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. **Forest hydrology**, v. 1, p. 275-290, 1967.

HIRATA, R. Recursos hídricos. *In*: TEIXEIRA, W. *et al.*(org.). **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000, p. 421-444.

HIRATA, R.; CONICELLI, B. P. Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84, n. 2, p. 297-312, 2012.

HIRATA, R.; ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial. *In*: BICUDO, C. E. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. (org.). **Águas do Brasil: Análises Estratégicas.** Academia Brasileira de Ciências, Instituto de Botânica, 2010, p. 149-61.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **A revolução silenciosa das águas subterráneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento.** São Paulo: Instuto Trata Brasil, 2019. 35p.

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

HISDAL, H., TALLAKSEN, L. M., CLAUSEN, B., PETERS, E., GUSTARD, A. Hydrological drought characteristics. *In*: TALLAKSEN, L. M.; VAN LANEN, H. A. J. (org.). **Developments in Water Science.** Hydrological Drought - Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater, v. 48. Amsterdam: Elsevier, 2004, p. 139–198.

HOFFMANN, G. P. **Efeitos da modificação do uso da terra sobre o comportamento do escoamento em área de descarga do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral.** Florianópolis, 2017. 259p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2017.

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

HOFFMANN, G. P.; SCHEIBE, L. F.; FRANKE, A. E.; NANNI, A. S. Efeitos da modificação do uso e cobertura da terra no comportamento da recarga e descarga em uma porção do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral. **RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 54, p. 81-101, 2022.

HOFSTE, R. W.; REIG, P.; SCHLEIFER, L. **17 countries, home to one-quarter of the world's population, face extremely high water stress**. Washington, DC, EUA: World Resources Institute, 2019. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/17-countries-home-one-quarter-worlds-population-face-extremely-high-water-stress>. Acesso em: 08 maio. 2023.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 14, p. 446-460, 1933.

HUNSHE, R. T. A proteção das águas subterrâneas no direito internacional e nacional. **Revista de Direito Ambiental**, v. 57, p. 125-188, 2010.

HURDITCH, W. J. Sustainable water and energy management in Australia's farming landscapes. **Geography Bulletin**, v. 51, n. 1, p. 35-42, 2019.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). Manual técnico de uso da terra. 3ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 171p.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Mapa hidrogeológico – Região Sul**. Escala 1:1.700.000. Coordenação de Cartografia/Diretoria de Geociências, 2015. Disponível: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_hidrogeologico_e_hidroquimico/mapas/regionais/sul_hidrogeologico.pdf. Acesso em: 15 jun. 2022.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Malha territorial do Estado de Santa Catarina**. Apresenta arquivos *shapefile* da área de Geociências da instituição para download. 2016. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/>. Acesso em: 14 fev. 2019.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Santa Catarina – Panorama**. Apresenta informações históricas acerca dos municípios do Estado de Santa Catarina. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/panorama>. Acesso em: 01 mar. 2023.

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

IGAM (INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS). **Glossário de Termos e Expressões da Gestão de Recursos Hídricos e Meio Ambiente**. 2ªed. Belo Horizonte: IGAM, 2012. 116p.

INSTITUTE OF HYDROLOGY. **Low flow studies reports**. Institute of Hydrology, Research report n. 1, 1980a. 50p.

INSTITUTE OF HYDROLOGY. **Low flow studies reports**. Institute of Hydrology, Research report n. 3, 1980b. 50p.

IORIS, A. Desenvolvimento nacional e gestão de recursos hídricos no Brasil. **Revista Crítica de Ciências Sociais**, n. 85, p. 23-41, 2009.

ITGE (INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA)/JUNTA DE ANDALUCÍA. Glosario de términos hidrogeológicos. *In: Atlas hidrogeológico de Andalucía*. Madrid: Ed. ITGE, 1998, p. 214-215. Disponível em: https://aguas.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro110/lib110.htm. Acesso em: 08 jul. 2020.

IVKOVIC, K. M. A top-down approach to characterise aquifer-river interaction processes. **Journal of Hydrology**, v. 365, n. 3-4, p. 145-155, 2009.

JAMES, L. A.; LECCE, S. A. Impacts of land-use and land-cover change on river systems. *In: SHRODER, J. F.; WOHL, E. (org.). Treatise on Geomorphology*. San Diego, CA: Academic Press, p. 768-793, 2013.

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.

KARAMOUZ, M.; AHMADI, A.; AKHBARI, M. **Groundwater Hydrology - Engineering, Planning, and Management**. Taylor & Francis Group, CRC Press, 2011. 662p.

KARMANN, I. Água: ciclo e ação geológica. *In: TEIXEIRA, Wilson et al. Decifrando a Terra*. 2ª ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009, p. 186-209.

KELLY, L.; KALIN, R. M.; BERTRAM, D.; KANJAYE, M.; NKHATA, M.; SIBANDE, H. Quantification of temporal variations in base flow index using sporadic river data: application to the Bua catchment, Malawi. **Water**, v. 11, p. 1-17, 2019.

KEMERICH, P. D. C.; RITTER, L. G.; DULAC, V. F. Gerenciamento de comitês de bacia: desafios e potencialidades. **Revista Monografias Ambientais**, p. 3737-3743, 2014.

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

KLASSEN, J.; SMERDON, B.D. **First-order groundwater availability assessment for central Alberta**. Alberta Energy Regulator/AGS Open File Report 2017-07, 2018. 28 p.

KLEIN, R. M. **Mapa fitogeográfico do Estado de Santa Catarina**. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues/SUDESUL/FATMA, 1978. 24 p.

KREBS, A. S. J. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC**. Florianópolis, 2004. 375p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2004.

- LAAHA, G. *et al.* Prediction of low flows in ungauged basins. *In:* BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M.; WAGENER, T.; VIGLIONE, A.; SAVENIJE, H. (org.). **Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales.** Cambridge University Press, 2013. p. 163-188.
- LACZNIAK, R. J. *et al.* Ground-Water Budgets. *In:* WELCH, A. H.; BRIGHT, D. J.; KNOCHENMUS, L. A (org.). **Water Resources of the Basin and Range Carbonate-Rock Aquifer System, White Pine County, Nevada, and Adjacent Areas in Nevada and Utah.** U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007–5261, 2007, p. 43-81.
- LACEY, G. C.; GRAYSON, R. B. Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1-4, p. 231-250, 1998.
- LANNA, A. E.; CÁNEPA, E. M. O gerenciamento de bacias hidrográficas e o desenvolvimento sustentável: uma abordagem integrada. **Ensaio FEE**, v. 15, n. 1, p. 269-282, 1994.
- LASTORIA, G.; SINELLI, O.; KIANG, C. H.; HUTCHEON, I.; PARANHOS FILHO, A. C.; GASTMANS, D. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. **Águas Subterrâneas**, v. 20, n. 1, p.139-150, 2006.
- LEAP, D. I. Geological occurrence of groundwater. *In:* CUSHMAN, J. H.; TARTAKOVSKY, D.I.M. (org.). **The handbook of groundwater engineering.** CRC Press, 2016. p. 31-72.
- 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). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, 2016.
- LEINZ, V.; AMARAL, S. E. **Geologia Geral.** 10^a ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1987. 397p.
- 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.
- LI, L.; MAIER, H. R.; LAMBERT, M. F.; SIMMONS, C. T.; PARTINGTON, D. Framework for assessing and improving the performance of recursive digital filters for baseflow estimation with application to the Lyne and Hollick filter. **Environmental modelling & software**, v. 41, p. 163-175, 2013.
- LIU, Z.; LIU, S.; YE, J.; SHENG, F.; YOU, K.; XIONG, X.; LAI, G. Application of a digital filter method to separate baseflow in the small watershed of Pengchongjian in Southern China. **Forests**, v. 10, n. 1065, p. 1-12, 2019.
- LIBÂNIO, P. A. C. **Avaliação qualitativa do modelo de gestão da Política Nacional de Recursos Hídricos: interfaces com o sistema ambiental e com o setor de saneamento.** Belo Horizonte: 2006. 318f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 2006.

LIBANIO, P. A. C. Two decades of Brazil's participatory model for water resources management: from enthusiasm to frustration. **Water International**, v. 43, n. 4, p. 494-511, 2018.

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

LIU, Z.; LIU, S.; YE, J.; SHENG, F.; YOU, K.; XIONG, X.; LAI, G. Application of a digital filter method to separate baseflow in the small watershed of Pengchongjian in Southern China. **Forests**, v. 10, n. 1065, p. 1-12, 2019.

LUIZ, E. L. Geomorfologia. *In*: OLIVEIRA, I. (org.). **Atlas Geográfico de Santa Catarina: diversidade da natureza – Fascículo 2**. Santa Catarina. Secretaria de Estado do Planejamento. Diretoria de Estatística e Cartografia, 2^a ed. Florianópolis: Ed. da UDESC, 2016. p. 95-108.

LVOVITCH, M. I.: Hydrologic budget of continents and estimate of the balance of global fresh water resources. **Soviet hydrology**, v. 4, p. 349–360, 1972.

MACHADO, C. J. S. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. **Ambiente & Sociedade**, v. 6, n. 2, p. 121-136, 2003.

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.

MACHADO, J. L. F. **Mapa hidrogeológico do Estado de Santa Catarina - Escala 1: 500.000**. Porto Alegre: CPRM, 2013. 107p. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/11594/2/Relatorio.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2022.

MAGRINI, A.; SANTOS, M. River basin management and the national water resources policy in Brazil. *In*: BREBBIA, C. A.; ANAGNOSTOPOULOS P.; KATSIFARAKIS, K.; CHENG, A. H. D. (org.). **Water resources management**. Southampton, v. 4, 2001. p. 79-88.

MAILLET, E. **Essai d'Hydraulique Souterraine et Fluviale**. Paris: Hermann Librairie scientifique, 1905.

MANZIONE, R. L. **Águas subterrâneas: conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar**. Jundiaí: Paco Editorial, 2015. 388p.

MAKARIEVA, A. M.; GORSHKOV, V. G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 2, p. 1013-1033, 2007.

MAKARIEVA, A. M.; GORSHKOV, V. G.; SHEIL, D.; NOBRE, A. D.; BUNYARD, P.; LI, B. L. Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure, and atmospheric moisture content. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 1, p. 411-426, 2014.

MARCONDES, T. **Desenvolvimento rural e protagonismo social: o caso do Projeto Microbacias 2 de Santa Catarina**. Florianópolis: 2011. 180p. Dissertação (Mestrado).

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-graduação em Sociologia Política, Florianópolis, 2011.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31-44, 2015.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2018.

MARGAT, J.; VAN DER GUN, J. **Groundwater around the world: a geographic synopsis**. IGRAC/UNESCO: Crc Press, 2013. 372p.

MARTINELLI, A. Gestão ambiental. *In*: TELLER, D. D (Coord.). **Ciclo ambiental da água: da chuva à gestão**. São Paulo: Blucher, 2013. p. 483-501.

