

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Tese

**Respostas Hidrológicas a Diferentes Cenários de Cobertura da Terra em
Áreas de Captação Hierarquizadas de uma Bacia Hidrográfica do Extremo
Sul do Brasil**

José Antônio Weykamp da Cruz

Pelotas, 2023

José Antônio Weykamp da Cruz

**Respostas Hidrológicas a Diferentes Cenários de Cobertura da Terra em
Áreas de Captação Hierarquizadas de uma Bacia Hidrográfica do Extremo
Sul do Brasil**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos.

Orientador: Carlos Rogério de Mello

Coorientador: Samuel Beskow

Pelotas, 2023

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

C955r Cruz, José Antônio Weykamp da

Respostas hidrológicas a diferentes cenários de cobertura da terra em áreas de captação hierarquizadas de uma bacia hidrográfica do extremo sul do Brasil / José Antônio Weykamp da Cruz ; Carlos Rogério de Mello, orientador ; Samuel Beskow, coorientador. — Pelotas, 2023.

81 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Cobertura da terra. 2. Hierarquia fluvial. 3. Modelagem hidrológica. I. Mello, Carlos Rogério de, orient. II. Beskow, Samuel, coorient. III. Título.

CDD : 627

José Antônio Weykamp da Cruz

Respostas Hidrológicas a Diferentes Cenários de Cobertura da Terra em
Áreas de Captação Hierarquizadas de uma Bacia Hidrográfica do Extremo
Sul do Brasil

Tese aprovada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 6 de março de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello (Orientador)

Doutor em Física do Solo pela Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. Samuel Beskow (Coorientador)

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras

Dr.^a Lilian Terezinha Winckler

Doutora em Ecologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Maurício Meurer

Doutor em Geografia pela Universidade Lumière Lyon 2

Prof. Dr. José Alves Junqueira Junior

Doutor em Engenharia de Água e Solo pela Universidade Federal de Lavras

Ao Professor Haroldo Erwin Asmus
(*in memoriam*), dedico.

Agradecimentos

À minha família e amigos próximos, pela compreensão, apoio e incentivo.

Aos meus orientadores, pela disponibilidade e empenho na realização da pesquisa.

À colega Marcelle Martins Vargas, pela fundamental colaboração na etapa de modelagem hidrológica.

Ao ecólogo Rodrigo Thiel Lopes, pelo importante suporte referente à utilização de recursos de Sistema de Informação Geográfica.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pela convivência e troca de saberes.

À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pela infraestrutura e recursos disponibilizados durante o Curso.

A todos, muito obrigado.

“Ser como o rio que deflui
Silencioso dentro da noite.
Não temer as trevas da noite.
Se há estrelas nos céus, refleti-las.
E se os céus se pejam de nuvens,
Como o rio as nuvens são água,
Refleti-las também sem mágoa
Nas profundidades tranquilas.”

Manuel Bandeira

Resumo

CRUZ, José Antônio Weykamp da. **Respostas Hidrológicas a Diferentes Cenários de Cobertura da Terra em Áreas de Captação Hierarquizadas de uma Bacia Hidrográfica do Extremo Sul do Brasil**. 2023. 81 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

A cobertura da terra consiste em um importante fator condicionante da dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas, assim como a hierarquia da drenagem corresponde a uma das suas principais características morfométricas. O presente estudo baseia-se na simulação de respostas hidrológicas a diferentes cenários de cobertura da terra, considerando a influência da hierarquização das áreas de captação da bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC), no extremo sul do Brasil. O objetivo principal é avaliar a influência da hierarquização das áreas de captação na análise do comportamento hidrológico dessa bacia, em resposta a diferentes cenários de cobertura. A BHAC ocupa uma área de 121,3 km², tem relevo ondulado, solos da classe argissolo, densidade de drenagem igual a 1,83 km/km², e hierarquia fluvial de 5ª ordem. A cobertura atual da terra corresponde a um mosaico de mata, campo, área cultivada e solo exposto, diferentemente da cobertura natural, caracterizada pelo amplo predomínio de mata. Para subsidiar as simulações pretendidas, foram criados 19 cenários de cobertura da terra, organizados em dois grupos: I) cenários de cobertura total, nos quais toda a bacia apresenta apenas uma classe de cobertura, e o cenário de referência é a cobertura atual; e II) cenários de cobertura por área de captação hierarquizada, que assumem o solo exposto como referência, apresentando as demais classes restritas às áreas de captação de uma mesma ordem da hierarquia. Na etapa de modelagem, utilizou-se o Limburg Soil Erosion Model (LISEM), por sua capacidade de simular o escoamento superficial levando em conta a variabilidade da cobertura da terra na bacia hidrográfica. Com relação aos dados de precipitação, foram selecionados três eventos de chuva considerados representativos dos padrões atrasado, intermediário e adiantado. Os resultados das simulações envolvendo os cenários de cobertura total revelaram as maiores respostas hidrológicas (escoamento superficial direto, vazão de pico e tempo de pico) para o cenário de solo exposto. Os demais cenários mostraram uma atenuação das respostas, sendo que a magnitude dessa atenuação variou significativamente em cada cenário, resultando na sequência mata > campo > cobertura atual > área cultivada. Quanto aos cenários de cobertura por área de captação hierarquizada, as simulações dos cenários de mata, campo e área cultivada apontam, conforme se avança no ordenamento, para uma clara tendência de aumento do impacto atenuante das respostas hidrológicas relativamente ao cenário de solo exposto. Esse padrão de comportamento é coerente com a recomendação de priorização das áreas cujo escoamento abastece diretamente segmentos de 5ª ordem em estratégias que busquem, por exemplo, o reflorestamento como medida para controlar inundações associadas a eventos de chuva intensa na BHAC. Recomenda-se estudos suplementares sobre o tema.

Palavras-chave: Cobertura da terra. Hierarquia fluvial. Modelagem hidrológica.

Abstract

CRUZ, José Antônio Weykamp da. **Hydrological Responses to Different Land Cover Scenarios in Hierarchical Catchment Areas of a Watershed in the Extreme South of Brazil**. 2023. 81 f. Thesis (Doctorate in Water Resources) – Postgraduate Program in Water Resources, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

Land cover is an important conditioning factor for the hydrological dynamics of watersheds, just as the drainage hierarchy corresponds to one of its main morphometric characteristics. The present study is based on the simulation of hydrological responses to different land cover scenarios, considering the influence of the hierarchization of the catchment areas of the Cadeia river watershed (CRW), in the extreme south of Brazil. The main objective is to evaluate the influence of hierarchization of catchment areas in the analysis of the hydrological behavior of this watershed, in response to different coverage scenarios. CRW occupies an area of 121.3 km², has undulating relief, soils of the argisol class, drainage density equal to 1.83 km/km², and river hierarchy of 5th order. The current land cover corresponds to a mosaic of forest, grassland, agriculture and exposed soil, unlike the natural cover, characterized by the wide predominance of forest. To support the intended simulations, 19 land cover scenarios were created, organized into two groups: I) full coverage scenarios, in which the entire watershed has only one coverage class, and the reference scenario is the current coverage; and II) coverage scenarios by hierarchical catchment area, which assume the exposed soil as reference, presenting the other classes restricted to catchment areas of the same hierarchy level. In the modeling stage, the Limburg Soil Erosion Model (LISEM) was used, due to its ability to simulate surface runoff taking into account the variability of soil cover in the watershed. With regard to rainfall data, three rainfall events were selected as representative of the late, intermediate and early patterns. The results of the simulations involving the full coverage scenarios revealed the highest hydrological responses (direct surface runoff, peak discharge and peak time) for the exposed soil scenario. The other scenarios showed an attenuation of responses, and the magnitude of this attenuation varied significantly in each scenario, resulting in the sequence forest > grassland > current coverage > agriculture. For the coverage scenarios by hierarchical catchment area, the simulations of the forest, grassland and agriculture scenarios point, as progress is made in the hierarchy, to a clear tendency towards an increase in the attenuating impact of the hydrological responses in relation to the exposed soil scenario. This behavior pattern is consistent with the recommendation to prioritize areas whose runoff directly supplies 5th order segments in strategies that seek, for example, reforestation as a measure to control floods associated with heavy rain events in the BHAC. Further studies on this subject are recommended.