MATOS, A. D.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. **Barragens de terra de pequeno porte**. Cadernos Didáticos. Viçosa: UFV, 2000. 122p

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 (América do Sul). **Águas Subterrâneas**, v. 29 n. 3, p. 285-300, 2015.

MATTIUZI, C. D. P.; MARQUES, G. F. Gestão integrada dos recursos hídricos: avaliação dos benefícios do uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas em uma região no sul do Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 4, p. 340-353, 2019.

MCCONNELL, R. L.; ABEL, D. C. **Environmental geology today**. EUA: Jones & Bartlett Learning, 2015. 820p.

MCCUEN, R. H. **Hydrologic analysis and design**. Nova Jersey: Printice-Hall, 1998. 814p.

MEHTA, L. **The politics and poetics of water: the naturalisation of scarcity in Western India**. Orient Longman: New Delhi, 2005.

MEINZER, O. E. **The occurrence of ground water in the United States with a discussion of principles**. University of Chicago, 1923.

MILLER, M. P.; BUTO, S. G.; SUSONG, D. D.; RUMSEY, C. A. The importance of base flow in sustaining surface water flow in the Upper Colorado River Basin. **Water Resources Research**, v. 52, n. 5, p. 3547-3562, 2016.

MONTEIRO, C. A. F. **Geosistemas: a história de uma procura**. 2ª ed. São Paulo: Contexto, 2001. 127p.

MONTEIRO, M. A.; MENDONÇA, M. Dinâmica atmosférica no Estado de Santa Catarina. *In*: HERRMANN, M. L. P. (org.). **Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: IOESC, 2005. p. 05-10.

- MONTEIRO, M.; SILVA, P. V. Clima, estiagem climática e meses secos. *In: FREITAS, M. J. C. C.; OLIVEIRA, F. H. **Estiagem no Oeste Catarinense**: diagnóstico e resiliência (Relatório Técnico-científico)*. Florianópolis: UDESC, 2017. p. 44-82.
- MWAKALILA, S.; FEYEN, J.; WYSEURE, G. The influence of physical catchment properties on baseflow in semi-arid environments. **Journal of Arid Environments**, v. 52, n. 2, p. 245-258, 2002.
- NANNI, A. S.; ROISENBERG, A.; HOLLANDA, M. H. B. M.; MARIMON, M. P. C.; VIERO, A. P.; SCHEIBE, L. F. Fluoride in the Serra Geral aquifer system: source evaluation using stable isotopes and principal component analysis. **Journal of Geological Research**, v. 2013, p. 1-9, 2013.
- NANNI, A. S. ; SCHEIBE, L. F. Blocos hidrogeológicos, vulnerabilidade natural e risco à contaminação das águas do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) em Santa Catarina. *In: XXII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - CABAS*, p. 01-02, 2022, São Paulo, SP. **Anais [...]**. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2022.
- NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water Resources Research**, v. 26, n. 7, p. 1465-1473, 1990.
- NATHAN, R.; EVANS, R. Groundwater and surface water connectivity. *In: GRAFTON, R. Q.; HUSSEY, K. **Water Resources Planning and Management***. Reino Unido: Cambridge University Press, 2011, p. 46-67.
- NEJADHASHEMI, A. P.; SHIRMOHAMMADI, A.; MONTAS, H. J.; SHERIDAN, J. M.; BOSCH, D. D. Watershed physical and hydrological effects on baseflow separation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 10, p. 971-980, 2008.
- NRCS (NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE). Time of Concentration. *In: **Part 630 Hydrology - National Engineering Handbook***. Washington: United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 2010.
- OKELLO, A. M. L. S.; UHLENBROOK, S.; JEWITT, G. P.; MASIH, I.; RIDDELL, E. S.; VAN DER ZAAG, P. Hydrograph separation using tracers and digital filters to quantify runoff components in a semi-arid mesoscale catchment. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 10, p. 1334-1350, 2018.
- OKI, T.; KANAE, S. Global hydrological cycles and world water resources. **Science**, v. 313, n. 5790, p. 1068-1072, 2006.
- OMM (ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL). **Manual on low-flow estimation and prediction**. Relatório hidrológico operacional n. 50. Koblenz: Organização Meteorológica Mundial, 2009. 138p.
- OMM/UNESCO (ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL/ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA). **International Glossary of Hydrology**. IHP/OHP-Berichte, n. 385, 2012. 471p.

ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). **Sustainable Development Goal 6 - Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation**. Nova York: Nações Unidas, 2018. 199p.

PAIVA, R. F. P. S.; COELHO, R. C. O Programa Produtor de Água e Floresta de Rio Claro/RJ enquanto ferramenta de gestão ambiental: o perfil e a percepção ambiental dos produtores inscritos. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 33, p. 51-62, 2015.

PARTINGTON, D.; BRUNNER, P.; SIMMONS, C. T.; WERNER, A. D.; THERRIEN, R.; MAIER, H. R.; DANDY, G. C. Evaluation of outputs from automated baseflow separation methods against simulated baseflow from a physically based, surface water-groundwater flow model. **Journal of Hydrology**, v. 458, p. 28-39, 2012.

PELLERIN, J.; DUARTE, G. M.; SCHEIBE, L. F.; MENDONÇA, M.; BUSS, M. D.; MONTEIRO, M. A. Timbé do Sul – Jacinto Machado: avaliação preliminar da extensão da catástrofe de 23-24/12/95. **Geosul**, v. 12, n. 23, p. 71-86, 1997.

PESSOA, M.D.; MENTE, A.; LEAL, O. Províncias hidrogeológicas adotadas para o mapa hidrogeológico do Brasil na escala 1:2.500.000. *In: I Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, p. 461-473, Recife, PE. **Anais [...]**. Recife, PE: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 1980.

PIGGOTT, A. R.; MOIN, S.; SOUTHAM, C. A revised approach to the UKIH method for the calculation of baseflow. **Hydrological Sciences Journal**, v. 50, n. 5, p. 911-920, 2005.

PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E.; DEL PRETTE, M. E. A Utilização do Conceito de Bacia Hidrográfica para a Conservação dos Recursos Naturais. *In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações*. Ilhéus: Editus, 2002. p. 17-36.

PONTES, L. M.; COELHO, G.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; OLIVEIRA, G. C.; VIOLA, M. R. Avaliação de modelo de balanço hídrico com base na estimativa da recarga potencial. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 11, n. 4, out./dez. 2016.

PORTELA, M. M.; SANTOS, J. F.; SILVA, A. T.; BENITEZ, J. B.; FRANK, C.; REICHERT, J. M. Drought analysis in southern Paraguay, Brazil and northern Argentina: regionalization, occurrence rate and rainfall thresholds. **Hydrology Research**, v. 46, n. 5, p. 792-810, 2015.

PORTO, M.; KELMAN, J. Water resources policy in Brazil. **Rivers – Studies in the Science Environmental Policy and Law of Instream Flow**, v. 7, n. 3, p. 250-257, 2000.

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.

PORTO-GONÇALVES, C. W. Água não se nega a ninguém: a necessidade de ouvir outras vozes. *In: PARREIRA, C.; ALIMONDA, H. (org.). Políticas Públicas Ambientais Latino-Americanas*. Brasília: FLACSO, p. 115-144, 2005.

PORTO-GONÇALVES, C. W. A geopolítica da água e a crise do conhecimento. *In:* TREVISOL; SCHEIBE, L. F. (org.). **Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe: natureza e sociedade**. Joaçaba: Ed. Unoesc, 2011, p. 17-53.

POTTER, R. O.; CARVALHO, A. P.; FLORES, C. A.; BOGNOLA, I. Solos do Estado de Santa Catarina. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento – EMBRAPA Solos**, n. 46, dez./2004.

PRATES, A. M. M.; MANZOLLI, J. I.; MIRA, M. A. F. B. Hidrografia de Santa Catarina. **Geosul**, v. 1, n. 1, p. 69-76, 1986.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**. Tradução de Rualdo Menegat *et al.* (Coord.). 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656p.

PRICE, K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review. **Progress in Physical Geography**, v. 35, n. 4, p. 465-492, 2011.

PROJETO MAPBIOMAS – Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. **MapBiomass General “Handbook”** - Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Projeto MapBiomass - é uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de uso e cobertura da terra a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite. A descrição completa do projeto encontra-se em <http://mapbiomas.org>. 2022.

Disponível em:

https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Metodologia/ATBD_Collection_6_v1_January_2022.pdf. Acesso em: 10 jan. 2023.

PROJETO QGIS. **Guia do usuário QGIS**. Disponível em:

https://docs.qgis.org/3.28/pt_BR/docs/user_manual/index.html. Acesso em: 29 mai. 2023.

PULIDO-VELAZQUEZ, M. A.; SAHUQUILLO-HERRAIZ, A.; OCHOA-RIVERA, J. C.; PULIDO-VELAZQUEZ, D. Modeling of stream–aquifer interaction: the embedded multireservoir model. **Journal of Hydrology**, v. 313, n. 3-4, p. 166-181, 2005.

PULIDO-VELAZQUEZ, M.; MARQUES, G. F.; HAROU, J. J.; LUND, J. R.

Hydroeconomic models as decision support tools for conjunctive management of surface and groundwater. *In:* JAKEMAN, A. J.; BARRETEAU, O.; HUNT, R.J.; RINAUDO, J. D.; ROSS, A. (org.) **Integrated groundwater management**, 2016, p. 693-710.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **Sistema de Informações Geográficas QGIS**. Open Source Geospatial Foundation Project. 2023. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 15 out. 2023.

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.

RASSAM, D. W.; PEETERS, L.; PICKETT, T.; JOLLY, I.; HOLZ, L. Accounting for surface–groundwater interactions and their uncertainty in river and groundwater models: a case study in the Namoi River, Australia. **Environmental Modelling & Software**, v. 50, p. 108-119, 2013.

RAFFENSPERGER, J. P.; BAKER, A. C.; BLOMQUIST, J. D.; HOPPLE, J. A. **Optimal hydrograph separation using a recursive digital filter constrained by chemical mass balance, with application to selected Chesapeake Bay watersheds**. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2017–5034, 51 p.

REBOUÇAS, A.C. A inserção da água subterrânea no sistema nacional de gerenciamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 39-50, 2002a.

REBOUÇAS, A. C. Água doce no mundo e no Brasil. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B. P. F.; TUNDISI, J. G (Orgs.). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras, 2002b. p. 1-34.

RGSG (REDE GUARANI/SERRA GERAL). **Blocos hidrogeológicos, vulnerabilidade natural e risco à contaminação do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral em Santa Catarina**. Laboratório de Análise Ambiental e Laboratório de Hidrogeologia da UFSC. Nota Técnica. 2020. 155p. il. mapas. Disponível em: <https://hidrogeologia.ufsc.br/saigsg/>. Acesso em: 15 jun. 2023.

RIBEIRO, M. M. R. A. Few comments on the brazilian water resource policy. **New Water Policy & Practice**, v. 3, n. 1-2, p. 22-32, 2017.

ROLDAN, L. F. **Tectônica rúptil Meso-Cenozóica na região do Domo de Lages, SC**. São Paulo: 2007. 121p. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica. São Paulo, 2007.