Keywords: Land cover. River hierarchy. Hydrological modeling.

Lista de Figuras

Figura 1	Representação de rede de drenagem com os cursos d'água ordenados segundo a classificação de Strahler	23
Figura 2	Representação de bacia hidrográfica subdividida em áreas de captação enquadradas na mesma ordem (classificação de Strahler) do segmento da rede de drenagem para o qual direcionam diretamente o seu escoamento	25
Figura 3	Exemplo de hidrograma para a resposta de um rio a um evento de chuva, como resultado de monitoramento hidrológico ou de uma simulação realizada com um modelo chuva-vazão	27
Figura 4	Mapa de Localização da bacia hidrográfica do arroio Cadeia	29
Figura 5	Mapa hipsométrico da BHAC	31
Figura 6	Mapa de declividade da BHAC	31
Figura 7	Mapa da rede de drenagem hierarquizada da BHAC, considerando a classificação de Strahler	32
Figura 8	Mapa das áreas de captação da BHAC hierarquizadas com base no ordenamento (classificação de Strahler) dos segmentos da rede de drenagem por elas diretamente abastecidos	33
Figura 9	Mapa de solos da BHAC	34
Figura 10	Mapa de cobertura da terra na BHAC	35
Figura 11	Fotografias de vistas parciais da BHAC, evidenciando diferentes situações de cobertura da terra	36
Figura 12	Mapa das Regiões Fitoecológicas do Rio Grande do Sul, no contexto dos biomas Mata Atlântica e Pampa, incluindo a localização da BHAC	37
Figura 13	Mapas de cenários de cobertura da terra na BHAC, distintos entre si pela classe de cobertura presente nas áreas de captação de 1ª ordem	39

Figura 14	Mapas de cenários de cobertura da terra na BHAC, distintos entre si pela classe de cobertura presente nas áreas de captação de 2ª ordem	39
Figura 15	Mapas de cenários de cobertura da terra na BHAC, distintos entre si pela classe de cobertura presente nas áreas de captação de 3ª ordem	40
Figura 16	Mapas de cenários de cobertura da terra na BHAC, distintos entre si pela classe de cobertura presente nas áreas de captação de 4ª ordem	40
Figura 17	Mapas de cenários de cobertura da terra na BHAC, distintos entre si pela classe de cobertura presente nas áreas de captação de 5ª ordem	41
Figura 18	Esquema com a estrutura geral do fluxo d'água no LISEM ...	43
Figura 19	Esquema com representações do escoamento no LISEM	43
Figura 20	Gráfico de eventos de chuva utilizados em análise de calibração do LISEM direcionada à BHAC, e considerados no presente estudo como eventos 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	45
Figura 21	Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura total na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	51
Figura 22	Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c), sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 1ª ordem	55
Figura 23	Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c), sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 2ª ordem	57
Figura 24	Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c), sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 3ª ordem	59

Figura 25	Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c), sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 4ª ordem	61
Figura 26	Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c), sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 5ª ordem	63
Figura 27	Gráficos do impacto de diferentes cenários de cobertura da terra sobre o ESD estimado para a BHAC, com base na hierarquização das áreas de captação, assumindo solo exposto como cenário de referência, e considerando os eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	66
Figura 28	Gráficos do impacto de diferentes cenários de cobertura da terra sobre a Q_p estimada para a BHAC, com base na hierarquização das áreas de captação, assumindo solo exposto como cenário de referência, e considerando os eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	68
Figura 29	Gráficos do impacto de diferentes cenários de cobertura da terra sobre o t_p estimado para a BHAC, com base na hierarquização das áreas de captação, assumindo solo exposto como cenário de referência, e considerando os eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	69

Lista de Tabelas

Tabela 1	Aspectos morfométricos da BHAC	33
Tabela 2	Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura total na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3	50
Tabela 3	Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3, sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 1ª ordem	54
Tabela 4	Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3, sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 2ª ordem	56
Tabela 5	Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3, sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 3ª ordem	58
Tabela 6	Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3, sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 4ª ordem	60
Tabela 7	Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3, sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 5ª ordem	62

Lista de Abreviaturas e Siglas

APPs	Áreas de Preservação Permanente
AVA	Área Variável de Afluência
BHAC	Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia
ENVI	Environment for Visualizing Images
LISEM	Limburg Soil Erosion Model
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
PNRH	Política Nacional dos Recursos Hídricos
RFFES	Região Fitoecológica da Floresta Estacional Semidecidual
SIGs	Sistemas de Informações Geográficas
UFPeI	Universidade Federal de Pelotas

Lista de Símbolos

C_{NS}	Coeficiente de Nash-Sutcliffe
ESD	Escoamento superficial direto
P_{total}	Precipitação total
Q_{obs}	Vazão observada
Q_p	Vazão de pico
Q_{sim}	Vazão simulada
R^2	Coeficiente de determinação
t_p	Tempo de pico

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Objetivo Geral	19
1.1.1	Objetivos Específicos	19
1.2	Hipóteses	19
2	Revisão de Literatura	20
2.1	Cobertura da Terra como Fator de Condicionamento Hidrológico em Bacias Hidrográficas	20
2.2	Hierarquização de Áreas de Captação	22
2.3	Modelagem Hidrológica	26
3	Metodologia	29
3.1	Área de Estudo	29
3.2	Elaboração e Descrição dos Cenários de Cobertura da Terra	37
3.3	Modelagem Hidrológica	41
3.3.1	Seleção e Descrição do Modelo	41
3.3.2	Preparo e Operacionalização das Simulações	44
3.4	Tabulação e Análise de Dados	47
4	Resultados e Discussão	49
4.1	Cenários de Cobertura Total	49
4.2	Cenários de Cobertura por Área de Captação Hierarquizada	53
5	Considerações Finais	73
	Referências	75

1 Introdução

A água figura entre os recursos naturais mais importantes para a humanidade. Desde os primórdios, várias das necessidades vitais da espécie humana são supridas graças a uma estreita relação de dependência estabelecida com os recursos hídricos. Entretanto, ao longo do processo civilizatório, o crescimento demográfico levou a um significativo aumento da demanda por água, e, conseqüentemente, à intensificação da sua exploração como recurso. Essa acentuação do consumo de água acabou por originar vários problemas, incluindo conflitos relacionados ao risco de limitação ao abastecimento público e aos processos de produção agrícola e industrial (CECH, 2018; BORETTI; ROSA, 2019).

Nas últimas décadas, a preocupação com a conservação dos recursos hídricos conduziu à adoção global de uma gama de medidas, com o objetivo de melhor gerenciar a utilização da água, considerada, em face de seus usos múltiplos, como um recurso finito e vulnerável, com elevado valor econômico (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2011). Especificamente no Brasil, um dos maiores marcos na gestão dos recursos hídricos deu-se com a promulgação da Lei nº 9.433/1997, conhecida como Lei das Águas, a qual estabeleceu a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH). A referida Lei contempla um conjunto de instrumentos propostos a fim de garantir a implementação da PNRH, e, nesse sentido, rediscute a dominialidade dos corpos d'água, estimula a descentralização da gestão, e fortalece a noção de bacia hidrográfica como unidade de manejo. (BRASIL, 1997).

Diante desse quadro, a avaliação da dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas tornou-se fundamental para definir se os recursos hídricos disponíveis suportam as demandas impostas a eles. Fortemente relacionada à dinâmica hidrológica está a disponibilidade hídrica, que consiste na parte da vazão de um determinado curso d'água que pode ser utilizada em processos antrópicos, sem comprometer a sua integridade como ambiente aquático. Em uma bacia hidrográfica, os aspectos climáticos, geomorfológicos, pedológicos e

de cobertura da terra determinam o quanto da precipitação será convertido em vazão na sua rede de drenagem, sendo a disponibilidade hídrica a parcela dessa vazão que pode ser utilizada, resguardada uma vazão remanescente mínima capaz de evitar a descaracterização hidrológico-ambiental do corpo hídrico (CRUZ; TUCCI, 2008).

Nesse contexto, o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas constitui-se em um tema de interesse crescente, cuja importância reside no seu caráter espacial e temporalmente variável. Entre os muitos fatores relacionados à dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas está a cobertura da terra, a qual geralmente apresenta variações espaciais e temporais, muitas vezes em decorrência de processos antrópicos de uso da terra (FALKENMARK *et al.*, 1999).

As modificações espaço-temporais da cobertura da terra geralmente correspondem a alterações na vegetação originalmente existente na bacia, a qual, além de ter grande importância ecológica, é fundamental à conservação dos recursos hídricos, qualitativa e quantitativamente, assumindo, portanto, um papel regulador da disponibilidade hídrica (LIMA; ZAKIA, 2004).

Nesse sentido, a cobertura vegetal tem sido historicamente descrita como importante interface do escoamento superficial com os recursos hídricos (SWEENEY; NEWBOLD, 2014). Hidrologicamente, a cobertura vegetal assume função de destaque na destinação dada pela bacia hidrográfica aos volumes ali precipitados, gerando variações no balanço entre infiltração e escoamento para cada porção da bacia, uma vez que exerce forte controle na chamada área variável de afluência (AVA) (HEWLETT; HIBBERT, 1967). A partir do momento em que são feitas mudanças na cobertura vegetal, direta ou indiretamente, afeta-se o ciclo hidrológico, pois impacta-se a capacidade de infiltração e acumulação da água, e, conseqüentemente, sua capacidade de prover as plantas, os animais e a sociedade; impacta-se também o processo erosivo do solo, pela mudança na capacidade de interceptação da precipitação, bem como a ocorrência de picos de cheia, devido a alterações no escoamento (ALMEIDA *et al.*, 2012; FALKENMARK *et al.*, 1999).

Assim, com base na premissa de que toda bacia hidrográfica apresenta um comportamento hidrológico com algum grau de heterogeneidade espacial, é importante identificar características da bacia capazes de permitir a sua compartimentalização, como é o caso da hierarquia fluvial, baseada no

ordenamento dos cursos d'água pertencentes à rede de drenagem (STRAHLER, 1957). Uma vez que o escoamento superficial gerado em qualquer ponto da bacia desloca-se sempre em direção a algum determinado segmento da rede de drenagem, torna-se possível identificar as áreas cujo escoamento abastece diretamente os segmentos de cada um dos níveis da hierarquia fluvial, constituindo uma alternativa para a subdivisão espacial da bacia (CHRISTOFOLETTI, 1969).

Importante contribuição à avaliação da dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas tem sido oferecida, especialmente nas últimas décadas, pelos modelos hidrológicos, capazes de fornecer, por meio de simulações computacionais, uma visão detalhada das relações entre hidrologia, solo, clima e vegetação (CHU *et al.*, 2010; THANAPAKPAWIN *et al.*, 2007). A modelagem hidrológica é capaz de alcançar resultados satisfatórios relativamente à análise da influência hidrológica da cobertura da terra, especialmente da vegetação, incluindo simulações da evapotranspiração, da interceptação e do escoamento superficial em resposta a eventos de precipitação (ALVARENGA, 2015).

Apesar da vasta contribuição científica já acumulada sobre a dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas, o tema ainda é um dos mais complexos no campo da hidrologia, principalmente devido ao fato de que a variabilidade das características internas da bacia é geralmente muito grande (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015). Nesse sentido, o presente estudo visa contribuir para o aprimoramento da compreensão da heterogeneidade espacial interna das bacias hidrográficas, especialmente no que diz respeito à hierarquização das áreas de captação. Para tanto, aborda uma bacia hidrográfica monitorada localizada no extremo sul do Brasil, no bioma Pampa, a partir de simulações baseadas em modelagem hidrológica, envolvendo diferentes cenários de cobertura da terra.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica representativa considerando a hierarquização das áreas de captação e as suas respostas a diferentes cenários de cobertura da terra.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Estimar o impacto de diferentes cenários de cobertura da terra no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica representativa.
- Verificar a ocorrência de padrões de comportamento hidrológico simulado associáveis à hierarquização das áreas de captação integrantes da bacia estudada.
- Descrever a influência de diferentes eventos de chuva na modelagem hidrológica considerando cenários de cobertura da terra em áreas de captação hierarquizadas.

1.2 Hipóteses

- Os cenários de cobertura da terra com maior densidade vegetal, como a mata nativa, tendem a exibir respostas hidrológicas atenuadas relativamente aos demais cenários.
- A hierarquização das áreas de captação, entendida como a identificação das áreas cujo escoamento abastece diretamente os segmentos de cada um dos níveis da hierarquia fluvial, tende a revelar comportamentos hidrológicos distintos para cada ordem considerada.
- Diferentes eventos de chuva podem acarretar distintos padrões de comportamento hidrológico para uma mesma área de captação, reforçando o papel preponderante da precipitação sobre os aspectos geomorfológicos, pedológicos e de cobertura da terra.

2 Revisão de Literatura

2.1 Cobertura da Terra como Fator de Condicionamento Hidrológico em Bacias Hidrográficas

Apesar da complexidade inerente ao comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, associada a ampla variedade de fatores que às condicionam concomitantemente, a cobertura da terra constitui um aspecto que se destaca entre os demais, especialmente em um contexto de mudança ambiental, seja de origem natural ou antrópica. Muitos autores colocam as mudanças na cobertura da terra lado a lado com as mudanças climáticas, como os fatores mais críticos a afetarem os aspectos ecohidrológicos de bacias hidrográficas (CAO *et al.*, 2022).