ROSA, A. M. R.; GUARDA, V. L. M. Gestão de recursos hídricos no Brasil: um histórico. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 9, n. 2, 2019.

RUMSEY, C. A.; MILLER, M. P.; SEXSTONE, G. A. Relating hydroclimatic change to streamflow, baseflow, and hydrologic partitioning in the Upper Rio Grande Basin, 1980 to 2015. **Journal of Hydrology**, v. 584, n. 124715, p. 1-14, 2020.

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

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

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

SÁNCHEZ-MURILLO, R.; BROOKS, E. S.; ELLIOT, W. J.; GAZEL, E.; BOLL, J. Baseflow recession analysis in the inland Pacific Northwest of the United States. **Hydrogeology Journal**, v. 23, n. 2, p. 287-303, 2015.

SANTA CATARINA. **Atlas do Estado de Santa Catarina**. Governo do Estado de Santa Catarina, Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral, Sub-chefia de Estatística, Geografia e Informática, 1986. 173p.

SANTA CATARINA. **Lei nº 9.022, de 6 de maio de 1993**. Dispõe sobre a instituição, estruturação e organização do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em:

https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Legislacao/Lei-Estadual-9022-1993.pdf. Acesso em: 15 out. 2022.

SANTA CATARINA. **Lei nº 10.949, de 09 de novembro de 1998**. Dispõe sobre a caracterização do Estado em dez Regiões Hidrográficas. Disponível em:

https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Legislacao/Lei-Estadual-10949-1998.pdf. Acesso em: 15 out. 2022.

SANTA CATARINA. **Lei nº 15.249, de 03 de agosto de 2010**. Altera dispositivos da Lei nº 9.022, de 1993, que dispõe sobre a instituição, estruturação e organização do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em:

http://leis.alesc.sc.gov.br/html/2010/15249_2010_Lei.html#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2015.249%2C%20de%2003%20de%20agosto%20de%202010&text=Altera%20dispositivos%20da%20Lei%20n%C2%BA,de%20Gerenciamento%20de%20Recursos%20H%C3%ADricos. Acesso em: 15 out. 2022.

SANTA CATARINA. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina - Documento síntese**. Florianópolis: FAPESC/Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável/CERTI, 2017. 66p.

SANTA CATARINA. **SIGSC – Sistema de Informações Geográficas do Estado de Santa Catarina**. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDE). Fornece produtos de geoprocessamento derivados do aerolevanteamento do triênio 2010-2011-2012. 2020. Disponível em: <http://sigsc.sc.gov.br/>. Acesso em: 20 abr. 2020.

SANTA CATARINA. **Reunião CONSAB – Florianópolis**. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. Secretaria Executiva do Meio Ambiente (SEMA). Disponível em:

http://portal.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/29_07_2022_13.11.21.0eb2757ade54c7f2f49fee603dcaaac8.pdf. Acesso em: 01 jun. 2023.

SANTOS, R. S. B. Hidrografia. *In*: IBGE. **Geografia do Brasil**: Região Sul – Volume 5. Rio de Janeiro: SERGRAF, 1977. p. 111-142.

SANTOS, G. R.; SANTANA, A. S. Gestão comunitária da água: soluções e dificuldades do saneamento rural no Brasil. **Texto para Discussão 2601**. Brasília-Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2020. 50p.

SCHWARTZ, S. S. Automated algorithms for heuristic base-flow separation. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 6, p. 1583-1594, 2007.

SCHEIBE, L. F. A geologia de Santa Catarina: sinopse provisória. **Geosul**, v. 1, n. 1, p. 7-38, 1986.

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 [...]**. Natal, RN: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2008.

SDE/CIGERD-SC (SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL/CENTRO INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RISCOS E DESASTRES-SANTA CATARINA). **Boletim Hidrometeorológico Integrado - Edição 015/2020**. Data da publicação: 16/12/2020. Disponível em:

https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DRHI/cadastro_de_usuarios_de_recursos_hidricos/Abastecimento%20Urbano/Boletim_Hidrometeorologico_015_2020.pdf. Acesso em: 07 nov. 2022.

SDE/CIGERD-SC (SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL/CENTRO INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RISCOS E DESASTRES-SANTA CATARINA). **Boletim Hidrometeorológico Integrado - Edição 009/2021**. Data da publicação: 16/06/2021. Disponível em:

https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DRHI/cadastro_de_usuarios_de_recursos_hidricos/Abastecimento%20Urbano/Boletim_Hidrometeorologico_009_2021.pdf. Acesso em: 07 nov. 2022.

SDE/CIGERD-SC (SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL/CENTRO INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RISCOS E DESASTRES-SANTA CATARINA). **Boletim Hidrometeorológico Integrado - Edição 004/2022**. Data da publicação: 07/03/2022. Disponível em:

https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DRHI/cadastro_de_usuarios_de_recursos_hidricos/Abastecimento%20Urbano/Boletim_Hidrometeorologico_004_2022.pdf. Acesso em: 07 nov. 2022.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. D. M.; PEREIRA, I. D. C. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2ª ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2001.

SHAO, G.; ZHANG, D.; GUAN, Y.; SADAT, M. A.; HUANG, F. Application of different separation methods to investigate the baseflow characteristics of a semi-arid sandy area, Northwestern China. **Water**, v. 12, n. 434, p. 1-22, 2020.

SHEIL, D.; MURDIYARSO, D. How forests attract rain: an examination of a new hypothesis. **Bioscience**, v. 59, n. 4, p. 341-347, 2009.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & Sociedade**, v. 10, p. 137-148, 2007.

SILVA, R. F. G. **Estimativa de parâmetros hidrodinâmicos de aquíferos em áreas de embasamento através de métodos indiretos**. Ouro Preto: 2009. 112f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais. Ouro Preto, 2009.

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. Porto Alegre – RS: ABRH, 2011, v.1, p. 1-18.

SIMON, A. A. **Análise histórico-crítica dos trabalhos em microbacias hidrográficas em Santa Catarina - 1984/1990**. Florianópolis: 1993. 306p. Dissertação (Mestrado).

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Florianópolis, 1993.

SIRHESC (SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE RECURSOS HÍDRICOS DE SANTA CATARINA). **Agências de Bacias**. 2017. Disponível em: <https://www.aguas.sc.gov.br/segrhsc/agencias-de-bacias>. Acesso em: 16 jan. 2023.

SIRHESC (SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE RECURSOS HÍDRICOS DE SANTA CATARINA). **Divisão hidrográfica estadual**. 2018. Disponível em: <https://www.aguas.sc.gov.br/base-documental/mapeamentos>. Acesso em: 05 fev. 2023.

SIRHESC (SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE RECURSOS HÍDRICOS DE SANTA CATARINA). **Comitês de Bacias**. 2023. Disponível em: <https://www.aguas.sc.gov.br/segrhsc/comites-de-bacias>. Acesso em: 02 jun. 2023.

SOPHOCLEOUS, M. From safe yield to sustainable development of water resources - the Kansas experience. **Journal of Hydrology**, v. 235, n. 1-2, p. 27-43, 2000.

SOTCHAVA, V. B. **Métodos em questão - o estudo de geossistemas**. Universidade de São Paulo: Instituto de Geografia, v. 16, 1977. 52p.

SMAKHTIN, V. Y.; TOULOUSE, M. Relationships between low-flow characteristics of South African streams. **WATER SA**, v. 24, n. 2, p. 107-112, 1998.

SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology: a review. **Journal of hydrology**, v. 240, n. 3-4, p. 147-186, 2001.

SOARES, P. V.; PEREIRA, S. Y.; SIMÕES, S. J. C.; BERNARDES, G. P. Aplicação do conceito de geoindicadores na avaliação da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas – uma abordagem introdutória. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 1, p. 117-117, 2006.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; SOUZA, E. B.; SILVA JÚNIOR, R. O.; NASCIMENTO JÚNIOR, 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.

SPINELLI, K.; NASCIMENTO, R.; FUENTES, M. Análise climática dos episódios de estiagem que provocaram danos socioeconômicos no Oeste Catarinense entre 1999 a 2012. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 345-367, 2020.

SPINOLA, C. A.; VITORIA, F.; CERQUEIRA, L. A Lei das Águas e o São Francisco: os limites da gestão descentralizada dos recursos hídricos no Brasil. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 18, n. 33, p. 70-90, 2016.

SPONGBERG, M. E. Spectral analysis of base flow separation with digital filters. **Water Resources Research**, v. 36, n. 3, p. 745-752, 2000.

STALLBAUM, I. *et al.* **Águas subterrâneas**: um patrimônio catarinense. Florianópolis: Expressão, 2018. 160p.

STADNYK, T. A.; GIBSON, J. J.; LONGSTAFFE, F. J. Basin-scale assessment of operational base flow separation methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 20, n. 5, p. 1-11, 2015.

STAUDT, B.; BERRETA, M. S. R. Recursos hídricos: um olhar quanto ao desenvolvimento da legislação brasileira. *In*: LADWIG, N. I.; SCHWALM, H. (org.) **Planejamento e gestão territorial**: a sustentabilidade dos ecossistemas urbanos. Criciúma: EDIUNESC, 2018. p. 296-315.

STOELZLE, M.; WEILER, M.; STAHL, K.; MORHARD, A.; SCHUETZ, T. Is there a superior conceptual groundwater model structure for baseflow simulation?. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 6, p. 1301-1313, 2015.

SUJONO, J.; SHIKASHO, S.; HIRAMATSU, K. A comparison of techniques for hydrograph recession analysis. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 3, p. 403-413, 2004.

TAGUE, C.; GRANT, G. E. A geological framework for interpreting the low-flow regimes of Cascade streams, Willamette River Basin, Oregon. **Water Resources Research**, v. 40, n. 4, p. 1-9, 2004.

TAKEDA, F. K. Esboço geológico de Santa Catarina. *In*: IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Atlas Geográfico de Santa Catarina**. Florianópolis: Departamento Estadual de Geografia e Cartografia, 1958.

TALLAKSEN, L. M. **A review of baseflow recession analysis**. *Journal of Hydrology*, v. 165, n. 1-4, p. 349-370, 1995.

TEIXEIRA, F. J. C. **Modelos de gerenciamento de recursos hídricos**: análises e proposta de aperfeiçoamento do sistema do Ceará. Brasília: Banco Mundial/Ministério da Integração Nacional, 2004. 84p.

THEODORO, H. D.; MARQUES, D. Análise de modelos institucionais de recursos hídricos, com foco em Minas Gerais, Brasil. **Sustentabilidade em Debate**, v. 5, n. 2, p. 117-135, 2014.

THOMAS, H. E. Ground-water Regions of the United States: Their Storage Facilities. *In*: **The physical and economic foundation of natural resources**. Report for U.S. House of Rep. Interior and Insular Affairs Committee, 83rd Cong.: U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C., v. 3, 1952. 100p.

THOMAS, B. F.; VOGEL, R. M.; KROLL, C. N.; FAMIGLIETTI, J. S. Estimation of the base flow recession constant under human interference. **Water Resources Research**, v. 49, n. 11, p. 7366-7379, 2013.