No que se refere especificamente aos efeitos hidrológicos das mudanças na cobertura da terra, dois aspectos assumem a condição de fatores-chave – a evapotranspiração e a infiltração (BRUIJNZEEL, 1989). A evapotranspiração inclui a evaporação ocorrida nas camadas superiores do solo e nas superfícies das plantas, como no caso do orvalho ou da chuva interceptada, bem como toda a transpiração vegetal. É diretamente influenciada pelos fatores meteorológicos, principalmente radiação solar, temperatura, umidade e vento, e por fatores relacionados ao tipo de vegetação e ao teor de umidade do solo (RIJTEMA, 1965). A infiltração, por sua vez, corresponde à parte da chuva que é absorvida pelo solo, e depende principalmente do tipo de solo, bem como da sua condição. Essa condição varia basicamente em função do teor de umidade do solo e do seu estado de conservação – se solo natural, cultivado ou degradado. Quando a intensidade da chuva é superior à capacidade de infiltração do solo tem-se a produção do escoamento superficial. (HORTON, 1933).

Em casos de desmatamento, geralmente há um aumento inicial da produção total de água, que é gradualmente diminuída até atingir a produção de antes do desmatamento, devido ao aumento da evapotranspiração decorrente do crescimento de vegetação secundária ou de vegetação plantada. No caso de uma

transição floresta-agricultura ou floresta-pastagem, em que os solos da bacia sejam erodidos, rasos e compactados, e cuja intensidade das chuvas seja alta durante os períodos úmidos, as respostas rápidas na bacia serão acentuadas devido ao maior escoamento superficial – maiores picos de cheia em resposta a tempestades – e o fluxo de base diminuirá durante os períodos de estiagem, devido à baixa capacidade de armazenamento de água no solo. No entanto, se a cobertura que substituiu a floresta ainda permitir boas condições de infiltração e o solo possuir uma boa capacidade de armazenamento, a taxa de evapotranspiração será a principal responsável pela diferença no fluxo da bacia. O fluxo neste caso tenderá a aumentar, tanto nos picos de cheia quanto durante as épocas de estiagem, já que cultivos agrícolas ou pastagens apresentam menores taxas de evapotranspiração do que florestas (Bruijnzeel, 1989; 2004 *apud* KOUMROUYAN, 2015).

Já nos casos em que pastagens são convertidas em florestas, geralmente verifica-se a redução do escoamento superficial, já que se tem uma elevação tanto da taxa de infiltração como da capacidade de retenção de água no solo, devido ao aumento da matéria orgânica e dos fluxos preferenciais no perfil do solo (Pinto *et al.*, 2015 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2018). Consequentemente, espera-se uma redução na erosão do solo e no transporte de sedimentos, bem como uma redução dos riscos de inundações e escassez de água. Além disso, a redução do escoamento provocada pelo aumento de áreas florestadas resulta principalmente do aumento do consumo de água pelas árvores, e da diminuição dos picos de cheia ao longo do ano hidrológico (Carvalho-Santos *et al.*, 2016; Viola *et al.*, 2014; Bruijnzeel, 1990 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Com relação às florestas, frequentemente descritas como uma classe de cobertura da terra com grande capacidade de regulação hidrológica (HÜMANN *et al.*, 2011), deve-se notar que essa capacidade pode variar expressivamente dependendo da sua posição na bacia hidrográfica (FALKENMARK *et al.*, 1999). Florestas nos topos de morros são importantes para a recarga dos aquíferos, na medida em que favorecem a infiltração da água no solo, o que termina por diminuir o volume de escoamento superficial nas encostas, gerando maior estabilidade e menores riscos de deslizamentos ou escorregamentos de massa (SILVA *et al.*, 2012). Florestas nas encostas desempenham relevante papel na interceptação das chuvas, proteção e estruturação do solo, além de atuarem como barreira para o fluxo hídrico, reduzindo a velocidade do escoamento superficial, e,

consequentemente, a intensidade dos processos erosivos (MARSTON, 2010). Florestas em áreas ripárias possibilitam maior estabilidade dos canais, devido a sua contribuição para a estruturação do solo nas margens dos cursos d'água (NAIMAN *et al.*, 2000). Além disso, associadas à vegetação de outras partes da bacia, as florestas ripárias, geralmente com alta saturação do solo, equilibram o fluxo superficial e subsuperficial de água, reduzindo a variação da vazão em situações de seca ou de chuvas intensas (WALTER *et al.*, 2000). Cabe ressaltar que o desempenho de todas as funções hidrológicas tipicamente atribuídas às florestas depende do seu estado de conservação. A existência de um dossel denso, a presença de sub-bosque e o alto teor de matéria orgânica no solo são exemplos de características florestais que aumentam a sua capacidade de promover a interceptação da chuva e a infiltração da água no solo (LIMA *et al.*, 2013).

Evidentemente, existe complementaridade entre as funções hidrológicas das áreas florestais, bem como de outras formações vegetais, localizadas em diferentes posições na bacia hidrográfica, de modo que estabelecer a proteção de uma área mínima de vegetação nativa considerando a bacia inteira de forma indiscriminada coloca em risco o alcance de uma efetiva conservação ecohidrológica (TAMBOSI *et al.*, 2015).

2.2 Hierarquização de Áreas de Captação

Considerar as áreas de captação de uma bacia hidrográfica numa perspectiva hierárquica pressupõe a aplicação do conceito de hierarquia fluvial, o qual remete à classificação de um determinado curso d'água no contexto da rede de drenagem em que se situa. Uma das principais finalidades dessa classificação é a de facilitar e tornar mais objetivos os estudos morfométricos de bacias hidrográficas, com análises de diferentes tipos, como linear, areal e hipsométrica (CHRISTOFOLETTI, 1980).

As primeiras contribuições voltadas para a hierarquização de cursos d'água ocorreram em meados do século XX, inicialmente com a proposta feita pelo hidrólogo Robert Horton, e, posteriormente, com modificações idealizadas por Arthur Newell Strahler, as quais fizeram o critério de classificação ficar conhecido como ordem do curso d'água, e levaram à sua ampla utilização até o presente (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

Basicamente, a classificação de Strahler corresponde ao ordenamento de todos os segmentos da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica, partindo das nascentes, com base no seguinte critério (figura 1): todo o curso d'água originado diretamente da nascente (sem ramificações) é de ordem 1; quando dois cursos de ordem 1 se encontram formam um curso de ordem 2; quando dois cursos de ordem 2 se encontram formam um curso de ordem 3; e assim por diante; quando dois cursos de ordens diferentes se encontram, prevalece a de maior ordem. Dessa forma, a ordem de uma bacia pode ser definida como a maior ordem de drenagem encontrada em sua rede de cursos d'água, de modo que uma bacia de primeira ordem é aquela em que o curso principal não tem afluentes reconhecíveis (STRAHLER, 1957).