THOMAS, B. F.; VOGEL, R. M.; FAMIGLIETTI, J. S. Objective hydrograph baseflow recession analysis. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 102-112, 2015.

TODD, D. K.; MAYS, L. W. **Groundwater hydrology**. 3ª ed. Welly Inte, 2005. 652p.

TÓTH, J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. **Journal of Geophysical Research**, v. 68, n. 16, p. 4795-4812, 1963.

TÓTH, J. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. **Hydrogeology Journal**, v. 7, n. 1, p. 1-14, 1999.

TOTTI, M. E. F. Gestão das águas no Brasil: trajetória e reflexões. **Agenda Social**, v. 3, n.1, p. 01-22, 2009.

TRINDADE, L. D. L. **Gestão Integrada de Recursos Hídricos**: papel, potencialidades e limitações dos comitês de bacias hidrográficas. Florianópolis, 2016. 269p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-graduação Interdisciplinar em Ciências Humanas, Florianópolis, 2016.

TRINDADE, L. L.; SCHEIBE, L.; F. RIBEIRO, W. C. A governança da água: o caso dos comitês dos rios Chapecó e Irani-SC. **Geosul**, v. 33, n. 68, p. 36-57, 2018.

TRINDADE, L. L.; SCHEIBE, L.; F. Gestão de águas: limitações e contribuições na atuação dos comitês de bacias hidrográficas brasileiros. **Ambiente & Sociedade**, v. 22, p. 1-20, 2019.

TUCCI, C.; CHAGAS, M. F. Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais. **REGA**, v. 14, n. e12, p. 1-16, 2017.

TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista USP**, n. 70, p. 24-35, 2006.

ULLER-GÓMEZ, C.; COMASSETTO, V. A Política Nacional de Recursos Hídricos e a participação na gestão das águas: desafios para a sua implementação em Santa Catarina. *In*: TREVISOL; SCHEIBE, L. F. (org.). **Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe**: natureza e sociedade. Joaçaba: Ed. Unoesc, 2011, p. 83-108.

USDA/SCS (UNITED STATES DEPARTEMENT OF AGRICULTURE/SOIL CONSERVATION SERVICE). **Urban hydrology for small watersheds**. United States Department of Agriculture, Engineering Division, 1975. 103p.

USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY). **Earth Explorer**. Apresenta produtos derivados de imagens de satélite para todo o mundo. 2020. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 18 nov. 2020.

VAFAKHAH, M.; ESLAMIAN, S.; BOZCHALOEI, S. K. Low-flow hydrology. *In*: ESLAMIAN, S. (org.). **Handbook of Engineering Hydrology**: Fundamentals and Applications. CRC Press, 2014. p. 433-453.

VAN LOON, A. F. V. Hydrological drought explained. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 4, p. 359-392, 2015.

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

VASCONCELOS, V. V.; MARTINS JUNIOR, P. P.; HADAD, R. M. Estimation of flow components by recursive filters: case study of Paracatu River Basin (SF-7), Brazil. **Geologia USP**, v. 13, n. 1, p. 3-24, 2013b.

VEIGA, L. B. E.; MAGRINI, A. The Brazilian water resources management policy: Fifteen years of success and challenges. **Water Resources Management**, v. 27, n. 7, p. 2287-2302, 2013.

VIEIRA, P. M. S.; STUDART, T. M. C. Proposta metodológica para o desenvolvimento de um índice de sustentabilidade hidro-ambiental de áreas serranas no semiárido brasileiro - Estudo de caso: Maciço de Baturité, Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 4, p. 125-136, 2009.

VILLAR, P. C. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, n. 1, p. 83-100, 2016.

VIRTUOSO, M. A. **Qualidade ambiental das águas do abastecimento público no município de São Pedro de Alcântara - SC**. Florianópolis: 2014. 132p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Geociências, Curso de Graduação em Geografia. Florianópolis, 2014.

WEBER, S.B.; JUSTEN, J.G.K.; BLAINSKI, E.; GUADAGNIN, C.A. Proteções de nascentes. **Boletim Didático 164**. Florianópolis: Epagri, 2022. 35p. Disponível em: <https://sistemas.epagri.sc.gov.br/semob/consulta.action?subFuncao=consultaPublicacoesDetalle&cdDoc=55647>. Acesso em: 25 set. 2023.

WEI, C.; DONG, X.; MA, Y.; ZHAO, W.; YU, D.; TAYYAB, M.; BO, H. Impacts of land use types, soil properties, and topography on baseflow recharge and prediction in an agricultural watershed. **Land**, v. 12, n. 109, p. 1-20, 2023.

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.

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.

WINTER, T. C. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. **Hydrogeology Journal**, v. 7, n. 1, p. 28-45, 1999.

WITTENBERG, H. Nonlinear analysis of flow recession curves. **Publications - Series of Proceedings and Reports-International Association Hydrological Sciences**, v. 221, p. 61-68, 1994.

WITTENBERG, H. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. **Hydrological Processes**, v. 13, n. 5, p. 715-726, 1999.

WOLFF, C. A.; MARCHINHACKI, R. P. A participação popular como garantia de construção de uma política de recursos hídricos sustentável no vale do Itajaí. **Revista Jurídica (FURB)**, v. 17, n. 34, p. 5-36, 2013.

WRIGHT, C. E. **Surface water and groundwater interaction**. Studies and Reports in Hydrology. UNESCO, n. 29, 1980. 125p.

WU, J.; MIAO, C.; DUAN, Q.; LEI, X.; LI, X.; LI, H. Dynamics and attributions of baseflow in the semiarid Loess Plateau. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 7, p. 3684-3701, 2019.

YOUNGER, P. L. **Groundwater in the environment**: an introduction. John Wiley & Sons, 2009. 337p.

**APÊNDICE A – Dados de calibração do BFI médio global da condição natural do
Domínio Hidrogeológico Cristalino**

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
CENÁRIO DE 1985							
Florestas*	2	1,39	0,003	38,74	0,002	61,26	0,003
	4	4,90	0,032	61,16	0,019	38,84	0,027
	8	9,04	0,081	72,94	0,050	27,06	0,063
	16	64,20	0,642	85,43	0,391	14,57	0,448
Silvicultura*	6	0,01	0,000	0,24	0,000	99,76	0,000
	12	0,01	0,000	0,14	0,000	99,86	0,000
	24	0,01	0,000	0,13	0,000	99,87	0,000
	48	0,04	0,001	0,08	0,000	99,92	0,001
Pastagens e áreas campestres**	10	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	20	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	40	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
Pastagens e áreas campestres*	80	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	10	0,73	0,003	32,76	0,002	67,24	0,003
	20	1,25	0,012	22,89	0,007	77,11	0,013
Áreas cultivadas e descobertas**	40	1,32	0,016	14,19	0,010	85,81	0,018
	80	3,49	0,045	6,03	0,028	93,97	0,054
	14	0,06	0,000	100,06	0,000	199,94	0,001
Áreas cultivadas e descobertas*	28	0,17	0,002	100,06	0,001	199,94	0,003
	56	0,17	0,003	100,06	0,002	199,94	0,005
	112	0,40	0,007	100,06	0,004	199,94	0,012
Áreas urbanizadas*	14	1,20	0,005	60,30	0,003	39,70	0,005
	28	1,69	0,019	37,25	0,012	62,75	0,019
	56	1,93	0,030	26,80	0,018	73,20	0,032
	112	7,29	0,124	16,49	0,076	83,51	0,139
Total	18	0,24	0,003	35,07	0,002	64,93	0,003
	36	0,15	0,005	9,57	0,003	90,43	0,006
	72	0,09	0,004	3,52	0,002	96,48	0,005
	144	0,16	0,008	1,12	0,005	98,88	0,010
	-	100	1,047	-	0,638	-	0,869
CENÁRIO DE 1993							
Florestas*	2	1,33	0,003	37,31	0,002	62,69	0,003
	4	4,83	0,031	60,25	0,018	39,75	0,025
	8	8,96	0,081	72,36	0,046	27,64	0,059
	16	64,31	0,643	85,56	0,368	14,44	0,422
Silvicultura*	6	0,01	0,000	0,27	0,000	99,73	0,000
	12	0,01	0,000	0,23	0,000	99,77	0,000
	24	0,01	0,000	0,16	0,000	99,84	0,000
	48	0,07	0,001	0,12	0,001	99,88	0,001
Pastagens e áreas campestres**	10	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	20	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	40	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
Pastagens e áreas campestres*	80	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	10	0,68	0,003	30,24	0,002	69,76	0,003
	20	1,17	0,011	21,42	0,006	78,58	0,011
Áreas cultivadas e descobertas**	40	1,33	0,016	14,34	0,009	85,66	0,017
	80	3,85	0,050	6,66	0,029	93,34	0,055
	14	0,06	0,000	100,06	0,000	199,94	0,000
Áreas cultivadas e descobertas*	28	0,17	0,002	100,06	0,001	199,94	0,003
	56	0,17	0,003	100,06	0,002	199,94	0,005
	112	0,40	0,007	100,06	0,004	199,94	0,012
Áreas urbanizadas*	14	1,24	0,006	62,15	0,003	37,85	0,004
	28	1,79	0,021	39,65	0,012	60,35	0,019
	56	1,97	0,030	27,32	0,017	72,68	0,030

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
	112	6,81	0,116	15,40	0,066	84,60	0,122
	18	0,31	0,004	45,25	0,002	54,75	0,004
Áreas urbanizadas*	36	0,19	0,006	12,09	0,004	87,91	0,007
	72	0,10	0,005	4,30	0,003	95,70	0,005
	144	0,15	0,008	1,06	0,005	98,94	0,009
Total	-	100	1,047	-	0,600	-	0,818
CENÁRIO DE 2001							
	2	1,23	0,003	34,37	0,002	65,63	0,003
Florestas*	4	4,57	0,030	57,07	0,018	42,93	0,026
	8	8,63	0,078	69,66	0,047	30,34	0,061
	16	63,39	0,634	84,35	0,384	15,65	0,444
Silvicultura*	6	0,01	0,000	0,25	0,000	99,75	0,000
	12	0,01	0,000	0,25	0,000	99,75	0,000
	24	0,02	0,000	0,22	0,000	99,78	0,000
	48	0,09	0,001	0,16	0,001	99,84	0,001
Pastagens e áreas campestres**	10	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	20	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	40	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
Pastagens e áreas campestres*	80	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	10	0,62	0,002	27,67	0,001	72,33	0,003
	20	1,23	0,012	22,52	0,007	77,48	0,013
Pastagens e áreas campestres*	40	1,45	0,017	15,60	0,011	84,40	0,019
	80	4,19	0,054	7,24	0,033	92,76	0,064
	14	0,06	0,000	100,06	0,000	199,94	0,001
Áreas cultivadas e descobertas**	28	0,17	0,002	100,06	0,001	199,94	0,003
	56	0,17	0,003	100,06	0,002	199,94	0,005
	112	0,40	0,007	100,06	0,004	199,94	0,012
Áreas cultivadas e descobertas*	14	1,38	0,006	69,58	0,004	30,42	0,005
	28	1,98	0,023	43,73	0,014	56,27	0,022
	56	2,17	0,034	30,20	0,020	69,80	0,035
Áreas urbanizadas*	112	7,36	0,125	16,65	0,076	83,35	0,139
	18	0,33	0,004	47,50	0,003	52,50	0,004
	36	0,20	0,007	12,60	0,004	87,40	0,007
	72	0,11	0,005	4,49	0,003	95,51	0,006
	144	0,16	0,008	1,07	0,005	98,93	0,010
Total	-	100	1,056	-	0,640	-	0,883
CENÁRIO DE 2009							
	2	1,23	0,003	34,44	0,002	65,56	0,003
Florestas*	4	4,53	0,029	56,61	0,017	43,39	0,025
	8	8,57	0,077	69,14	0,046	30,86	0,060
	16	63,35	0,634	84,30	0,375	15,70	0,434
	6	0,03	0,000	1,04	0,000	98,96	0,000
Silvicultura*	12	0,11	0,001	1,82	0,001	98,18	0,001
	24	0,20	0,002	2,20	0,001	97,80	0,003
	48	0,97	0,013	1,74	0,008	98,26	0,015
	10	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
Pastagens e áreas campestres**	20	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	40	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	80	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
Pastagens e áreas campestres*	10	0,57	0,002	25,33	0,001	74,67	0,002
	20	1,09	0,010	19,97	0,006	80,03	0,011
	40	1,30	0,016	14,02	0,009	85,98	0,017
	80	3,93	0,051	6,80	0,030	93,20	0,058
Áreas cultivadas e descobertas**	14	0,06	0,000	100,06	0,000	199,94	0,000
	28	0,17	0,002	100,06	0,001	199,94	0,003
	56	0,17	0,003	100,06	0,002	199,94	0,005
Áreas cultivadas e descobertas**	112	0,40	0,007	100,06	0,004	199,94	0,012
	14	1,38	0,006	69,38	0,004	30,62	0,005

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
e descobertas*	28	2,04	0,023	45,13	0,014	54,87	0,022
	56	2,20	0,034	30,52	0,020	69,48	0,034
	112	6,76	0,115	15,30	0,068	84,70	0,126
Áreas urbanizadas*	18	0,36	0,005	52,36	0,003	47,64	0,004
	36	0,22	0,007	14,06	0,004	85,94	0,008
	72	0,12	0,005	4,85	0,003	95,15	0,006
Total	-	100	1,056	-	0,625	-	0,866
CENÁRIO DE 2018							
Florestas*	2	1,24	0,003	34,70	0,002	65,30	0,003
	4	4,43	0,029	55,33	0,018	44,67	0,026
	8	8,29	0,075	66,89	0,046	33,11	0,061
	16	61,66	0,617	82,04	0,378	17,96	0,446
Silvicultura*	6	0,07	0,000	2,75	0,000	97,25	0,000
	12	0,25	0,002	4,33	0,001	95,67	0,003
	24	0,47	0,006	5,19	0,004	94,81	0,007
	48	3,07	0,041	5,51	0,025	94,49	0,049
Pastagens e áreas campestres**	10	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	20	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	40	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
Pastagens e áreas campestres*	80	0,02	0,000	100,00	0,000	0,00	0,000
	10	0,60	0,002	26,80	0,001	73,20	0,003
	20	1,12	0,011	20,50	0,007	79,50	0,012
Áreas cultivadas e descobertas**	40	1,35	0,016	14,51	0,010	85,49	0,018
	80	4,11	0,053	7,10	0,033	92,90	0,063
	14	0,06	0,000	100,06	0,000	199,94	0,001
	28	0,17	0,002	100,06	0,001	199,94	0,004
Áreas cultivadas e descobertas*	56	0,17	0,003	100,06	0,002	199,94	0,005
	112	0,40	0,007	100,06	0,004	199,94	0,012
	14	1,27	0,006	63,92	0,004	36,08	0,005
	28	1,95	0,022	43,07	0,014	56,93	0,022
Áreas urbanizadas*	56	2,15	0,033	29,82	0,020	70,18	0,035
	112	6,18	0,105	13,98	0,064	86,02	0,120
	18	0,38	0,005	55,59	0,003	44,41	0,004
Áreas urbanizadas*	36	0,24	0,008	15,43	0,005	84,57	0,009
	72	0,13	0,006	5,35	0,004	94,65	0,007
	144	0,18	0,009	1,24	0,006	98,76	0,011
Total	-	100	1,062	-	0,652	-	0,926
CENÁRIO DE CONDIÇÃO NATURAL							
Florestas	2	3,58	0,009	-	-	-	-
	4	8,01	0,052	-	-	-	-
	8	12,39	0,112	-	-	-	-
	16	75,16	0,752	-	-	-	-
Áreas campestres	10	0,02	0,000	-	-	-	-
	20	0,02	0,000	-	-	-	-
	40	0,02	0,000	-	-	-	-
Áreas descobertas	80	0,02	0,000	-	-	-	-
	14	0,06	0,000	-	-	-	-
	28	0,17	0,002	-	-	-	-
Áreas descobertas	56	0,17	0,003	-	-	-	-
	112	0,40	0,007	-	-	-	-
Total	-	100	0,936	-	-	-	-
BFI natural da média global dos cenários (1985-2018) estimada para o domínio							0,872

*Na delimitação de florestas na condição natural;

**Na delimitação de áreas campestres da condição natural.

Fonte: Elaboração própria.

**APÊNDICE B – Dados de calibração do BFI médio global da condição natural do
Domínio Hidrogeológico Bacia Sedimentar Paleozoica**

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
CENÁRIO DE 1985							
Florestas*	2	1,98	0,005	46,01	0,002	53,99	0,003
	4	7,15	0,046	53,08	0,021	46,92	0,030
	8	10,16	0,091	60,67	0,041	39,33	0,057
	16	37,34	0,373	69,33	0,166	30,67	0,217
Silvicultura*	6	0,09	0,000	2,80	0,000	97,20	0,000
	12	0,26	0,002	2,66	0,001	97,34	0,002
	24	0,26	0,003	2,14	0,001	97,86	0,003
	48	0,25	0,003	0,62	0,001	99,38	0,003
Pastagens e áreas campestres**	10	1,79	0,007	100,00	0,003	0,00	0,003
	20	4,61	0,044	100,00	0,019	0,00	0,019
	40	3,01	0,036	100,00	0,016	0,00	0,016
	80	2,22	0,029	100,00	0,013	0,00	0,013
Pastagens e áreas campestres*	10	1,24	0,005	46,25	0,002	53,75	0,003
	20	3,68	0,035	39,93	0,016	60,07	0,025
	40	3,62	0,043	28,81	0,019	71,19	0,033
	80	7,73	0,101	18,67	0,045	81,33	0,081
Áreas cultivadas e descobertas*	14	0,91	0,004	38,09	0,002	61,91	0,003
	28	2,28	0,026	29,92	0,012	70,08	0,020
	56	2,62	0,041	26,96	0,018	73,04	0,031
	112	8,27	0,141	26,10	0,062	73,90	0,109
Áreas urbanizadas*	18	0,08	0,001	10,09	0,000	89,91	0,001
	36	0,10	0,003	3,94	0,002	96,06	0,003
	72	0,08	0,004	2,59	0,002	97,41	0,003
	144	0,26	0,014	2,55	0,006	97,45	0,012
Total	-	100	1,059	-	0,470	-	0,690
CENÁRIO DE 1993							
Florestas*	2	2,00	0,005	0,005	0,002	53,51	0,003
	4	7,24	0,047	0,047	0,020	46,28	0,029
	8	10,51	0,095	0,095	0,039	37,23	0,054
	16	38,58	0,386	0,386	0,160	28,37	0,206
Silvicultura*	6	0,18	0,001	0,001	0,000	94,30	0,000
	12	0,56	0,005	0,005	0,002	94,24	0,004
	24	0,55	0,007	0,007	0,003	95,49	0,006
	48	0,49	0,007	0,007	0,003	98,78	0,005
Pastagens e áreas campestres**	10	1,79	0,007	0,007	0,003	0,00	0,003
	20	4,61	0,044	0,044	0,018	0,00	0,018
	40	3,01	0,036	0,036	0,015	0,00	0,015
	80	2,22	0,029	0,029	0,012	0,00	0,012
Pastagens e áreas campestres*	10	0,89	0,004	0,004	0,001	66,75	0,002
	20	2,67	0,025	0,025	0,011	71,08	0,018
	40	2,69	0,032	0,032	0,013	78,61	0,024
	80	5,71	0,074	0,074	0,031	86,22	0,057
Áreas cultivadas e descobertas*	14	1,16	0,005	0,005	0,002	51,56	0,003
	28	2,92	0,034	0,034	0,014	61,60	0,023
	56	2,94	0,046	0,046	0,019	69,80	0,032
	112	8,94	0,152	0,152	0,063	71,79	0,108
Áreas urbanizadas*	18	0,08	0,001	0,001	0,000	90,87	0,001
	36	0,09	0,003	0,003	0,001	96,78	0,002
	72	0,06	0,003	0,003	0,001	98,18	0,002
	144	0,14	0,008	0,008	0,003	98,60	0,006
Total	-	100	1,053	1,053	0,437	-	0,634
CENÁRIO DE 2001							