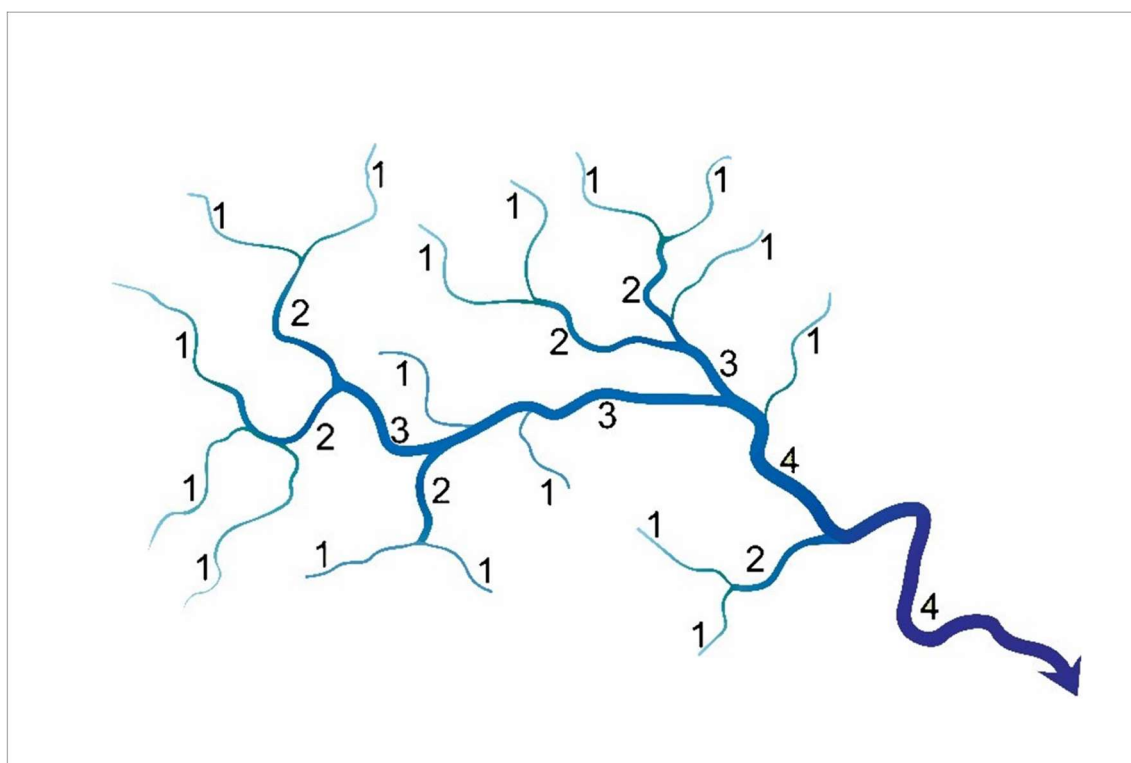


Figura 1 – Representação de rede de drenagem com os cursos d'água ordenados segundo a classificação de Strahler. Fonte: KELLY-QUINN *et al.*, 2019.

A configuração apresentada pela rede de drenagem de toda bacia hidrográfica, assim como, conseqüentemente, o nível hierárquico alcançado por ela, decorre de uma complexa cadeia de condicionantes. Os principais fatores são o regime de chuvas, o relevo, os tipos de solo e a cobertura vegetal, os quais atuam concomitantemente e com níveis variáveis de influência (HORTON, 1945; CRISTOFOLLETTI, 1981).

Apesar do conceito de hierarquia fluvial apresentar relativa simplicidade, sua aplicação prática exige alguns importantes cuidados. O ordenamento obtido em qualquer estudo é dependente da escala do mapa utilizado para descrever a rede de drenagem. Isso significa que um mapa gerado em escala de pouco detalhe pode ser incapaz de representar pequenos segmentos da rede de drenagem, tipicamente existentes em áreas de nascentes, o que certamente afetará na determinação do ordenamento (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015). Outro aspecto fundamental corresponde ao critério utilizado para o mapeamento da rede de drenagem, que deve contemplar a possível existência de segmentos intermitentes e efêmeros. A eventual omissão desses segmentos tende a acarretar análises falsas, mais gravemente em bacias hidrográficas nas quais ocorra maior variação sazonal da pluviosidade (CHRISTOFOLETTI, 1979).

Uma vez estabelecida como parâmetro morfométrico para a caracterização de bacias hidrográficas, a hierarquia fluvial difundiu-se entre os mais diversos temas de estudo. Variabilidade do solo (MOURIER *et al.*, 2008), matéria orgânica dissolvida (COBLE *et al.*, 2022), distribuição da vegetação ripária (DUNN *et al.*, 2011), qualidade de habitats (EKNESS, P.; RANDHIR, T., 2007), fluxo energético em ecossistemas (HUANG *et al.*, 2007) são alguns exemplos de sua ampla utilização.

Estritamente no campo da hidrologia, além de proporcionar uma classificação ordenada da rede de drenagem, a hierarquia fluvial permite a subdivisão de toda a área da bacia hidrográfica a partir de um critério essencialmente hidrológico e também baseado em ordenamento. Segundo esse critério, cada área de captação é enquadrada na mesma ordem do segmento da rede de drenagem para o qual direciona diretamente o seu escoamento (figura 2) (CHRISTOFOLETTI, 1969). A hierarquização das áreas de captação, diferentemente daquela restrita à rede de drenagem, é menos sujeita a erros associados à escala de mapeamento, apresentando, portanto, potencial contribuição em estudos que visem abordar de forma confiável a variabilidade espacial em bacias hidrográficas (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

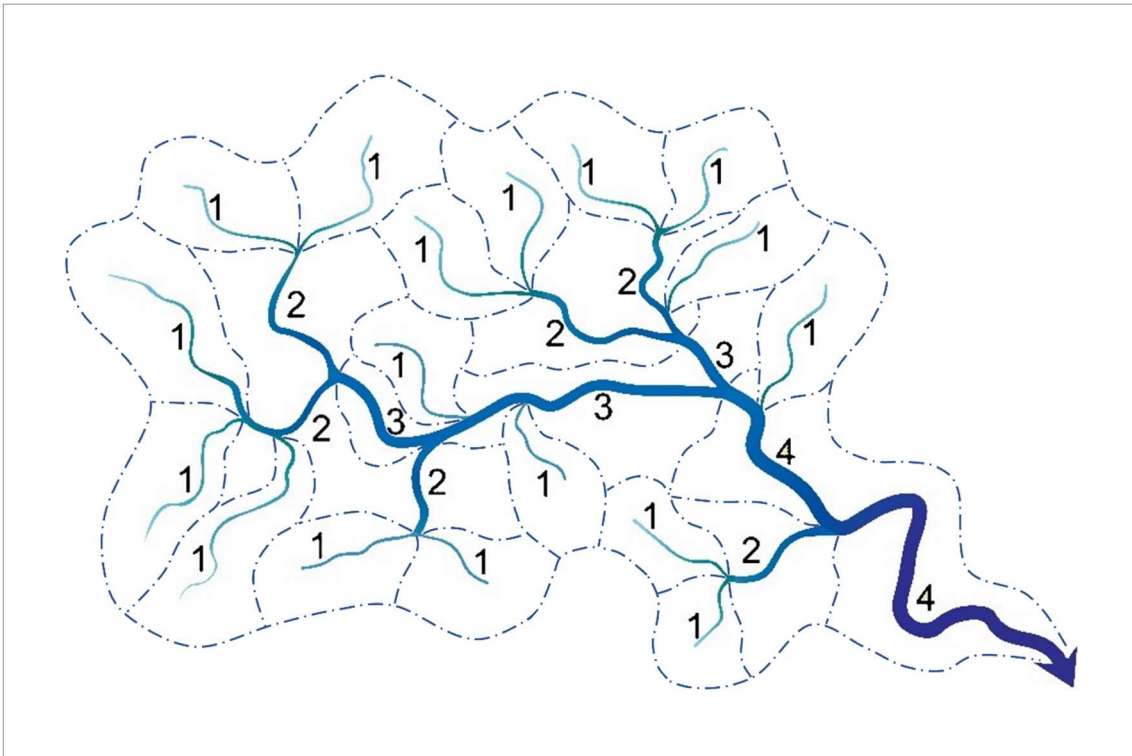


Figura 2 – Representação de bacia hidrográfica subdividida em áreas de captação encaixadas na mesma ordem (classificação de Strahler) do segmento da rede de drenagem para o qual direcionam diretamente o seu escoamento. Fonte: modificado de KELLY-QUINN *et al.*, 2019.

Várias características importantes das bacias hidrográficas guardam estreita relação com a hierarquização de suas áreas de captação. As áreas de captação de ordens inferiores ficam nas partes mais altas da bacia, com declividade geralmente mais acentuada, o que tende a fazer com que a densidade da drenagem seja maior nas áreas de primeira e segunda ordem relativamente às áreas de ordens mais elevadas. O comprimento médio dos segmentos da rede de drenagem tende a ser maior nas áreas de ordens superiores, incluindo o trecho final do curso principal, próximo ao exutório (CHRISTOFOLETTI, 1979). As áreas de captação de primeira ordem são as que podem incluir cursos d'água intermitentes, assim como efêmeros, os quais, dependendo da geomorfologia, do regime de chuvas e do critério utilizado para o mapeamento da rede de drenagem, podem chegar a constituir a maior parte dos segmentos classificados nesse nível (CHRISTOFOLETTI, 1969).

A hierarquização das áreas de captação pode constituir interessante alternativa metodológica para estudos que requeiram a subdivisão criteriosa de bacias hidrográficas, com vistas à análise de determinado aspecto de sua variabilidade. A cobertura da terra corresponde a um bom exemplo, já que, em qualquer que seja a bacia, apresenta-se com algum grau de heterogeneidade, o que, por sua vez, acarreta variações espaço-temporais na dinâmica hidrológica (LI *et al.*, 2021; TROCH *et al.*, 2009).

2.3 Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica consiste em uma ferramenta desenvolvida pela ciência para melhor entender e representar o comportamento de bacias hidrográficas, bem como para prever condições diferentes das observadas. Os primeiros modelos hidrológicos foram concebidos na década de 1930, e descreviam, separadamente, cada componente do ciclo hidrológico, como feito por Horton, para a infiltração, e por MacCarthy, para o escoamento em rios. Somente a partir da segunda metade do século XX, com o desenvolvimento da computação aplicada, os modelos tornaram-se capazes de reunir e processar dados referentes ao conjunto de processos envolvidos na transformação da precipitação em vazão (TUCCI, 2005).

Uma das vantagens da modelagem sobre outros métodos para estudos hidrológicos reside no fato de que ela pode ser aplicada mesmo em bacias hidrográficas que não disponham de monitoramento da vazão, e nas quais não seja possível utilizar as técnicas de regionalização de dados. Frequentemente, a regionalização de dados é limitada pela necessidade de se ter uma região hidrologicamente homogênea, assim como pela inviabilidade de transposição da cronologia de ocorrência dos dados monitorados (CALDEIRA *et al.*, 2018).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados segundo vários aspectos: inclusão de variáveis com ou sem consideração da sua probabilidade de ocorrência (estocásticos ou determinísticos); utilização de funções que consideram ou não os processos físicos (conceituais ou empíricos); registro dos dados de forma contínua ou em intervalos periódicos (contínuos ou discretos); variabilidade espacial considerada ou ignorada (distribuídos ou concentrados) (TUCCI, 2005).

Um dos principais tipos de modelos hidrológicos corresponde aos denominados modelos chuva-vazão, que consideram a bacia como um sistema parametrizado em função dos solos, vegetação, clima e relevo. Nesse tipo de modelo, a simulação consiste na aplicação de cálculos matemáticos para a representação dos principais componentes do ciclo hidrológico, desde a ocorrência da precipitação até a resposta da bacia em termos de vazões, sendo os resultados visualizáveis na forma de hidrogramas (figura 3) (CALDEIRA *et al.*, 2018).

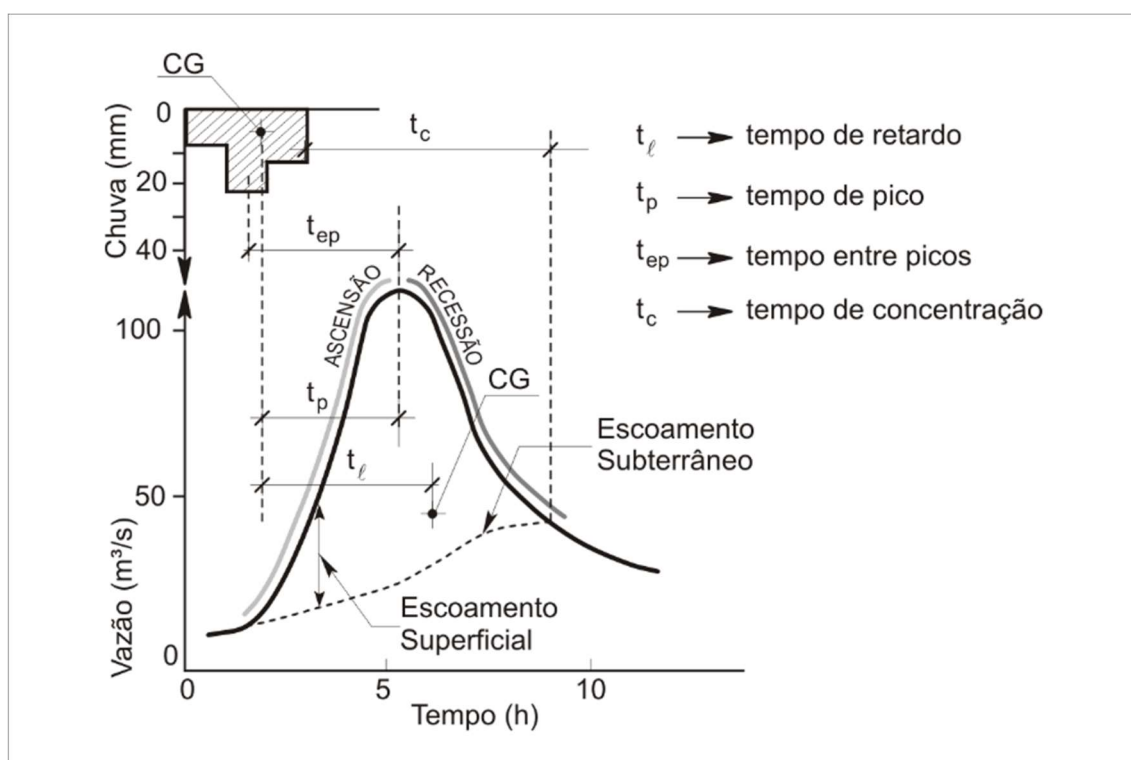


Figura 3 – Exemplo de hidrograma para a resposta de um rio a um evento de chuva, como resultado de monitoramento hidrológico ou de uma simulação realizada com um modelo chuva-vazão. Fonte: COLLISCHONN; DORNELLES, 2015.