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
Florestas*	2	1,91	0,005	44,55	0,002	55,45	0,003
	4	6,97	0,045	51,76	0,019	48,24	0,028
	8	10,09	0,091	60,28	0,038	39,72	0,053
	16	38,35	0,383	71,19	0,160	28,81	0,206
Silvicultura*	6	0,17	0,001	5,49	0,000	94,51	0,000
	12	0,55	0,005	5,67	0,002	94,33	0,004
	24	0,53	0,007	4,34	0,003	95,66	0,005
	48	0,46	0,006	1,15	0,003	98,85	0,005
Pastagens e áreas campestres**	10	1,79	0,007	100,00	0,003	0,00	0,003
	20	4,61	0,044	100,00	0,018	0,00	0,018
	40	3,01	0,036	100,00	0,015	0,00	0,015
Pastagens e áreas campestres*	80	2,22	0,029	100,00	0,012	0,00	0,012
	10	1,14	0,005	42,39	0,002	57,61	0,003
	20	3,23	0,031	35,00	0,013	65,00	0,021
	40	3,09	0,037	24,61	0,015	75,39	0,027
Áreas cultivadas e descobertas*	80	5,67	0,074	13,68	0,031	86,32	0,057
	14	1,00	0,005	41,89	0,002	58,11	0,003
	28	2,64	0,030	34,66	0,013	65,34	0,021
Áreas urbanizadas*	56	2,97	0,046	30,54	0,019	69,46	0,033
	112	9,26	0,157	29,22	0,066	70,78	0,112
	18	0,08	0,001	9,23	0,000	90,77	0,001
Total	36	0,08	0,003	3,13	0,001	96,87	0,002
	72	0,06	0,003	1,84	0,001	98,16	0,002
	144	0,13	0,007	1,23	0,003	98,77	0,005
Total	-	100	1,056	-	0,441	-	0,642
CENÁRIO DE 2009							
Florestas*	2	2,21	0,006	51,44	0,002	48,56	0,003
	4	7,65	0,050	56,80	0,021	43,20	0,030
	8	10,17	0,092	60,74	0,038	39,26	0,053
	16	37,52	0,375	69,67	0,157	30,33	0,205
Silvicultura*	6	0,45	0,002	14,70	0,001	85,30	0,001
	12	1,51	0,014	15,50	0,006	84,50	0,011
	24	1,41	0,017	11,49	0,007	88,51	0,014
	48	1,39	0,019	3,47	0,008	96,53	0,015
Pastagens e áreas campestres**	10	1,79	0,007	100,00	0,003	0,00	0,003
	20	4,61	0,044	100,00	0,018	0,00	0,018
	40	3,01	0,036	100,00	0,015	0,00	0,015
Pastagens e áreas campestres*	80	2,22	0,029	100,00	0,012	0,00	0,012
	10	0,34	0,001	12,84	0,001	87,16	0,001
	20	0,84	0,008	9,13	0,003	90,87	0,006
	40	1,37	0,016	10,90	0,007	89,10	0,013
Áreas cultivadas e descobertas*	80	4,92	0,064	11,88	0,027	88,12	0,050
	14	1,20	0,005	50,43	0,002	49,57	0,003
	28	3,38	0,039	44,38	0,016	55,62	0,025
Áreas urbanizadas*	56	3,73	0,058	38,40	0,024	61,60	0,039
	112	9,89	0,168	31,21	0,071	68,79	0,119
	18	0,09	0,001	10,59	0,000	89,41	0,001
Total	36	0,09	0,003	3,42	0,001	96,58	0,002
	72	0,06	0,003	1,97	0,001	98,03	0,002
	144	0,14	0,007	1,35	0,003	98,65	0,006
Total	-	100	1,064	-	0,446	-	0,651
CENÁRIO DE 2018							
Florestas*	2	1,96	0,005	45,71	0,002	54,29	0,003
	4	6,56	0,043	48,68	0,018	51,32	0,028
	8	9,02	0,081	53,85	0,035	46,15	0,051
	16	35,78	0,358	66,43	0,153	33,57	0,205
Silvicultura*	6	1,44	0,005	46,95	0,002	53,05	0,003
	12	4,37	0,039	44,95	0,017	55,05	0,026

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
	24	3,68	0,045	30,01	0,019	69,99	0,033
	48	3,89	0,052	9,74	0,022	90,26	0,043
Pastagens e áreas campestres**	10	1,79	0,007	100,00	0,003	0,00	0,003
	20	4,61	0,044	100,00	0,019	0,00	0,019
	40	3,01	0,036	100,00	0,015	0,00	0,015
	80	2,22	0,029	100,00	0,012	0,00	0,012
Pastagens e áreas campestres*	10	-0,18	-0,001	-6,57	0,000	106,57	-0,001
	20	-0,16	-0,002	-1,72	-0,001	101,72	-0,001
	40	1,24	0,015	9,89	0,006	90,11	0,012
	80	6,56	0,085	15,84	0,037	84,16	0,067
Áreas cultivadas e descobertas*	14	0,97	0,004	40,49	0,002	59,51	0,003
	28	2,59	0,030	34,06	0,013	65,94	0,021
	56	2,74	0,042	28,13	0,018	71,87	0,031
	112	7,47	0,127	23,57	0,054	76,43	0,096
Áreas urbanizadas*	18	0,10	0,001	12,39	0,001	87,61	0,001
	36	0,11	0,003	3,99	0,001	96,01	0,003
	72	0,07	0,003	2,29	0,001	97,71	0,003
	144	0,16	0,008	1,56	0,004	98,44	0,007
Total	-	100	1,063	-	0,455	-	0,684
CENÁRIO DE CONDIÇÃO NATURAL							
Florestas	2	4,30	0,011	-	-	-	-
	4	13,47	0,088	-	-	-	-
	8	16,75	0,151	-	-	-	-
	16	53,86	0,539	-	-	-	-
Áreas campestres	10	1,79	0,007	-	-	-	-
	20	4,61	0,044	-	-	-	-
	40	3,01	0,036	-	-	-	-
	80	2,22	0,029	-	-	-	-
Total	-	100	0,904	-	-	-	-
BFI natural da média global dos cenários (1985-2018) estimada para o domínio							0,660

*Na delimitação de florestas na condição natural;

**Na delimitação de áreas campestres da condição natural.

Fonte: Elaboração própria.

**APÊNDICE C – Dados de calibração do BFI médio global da condição natural do
Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Não Confinado e Semiconfinado**

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
CENÁRIO DE 1985							
Florestas*	2	3,02	0,008	31,40	0,004	68,60	0,007
	4	8,10	0,053	62,09	0,028	37,91	0,038
	8	12,29	0,111	78,22	0,058	21,78	0,071
	16	47,79	0,478	88,92	0,250	11,08	0,278
Silvicultura*	6	0,05	0,000	0,70	0,000	99,30	0,000
	12	0,07	0,001	0,73	0,000	99,27	0,001
	24	0,08	0,001	0,68	0,001	99,32	0,001
	48	0,15	0,002	0,38	0,001	99,62	0,002
Pastagens e áreas campestres**	10	2,01	0,008	100,00	0,004	0,00	0,004
	20	2,25	0,021	100,00	0,011	0,00	0,011
	40	1,50	0,018	100,00	0,009	0,00	0,009
	80	2,12	0,028	100,00	0,014	0,00	0,014
Pastagens e áreas campestres*	10	2,61	0,010	43,42	0,005	56,58	0,009
	20	2,80	0,027	31,33	0,014	68,67	0,023
	40	1,88	0,023	15,92	0,012	84,08	0,022
	80	2,87	0,037	6,94	0,020	93,06	0,038
Áreas cultivadas e descobertas*	14	3,73	0,017	69,83	0,009	30,17	0,011
	28	2,01	0,023	27,20	0,012	72,80	0,021
	56	1,43	0,022	15,64	0,012	84,36	0,021
	112	2,89	0,049	9,13	0,026	90,87	0,049
Áreas urbanizadas*	18	0,22	0,003	11,65	0,001	88,35	0,003
	36	0,07	0,002	2,76	0,001	97,24	0,002
	72	0,04	0,002	1,20	0,001	98,80	0,002
	144	0,05	0,003	0,50	0,001	99,50	0,003
Total	-	100	0,945	-	0,495	-	0,641
CENÁRIO DE 1993							
Florestas*	2	3,03	0,008	31,50	0,004	68,50	0,007
	4	8,13	0,053	62,29	0,027	37,71	0,037
	8	12,36	0,111	78,62	0,057	21,38	0,069
	16	47,01	0,470	87,46	0,242	12,54	0,272
Silvicultura*	6	0,04	0,000	0,55	0,000	99,45	0,000
	12	0,06	0,001	0,65	0,000	99,35	0,001
	24	0,07	0,001	0,63	0,000	99,37	0,001
	48	0,16	0,002	0,41	0,001	99,59	0,002
Pastagens e áreas campestres**	10	2,01	0,008	100,00	0,004	0,00	0,004
	20	2,25	0,021	100,00	0,011	0,00	0,011
	40	1,50	0,018	100,00	0,009	0,00	0,009
	80	2,12	0,028	100,00	0,014	0,00	0,014
Pastagens e áreas campestres*	10	0,90	0,004	15,07	0,002	84,93	0,003
	20	1,09	0,010	12,19	0,005	87,81	0,010
	40	0,81	0,010	6,86	0,005	93,14	0,010
	80	1,53	0,020	3,69	0,010	96,31	0,020
Áreas cultivadas e descobertas*	14	5,39	0,024	101,03	0,012	198,97	0,037
	28	3,71	0,043	50,33	0,022	49,67	0,033
	56	2,52	0,039	27,65	0,020	72,35	0,035
	112	4,99	0,085	15,80	0,044	84,20	0,080
Áreas urbanizadas*	18	0,23	0,003	12,37	0,002	87,63	0,003
	36	0,06	0,002	2,19	0,001	97,81	0,002
	72	0,02	0,001	0,53	0,000	99,47	0,001
	144	0,01	0,001	0,11	0,000	99,89	0,001
Total	-	100	0,961	-	0,494	-	0,662
CENÁRIO DE 2001							
Florestas*	2	2,85	0,007	29,70	0,004	70,30	0,006

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
	4	7,72	0,050	59,15	0,025	40,85	0,035
	8	11,95	0,108	76,05	0,054	23,95	0,067
	16	47,36	0,474	88,12	0,237	11,88	0,265
Silvicultura*	6	0,07	0,000	0,98	0,000	99,02	0,000
	12	0,10	0,001	1,04	0,000	98,96	0,001
	24	0,11	0,001	0,92	0,001	99,08	0,001
	48	0,24	0,003	0,60	0,002	99,40	0,003
Pastagens e áreas campestres**	10	2,01	0,008	100,00	0,004	0,00	0,004
	20	2,25	0,021	100,00	0,011	0,00	0,011
	40	1,50	0,018	100,00	0,009	0,00	0,009
	80	2,12	0,028	100,00	0,014	0,00	0,014
Pastagens e áreas campestres*	10	1,25	0,005	20,84	0,003	79,16	0,004
	20	1,53	0,015	17,13	0,007	82,87	0,013
	40	1,05	0,013	8,92	0,006	91,08	0,012
	80	1,44	0,019	3,49	0,009	96,51	0,018
Áreas cultivadas e descobertas*	14	5,19	0,023	97,21	0,012	2,79	0,012
	28	3,63	0,042	49,18	0,021	50,82	0,031
	56	2,57	0,040	28,15	0,020	71,85	0,034
	112	4,68	0,080	14,80	0,040	85,20	0,074
Áreas urbanizadas*	18	0,25	0,003	13,74	0,002	86,26	0,003
	36	0,07	0,002	2,73	0,001	97,27	0,002
	72	0,03	0,002	1,09	0,001	98,91	0,002
	144	0,03	0,001	0,27	0,001	99,73	0,001
Total	-	100	0,963	-	0,481	-	0,623
CENÁRIO DE 2009							
Florestas*	2	2,93	0,007	30,52	0,004	69,48	0,006
	4	7,67	0,050	58,77	0,025	41,23	0,036
	8	11,86	0,107	75,47	0,055	24,53	0,068
	16	47,60	0,476	88,56	0,243	11,44	0,271
Silvicultura*	6	0,13	0,000	1,97	0,000	98,03	0,000
	12	0,25	0,002	2,64	0,001	97,36	0,002
	24	0,26	0,003	2,28	0,002	97,72	0,003
	48	0,49	0,007	1,24	0,003	98,76	0,007
Pastagens e áreas campestres**	10	2,01	0,008	100,00	0,004	0,00	0,004
	20	2,25	0,021	100,00	0,011	0,00	0,011
	40	1,50	0,018	100,00	0,009	0,00	0,009
	80	2,12	0,028	100,00	0,014	0,00	0,014
Pastagens e áreas campestres*	10	1,16	0,005	19,31	0,002	80,69	0,004
	20	1,59	0,015	17,85	0,008	82,15	0,014
	40	1,25	0,015	10,57	0,008	89,43	0,014
	80	1,83	0,024	4,44	0,012	95,56	0,024
Áreas cultivadas e descobertas*	14	5,12	0,023	95,98	0,012	4,02	0,012
	28	3,46	0,040	46,87	0,020	53,13	0,031
	56	2,31	0,036	25,28	0,018	74,72	0,032
	112	3,79	0,064	11,99	0,033	88,01	0,062
Áreas urbanizadas*	18	0,27	0,003	14,42	0,002	85,58	0,003
	36	0,08	0,002	2,93	0,001	97,07	0,003
	72	0,04	0,002	1,15	0,001	98,85	0,002
	144	0,03	0,001	0,28	0,001	99,72	0,002
Total	-	100	0,958	-	0,490	-	0,636
CENÁRIO DE 2018							
Florestas*	2	2,88	0,007	29,95	0,004	70,05	0,006
	4	7,55	0,049	57,87	0,024	42,13	0,035
	8	11,82	0,106	75,22	0,053	24,78	0,066
	16	47,30	0,473	88,01	0,235	11,99	0,264
Silvicultura*	6	0,24	0,001	3,47	0,000	96,53	0,001
	12	0,49	0,004	5,21	0,002	94,79	0,004
	24	0,53	0,006	4,57	0,003	95,43	0,006