Os resultados obtidos nas simulações em um modelo chuva-vazão são diretamente condicionados pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, fato que levou, principalmente a partir da década de 1990, a inúmeros avanços nos modelos hidrológicos distribuídos na escala de bacia hidrográfica (mesoescala). Esses avanços têm buscado aprimorar a representatividade espacial e temporal do comportamento das diferentes partes da bacia, e foram importantemente impulsionados pela incorporação do geoprocessamento e dos sistemas de informações geográficas (SIGs) no processo de simulação (TUCCI, 2005).

Entre as diversas aplicações da modelagem hidrológica incluem-se as simulações de mudanças na cobertura da terra, nas quais é importante considerar três aspectos principais: a) a capacidade do modelo em representar os processos que atuam nas condições prévias e alteradas; b) a adequação dos critérios de estimativa dos parâmetros do modelo, para que influenciem de forma significativa nos resultados para as condições citadas; c) a independência das variáveis de entrada quanto aos cenários de alteração da bacia (TUCCI, 2005).

No sentido de se potencializar a qualidade das respostas geradas por modelagem hidrológica, três importantes etapas devem ser contempladas no processo de simulação: análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo. A análise de sensibilidade avalia como diferentes parâmetros de entrada influenciam em um resultado, de modo que quanto maior a variação na resposta dada a um determinado parâmetro, maior é a sensibilidade do modelo em relação a esse parâmetro; a calibração consiste em definir valores apropriados dos parâmetros de entrada, no sentido de garantir a sua representatividade para a bacia hidrográfica; a validação consiste na aplicação dos parâmetros calibrados em um conjunto de dados observados e que não foram utilizados na etapa de calibração (WHITE; CHAUBEY, 2005).

Nas últimas décadas verificou-se uma grande disseminação de estudos hidrológicos baseados em modelagem, a tal ponto que é possível afirmar que os modelos chuva-vazão constituem atualmente a ferramenta padrão para a análise de bacias hidrográficas. Entretanto, os desafios impostos à própria ferramenta também cresceram significativamente: como lidar com um conjunto de fatores hidrológicos cada vez mais abrangente e complexo, que exige o processamento de grande quantidade e variedade de dados; como considerar áreas cada vez maiores e com níveis de variabilidade mais detalhados. Questões como essas são um claro indício de que, mesmo com a consolidação já alcançada pelos modelos hidrológicos, novos desenvolvimentos se fazem necessários, tanto com relação aos aspectos técnicos e procedimentais, como no que diz respeito às teorias relacionadas ao tema. (GAYATHRI *et al.*, 2015).

3 Metodologia

3.1 Área de Estudo

Considerando que o foco do presente estudo incide sobre as respostas hidrológicas de diferentes cenários de cobertura da terra, buscou-se uma bacia hidrográfica que já contasse com histórico de monitoramento e simulação por parte do Laboratório de Hidrologia e Modelagem Hidrológica da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). Assim, selecionou-se a bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC) (figura 4), localizada no extremo sul do Brasil, e considerada uma bacia representativa devido ao seu permanente monitoramento plúvio-fluviométrico, responsável pela obtenção de dados típicos recorrentemente utilizados em estudos de âmbito local e regional.

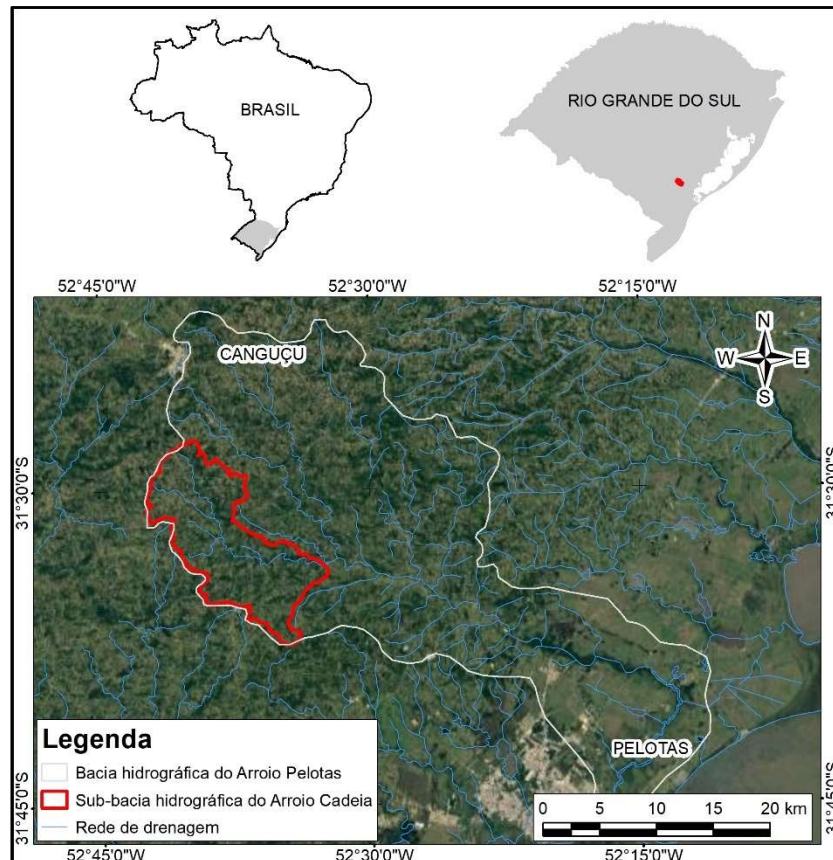


Figura 4 – Mapa de Localização da bacia hidrográfica do arroio Cadeia.

A BHAC tem uma área total de 121,3 km², abrange parcialmente os municípios de Canguçu, Morro Redondo e Pelotas, e constitui uma das principais sub-bacias do arroio Pelotas, o qual é reconhecidamente importante, tanto como fonte de água para abastecimento público, quanto por seu valor histórico-cultural (NUNES, 2015).

Com relação aos aspectos climáticos, a região da BHAC é caracterizada (classificação de Köppen) com o clima Cfa, i.e., subtropical chuvoso, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C (KUINCHTNER; BURIOL, 2001). Assumindo que a Estação Agroclimatológica de Pelotas, situada a aproximadamente 30 km da BHAC, no município de Capão do Leão, seja representativa da sua condição climática, cabe mencionar os dados históricos registrados para o período de 1971 a 2000: a temperatura média anual é de 17,8°C, com variação de 17°C a 18,6°C; a velocidade do vento média anual de 3,5 m.s⁻¹, variando de 2,6 m.s⁻¹ a 4,0 m.s⁻¹; a umidade relativa média anual é de 80,7%, com variação de 78,6% a 83,3%; a precipitação média anual é de 1.366,9 mm, variando de 823,2 mm a 1.893,2 mm; a evapotranspiração potencial média anual é de 1.103,1 mm, com variação de 985,8 mm a 1.568,7 mm (EMBRAPA, 2022).

No que diz respeito ao relevo da BHAC, o seu mapa hipsométrico (figura 5), elaborado a partir do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC), revela um desnível de 321,3 m entre a cota mais alta e o exutório da bacia. As áreas mais altas estão na porção norte-noroeste, enquanto as áreas mais baixas na porção centro-leste.