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
	48	1,26	0,017	3,16	0,008	96,84	0,017
	10	2,01	0,008	100,00	0,004	0,00	0,004
Pastagens e áreas campestres**	20	2,25	0,021	100,00	0,011	0,00	0,011
	40	1,50	0,018	100,00	0,009	0,00	0,009
	80	2,12	0,028	100,00	0,014	0,00	0,014
Pastagens e áreas campestres*	10	1,45	0,006	24,13	0,003	75,87	0,005
	20	1,75	0,017	19,60	0,008	80,40	0,015
	40	1,35	0,016	11,47	0,008	88,53	0,015
	80	1,81	0,023	4,37	0,012	95,63	0,023
Áreas cultivadas e descobertas*	14	4,74	0,021	88,81	0,011	11,19	0,012
	28	3,18	0,037	43,06	0,018	56,94	0,029
	56	2,05	0,032	22,49	0,016	77,51	0,028
	112	3,32	0,056	10,50	0,028	89,50	0,053
	18	0,28	0,004	15,41	0,002	84,59	0,003
Áreas urbanizadas*	36	0,08	0,003	3,04	0,001	96,96	0,003
	72	0,03	0,001	0,88	0,001	99,12	0,001
	144	0,02	0,001	0,19	0,001	99,81	0,001
Total	-	100	0,956	-	0,476	-	0,624
CENÁRIO DE CONDIÇÃO NATURAL							
	2	9,61	0,024	-	-	-	-
Florestas	4	13,05	0,085	-	-	-	-
	8	15,72	0,141	-	-	-	-
	16	53,75	0,537	-	-	-	-
	10	2,01	0,008	-	-	-	-
Áreas campestres	20	2,25	0,021	-	-	-	-
	40	1,50	0,018	-	-	-	-
	80	2,12	0,028	-	-	-	-
Total	-	100	0,863	-	-	-	-
BFI natural da média global dos cenários (1985-2018) estimada para o domínio							0,637

*Na delimitação de florestas na condição natural;

**Na delimitação de áreas campestres da condição natural.

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE D – Dados de calibração do BFI médio global da condição natural do Domínio Hidrogeológico SAIG/SG com SAG Semiconfinado a Confinado

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
CENÁRIO DE 1985							
Florestas*	2	3,51	0,009	21,71	0,003	78,29	0,005
	4	5,94	0,039	24,22	0,013	75,78	0,023
	8	4,88	0,044	32,10	0,015	67,90	0,025
	16	21,69	0,217	49,18	0,073	50,82	0,110
Silvicultura*	6	0,08	0,000	0,69	0,000	99,31	0,000
	12	0,11	0,001	0,61	0,000	99,39	0,001
	24	0,07	0,001	0,62	0,000	99,38	0,001
	48	0,09	0,001	0,27	0,000	99,73	0,001
Pastagens e áreas campestres*	10	0,90	0,004	8,87	0,001	91,13	0,002
	20	1,41	0,013	8,38	0,004	91,62	0,009
	40	1,17	0,014	10,26	0,005	89,74	0,009
Áreas cultivadas e descobertas*	80	3,89	0,051	11,45	0,017	88,55	0,032
	14	11,59	0,052	129,04	0,017	170,96	0,047
	28	16,98	0,195	122,49	0,065	177,51	0,181
Áreas urbanizadas*	56	9,02	0,140	102,32	0,047	197,68	0,139
	112	18,40	0,313	70,92	0,105	29,08	0,135
	18	0,09	0,001	2,91	0,000	97,09	0,001
Total	36	0,09	0,003	1,88	0,001	98,12	0,002
	72	0,05	0,002	1,65	0,001	98,35	0,001
	144	0,04	0,002	0,51	0,001	99,49	0,002
Total	-	100	1,102	-	0,369	-	0,725
CENÁRIO DE 1993							
Florestas*	2	2,67	0,007	16,49	0,002	83,51	0,004
	4	4,52	0,029	18,41	0,009	81,59	0,016
	8	3,72	0,034	24,51	0,010	75,49	0,018
	16	17,71	0,177	40,15	0,055	59,85	0,087
Silvicultura*	6	0,06	0,000	0,49	0,000	99,51	0,000
	12	0,08	0,001	0,45	0,000	99,55	0,000
	24	0,06	0,001	0,58	0,000	99,42	0,000
	48	0,07	0,001	0,22	0,000	99,78	0,001
Pastagens e áreas campestres*	10	1,04	0,004	10,32	0,001	89,68	0,002
	20	1,96	0,019	11,69	0,006	88,31	0,011
	40	2,00	0,024	17,54	0,007	82,46	0,013
Áreas cultivadas e descobertas*	80	7,46	0,097	21,99	0,030	78,01	0,053
	14	12,31	0,055	136,98	0,017	163,02	0,045
	28	17,86	0,205	128,83	0,063	171,17	0,172
Áreas urbanizadas*	56	9,35	0,145	106,00	0,045	194,00	0,131
	112	18,83	0,320	72,57	0,099	27,43	0,126
	18	0,10	0,001	3,12	0,000	96,88	0,001
Total	36	0,11	0,004	2,26	0,001	97,74	0,002
	72	0,05	0,002	1,74	0,001	98,26	0,001
	144	0,04	0,002	0,52	0,001	99,48	0,001
Total	-	100	1,128	-	0,348	-	0,687
CENÁRIO DE 2001							
Florestas*	2	2,18	0,005	13,46	0,002	86,54	0,003
	4	3,83	0,025	15,62	0,008	84,38	0,015
	8	3,60	0,032	23,72	0,011	76,28	0,019
	16	18,11	0,181	41,06	0,059	58,94	0,094
Silvicultura*	6	0,09	0,000	0,81	0,000	99,19	0,000
	12	0,17	0,002	0,94	0,000	99,06	0,001
	24	0,10	0,001	0,93	0,000	99,07	0,001
	48	0,14	0,002	0,42	0,001	99,58	0,001

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
Pastagens e áreas campestres*	10	1,77	0,007	17,49	0,002	82,51	0,004
	20	3,22	0,031	19,18	0,010	80,82	0,018
	40	3,38	0,041	29,66	0,013	70,34	0,023
	80	10,66	0,139	31,40	0,045	68,60	0,076
Áreas cultivadas e descobertas*	14	12,03	0,054	133,86	0,018	166,14	0,047
	28	17,18	0,198	123,96	0,064	176,04	0,178
	56	8,05	0,125	91,22	0,041	8,78	0,044
Áreas urbanizadas*	112	15,17	0,258	58,46	0,084	41,54	0,119
	18	0,11	0,001	3,39	0,000	96,61	0,001
	36	0,12	0,004	2,58	0,001	97,42	0,003
	72	0,06	0,003	1,93	0,001	98,07	0,002
Total	-	100	1,110	-	0,362	-	0,650
CENÁRIO DE 2009							
Florestas*	2	2,54	0,006	15,69	0,002	84,31	0,004
	4	4,06	0,026	16,55	0,009	83,45	0,016
	8	3,67	0,033	24,14	0,011	75,86	0,020
	16	17,92	0,179	40,62	0,061	59,38	0,097
Silvicultura*	6	0,17	0,001	1,49	0,000	98,51	0,000
	12	0,29	0,003	1,65	0,001	98,35	0,002
	24	0,19	0,002	1,70	0,001	98,30	0,002
	48	0,43	0,006	1,33	0,002	98,67	0,004
Pastagens e áreas campestres*	10	1,26	0,005	12,42	0,002	87,58	0,003
	20	2,62	0,025	15,61	0,008	84,39	0,016
	40	3,20	0,038	28,08	0,013	71,92	0,022
	80	10,35	0,135	30,50	0,046	69,50	0,078
Áreas cultivadas e descobertas*	14	12,09	0,054	134,57	0,019	165,43	0,049
	28	17,42	0,200	125,67	0,068	174,33	0,187
	56	8,07	0,125	91,53	0,043	8,47	0,046
	112	15,37	0,261	59,25	0,089	40,75	0,125
Áreas urbanizadas*	18	0,12	0,001	3,70	0,001	96,30	0,001
	36	0,13	0,004	2,75	0,001	97,25	0,003
	72	0,06	0,003	2,01	0,001	97,99	0,002
	144	0,04	0,002	0,53	0,001	99,47	0,002
Total	-	100	1,111	-	0,378	-	0,679
CENÁRIO DE 2018							
Florestas*	2	2,56	0,006	15,83	0,002	84,17	0,004
	4	3,86	0,025	15,74	0,009	84,26	0,016
	8	3,39	0,031	22,34	0,010	77,66	0,019
	16	16,80	0,168	38,08	0,057	61,92	0,093
Silvicultura*	6	0,21	0,001	1,83	0,000	98,17	0,001
	12	0,39	0,004	2,20	0,001	97,80	0,002
	24	0,33	0,004	2,95	0,001	97,05	0,003
	48	1,08	0,015	3,29	0,005	96,71	0,010
Pastagens e áreas campestres*	10	1,32	0,005	13,01	0,002	86,99	0,003
	20	3,08	0,029	18,36	0,010	81,64	0,018
	40	4,38	0,053	38,47	0,018	61,53	0,029
	80	15,78	0,205	46,50	0,070	53,50	0,108
Áreas cultivadas e descobertas*	14	11,95	0,054	132,98	0,018	167,02	0,049
	28	17,04	0,196	122,92	0,067	177,08	0,186
	56	7,02	0,109	79,56	0,037	20,44	0,045
	112	10,42	0,177	40,15	0,061	59,85	0,097
Áreas urbanizadas*	18	0,14	0,002	4,41	0,001	95,59	0,001
	36	0,15	0,005	3,18	0,002	96,82	0,003
	72	0,07	0,003	2,26	0,001	97,74	0,002
	144	0,05	0,002	0,55	0,001	99,45	0,002
Total	-	100	1,093	-	0,374	-	0,690
CENÁRIO DE CONDIÇÃO NATURAL							

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
	2	16,17	0,040	-	-	-	-
	4	24,52	0,159	-	-	-	-
Florestas	8	15,19	0,137	-	-	-	-
	16	44,11	0,441	-	-	-	-
Total	-	100	0,778	-	-	-	-
BFI natural da média global dos cenários (1985-2018) estimada para o domínio							0,686

*Na delimitação de florestas na condição natural.

Fonte: Elaboração própria.

**APÊNDICE E – Dados de calibração do BFI médio global da condição natural do
Domínio Hidrogeológico Depósitos Cenozoicos**

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
CENÁRIO DE 1985							
Florestas*	2	4,35	0,011	13,78	0,004	86,22	0,007
	4	5,73	0,037	57,28	0,012	42,72	0,017
	8	6,90	0,062	72,35	0,020	27,65	0,026
	16	38,96	0,390	90,57	0,126	9,43	0,138
Silvicultura*	6	0,02	0,000	0,09	0,000	99,91	0,000
	12	0,02	0,000	0,30	0,000	99,70	0,000
	24	0,01	0,000	0,13	0,000	99,87	0,000
	48	0,01	0,000	0,04	0,000	99,96	0,000
Pastagens e áreas campestres**	10	2,30	0,009	100,00	0,003	0,00	0,003
	20	1,94	0,018	100,00	0,006	0,00	0,006
	40	0,82	0,010	100,00	0,003	0,00	0,003
	80	0,87	0,011	100,00	0,004	0,00	0,004
Pastagens e áreas campestres*	10	2,37	0,009	12,01	0,003	87,99	0,006
	20	0,76	0,007	11,04	0,002	88,96	0,004
	40	0,51	0,006	7,20	0,002	92,80	0,004
	80	1,03	0,013	3,11	0,004	96,89	0,009
Áreas cultivadas e descobertas*	14	24,53	0,110	140,03	0,036	159,97	0,093
	28	3,48	0,040	61,55	0,013	38,45	0,018
	56	2,10	0,033	37,98	0,011	62,02	0,017
	112	2,99	0,051	11,84	0,016	88,16	0,031
Áreas urbanizadas*	18	0,27	0,003	4,41	0,001	95,59	0,002
	36	0,02	0,001	0,84	0,000	99,16	0,000
	72	0,01	0,001	0,58	0,000	99,42	0,000
	144	0,02	0,001	0,20	0,000	99,80	0,001
Total	-	100	0,824	-	0,266	-	0,387
CENÁRIO DE 1993							
Florestas*	2	3,31	0,008	10,50	0,003	89,50	0,006
	4	5,29	0,034	52,89	0,013	47,11	0,019
	8	6,47	0,058	67,93	0,022	32,07	0,028
	16	37,89	0,379	88,10	0,140	11,90	0,157
Silvicultura*	6	0,02	0,000	0,08	0,000	99,92	0,000
	12	0,02	0,000	0,23	0,000	99,77	0,000
	24	0,01	0,000	0,11	0,000	99,89	0,000
	48	0,02	0,000	0,06	0,000	99,94	0,000
Pastagens e áreas campestres**	10	2,30	0,009	100,00	0,003	0,00	0,003
	20	1,94	0,018	100,00	0,007	0,00	0,007
	40	0,82	0,010	100,00	0,004	0,00	0,004
	80	0,87	0,011	100,00	0,004	0,00	0,004
Pastagens e áreas campestres*	10	1,72	0,007	8,72	0,003	91,28	0,005
	20	0,70	0,007	10,17	0,002	89,83	0,005
	40	0,48	0,006	6,77	0,002	93,23	0,004
	80	1,22	0,016	3,67	0,006	96,33	0,011
Áreas cultivadas e descobertas*	14	26,11	0,118	149,07	0,044	150,93	0,109
	28	3,98	0,046	70,40	0,017	29,60	0,022
	56	2,55	0,040	46,14	0,015	53,86	0,023
	112	3,86	0,066	15,26	0,024	84,74	0,045
Áreas urbanizadas*	18	0,37	0,005	6,11	0,002	93,89	0,003
	36	0,02	0,001	1,00	0,000	99,00	0,000
	72	0,01	0,001	0,66	0,000	99,34	0,000
	144	0,02	0,001	0,24	0,000	99,76	0,001
Total	-	100	0,840	-	0,311	-	0,457
CENÁRIO DE 2001							
Florestas*	2	2,27	0,006	7,21	0,002	92,79	0,004

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
	4	4,85	0,032	48,48	0,011	51,52	0,016
	8	6,30	0,057	66,15	0,019	33,85	0,026
	16	37,12	0,371	86,32	0,127	13,68	0,144
Silvicultura*	6	0,08	0,000	0,34	0,000	99,66	0,000
	12	0,04	0,000	0,53	0,000	99,47	0,000
	24	0,02	0,000	0,27	0,000	99,73	0,000
	48	0,03	0,000	0,09	0,000	99,91	0,000
Pastagens e áreas campestres**	10	2,30	0,009	100,00	0,003	0,00	0,003
	20	1,94	0,018	100,00	0,006	0,00	0,006
	40	0,82	0,010	100,00	0,003	0,00	0,003
Pastagens e áreas campestres*	80	0,87	0,011	100,00	0,004	0,00	0,004
	10	1,57	0,006	7,97	0,002	92,03	0,004
	20	0,96	0,009	13,98	0,003	86,02	0,006
Áreas cultivadas e descobertas*	40	0,72	0,009	10,12	0,003	89,88	0,006
	80	1,62	0,021	4,89	0,007	95,11	0,014
	14	27,15	0,122	155,01	0,042	144,99	0,102
Áreas urbanizadas*	28	4,13	0,048	73,12	0,016	26,88	0,021
	56	2,47	0,038	44,65	0,013	55,35	0,020
	112	4,22	0,072	16,66	0,024	83,34	0,045
Total	18	0,46	0,006	7,53	0,002	92,47	0,004
	36	0,03	0,001	1,27	0,000	98,73	0,001
	72	0,01	0,001	0,73	0,000	99,27	0,000
	144	0,02	0,001	0,26	0,000	99,74	0,001
Total	-	100	0,848	-	0,290	-	0,431
CENÁRIO DE 2009							
Florestas*	2	2,42	0,006	7,67	0,002	92,33	0,004
	4	4,95	0,032	49,49	0,012	50,51	0,019
	8	6,53	0,059	68,53	0,023	31,47	0,030
	16	37,60	0,376	87,41	0,145	12,59	0,164
Silvicultura*	6	0,08	0,000	0,36	0,000	99,64	0,000
	12	0,06	0,001	0,86	0,000	99,14	0,000
	24	0,05	0,001	0,67	0,000	99,33	0,000
	48	0,10	0,001	0,31	0,001	99,69	0,001
Pastagens e áreas campestres**	10	2,30	0,009	100,00	0,004	0,00	0,004
	20	1,94	0,018	100,00	0,007	0,00	0,007
	40	0,82	0,010	100,00	0,004	0,00	0,004
Pastagens e áreas campestres*	80	0,87	0,011	100,00	0,004	0,00	0,004
	10	0,80	0,003	4,06	0,001	95,94	0,002
	20	0,67	0,006	9,72	0,002	90,28	0,005
Áreas cultivadas e descobertas*	40	0,59	0,007	8,31	0,003	91,69	0,005
	80	1,25	0,016	3,79	0,006	96,21	0,012
	14	27,74	0,125	158,36	0,048	141,64	0,117
Áreas urbanizadas*	28	4,30	0,049	76,02	0,019	23,98	0,024
	56	2,35	0,036	42,38	0,014	57,62	0,022
	112	4,04	0,069	15,96	0,027	84,04	0,049
Total	18	0,49	0,006	8,09	0,002	91,91	0,005
	36	0,03	0,001	1,42	0,000	98,58	0,001
	72	0,01	0,001	0,73	0,000	99,27	0,000
	144	0,02	0,001	0,27	0,000	99,73	0,001
Total	-	100	0,846	-	0,327	-	0,481
CENÁRIO DE 2018							
Florestas*	2	2,67	0,007	8,47	0,002	91,53	0,004
	4	5,06	0,033	50,54	0,011	49,46	0,016
	8	6,61	0,059	69,35	0,020	30,65	0,026
	16	37,82	0,378	87,92	0,125	12,08	0,141
Silvicultura*	6	0,16	0,001	0,69	0,000	99,31	0,000
	12	0,23	0,002	3,20	0,001	96,80	0,001
	24	0,19	0,002	2,77	0,001	97,23	0,002

Uso e cobertura da terra	Chave-primária da VmES	Área (%)	VmES específica observada (m/s)	CVmES específica natural	BFI específico observado	% para estimar BFI específico na condição natural	BFI específico natural estimado pelo CVmES
	48	0,28	0,004	0,88	0,001	99,12	0,003
	10	2,30	0,009	100,00	0,003	0,00	0,003
Pastagens e áreas campestres**	20	1,94	0,018	100,00	0,006	0,00	0,006
	40	0,82	0,010	100,00	0,003	0,00	0,003
	80	0,87	0,011	100,00	0,004	0,00	0,004
Pastagens e áreas campestres*	10	1,28	0,005	6,49	0,002	93,51	0,003
	20	0,77	0,007	11,24	0,002	88,76	0,005
	40	0,69	0,008	9,61	0,003	90,39	0,005
	80	1,27	0,017	3,85	0,005	96,15	0,011
Áreas cultivadas e descobertas*	14	26,87	0,121	153,39	0,040	146,61	0,099
	28	3,91	0,045	69,11	0,015	30,89	0,020
	56	2,02	0,031	36,56	0,010	63,44	0,017
	112	3,62	0,061	14,29	0,020	85,71	0,038
	18	0,55	0,007	9,14	0,002	90,86	0,005
Áreas urbanizadas*	36	0,04	0,001	2,05	0,000	97,95	0,001
	72	0,02	0,001	0,98	0,000	99,02	0,001
	144	0,02	0,001	0,29	0,000	99,71	0,001
Total	-	100	0,841	-	0,279	-	0,413
CENÁRIO DE CONDIÇÃO NATURAL							
	2	31,53	0,079	-	-	-	-
Florestas	4	10,00	0,065	-	-	-	-
	8	9,53	0,086	-	-	-	-
	16	43,01	0,430	-	-	-	-
	10	2,30	0,009	-	-	-	-
Áreas campestres	20	1,94	0,018	-	-	-	-
	40	0,82	0,010	-	-	-	-
	80	0,87	0,011	-	-	-	-
Total	-	100	0,708	-	-	-	-
BFI natural da média global dos cenários (1985-2018) estimada para o domínio							0,434

*Na delimitação de florestas na condição natural;

**Na delimitação de áreas campestres da condição natural.

Fonte: Elaboração própria.