Diretamente resultante dos padrões de relevo, a declividade da BHAC (figura 6) tem o valor médio de 11%, e alcança 56,9%, sendo que a faixa de declividade com valores entre 8,1% e 20% (relevo ondulado) é a mais comum, cobrindo 44,9% da área total da bacia. As faixas que vão de 0% a 3% (plano), 3,1% a 8% (suave ondulado) e 20,1% a 45% (forte ondulado) correspondem, respectivamente, a 15,1%, 26,3% e 13,6% da área total. A faixa de declividade com valores acima de 45% (montanhoso) cobre apenas 0,1% da bacia. Nomenclatura das faixas de declividade com base na classificação do Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (EMBRAPA, 1979). Cabe destacar que as áreas com as maiores declividades (com valores acima de 20%) não estão nas porções mais altas da BHAC, correspondentes às cabeceiras, e sim concentradas em porções mais baixas, muitas vezes com relativa proximidade do vale principal.

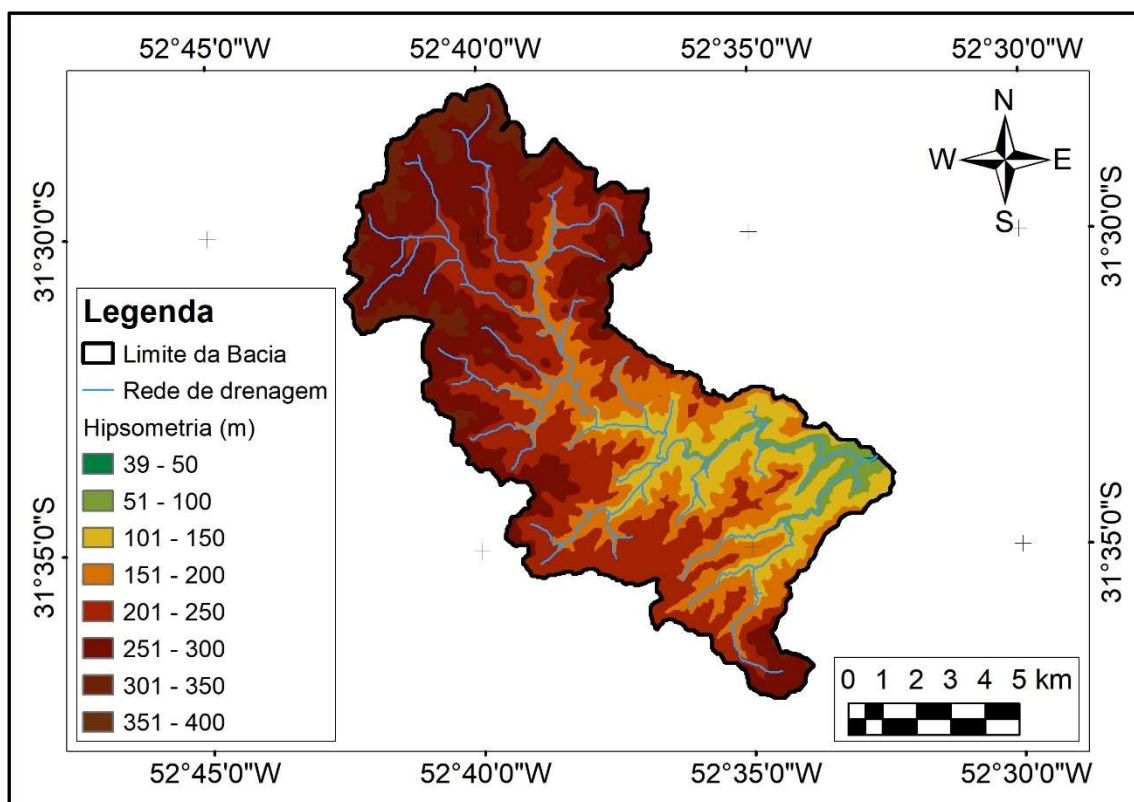


Figura 5 – Mapa hipsométrico da BHAC. Obs.: rede de drenagem simplificada.

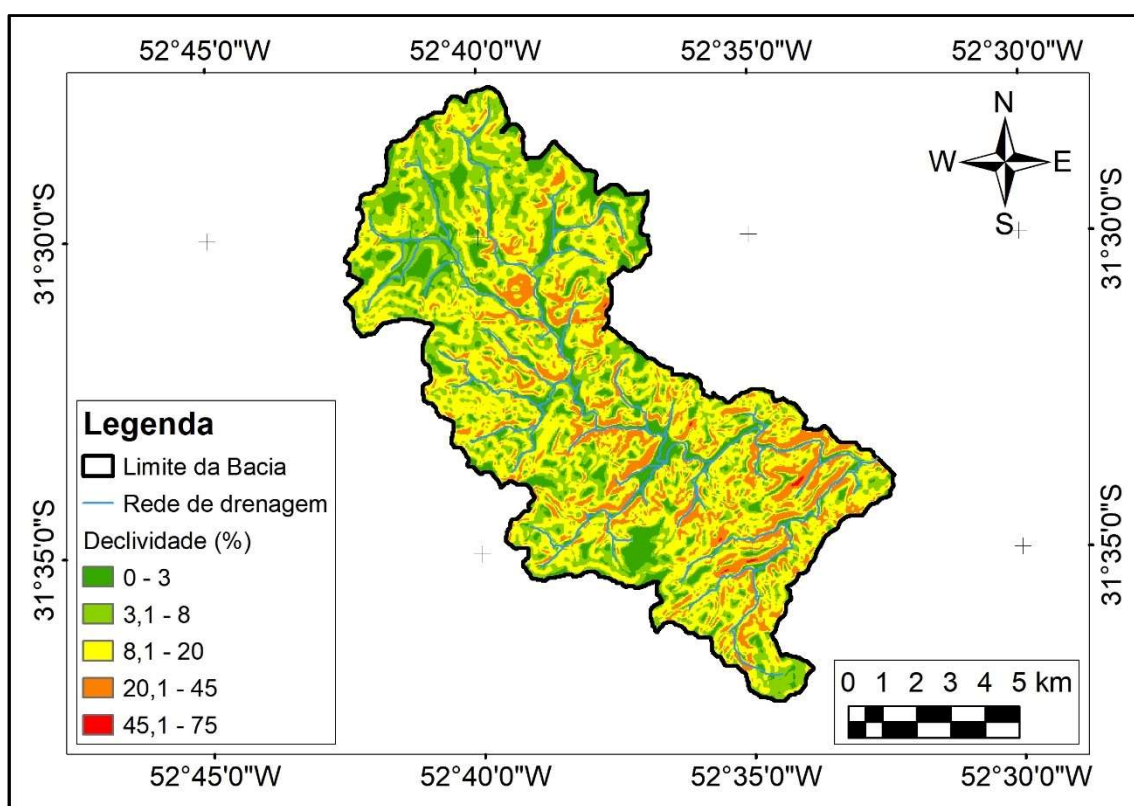


Figura 6 – Mapa de declividade da BHAC. Obs.: rede de drenagem simplificada.

Também influenciada pelo relevo, a rede de drenagem da BHAC (figura 7), obtida no presente estudo automaticamente a partir do MDEHC, totaliza 222,16 km, o que lhe confere uma densidade de drenagem igual a 1,83 km/km². Quanto ao ordenamento dos cursos d'água (classificação de Strahler), a BHAC alcança a quinta ordem, sendo que o segmento desse nível abrange 6,89% do comprimento total da rede; os segmentos da primeira, da segunda, da terceira e da quarta ordem correspondem, respectivamente a 48,46%, 26,62%, 14,31% e 3,72% de toda a drenagem.

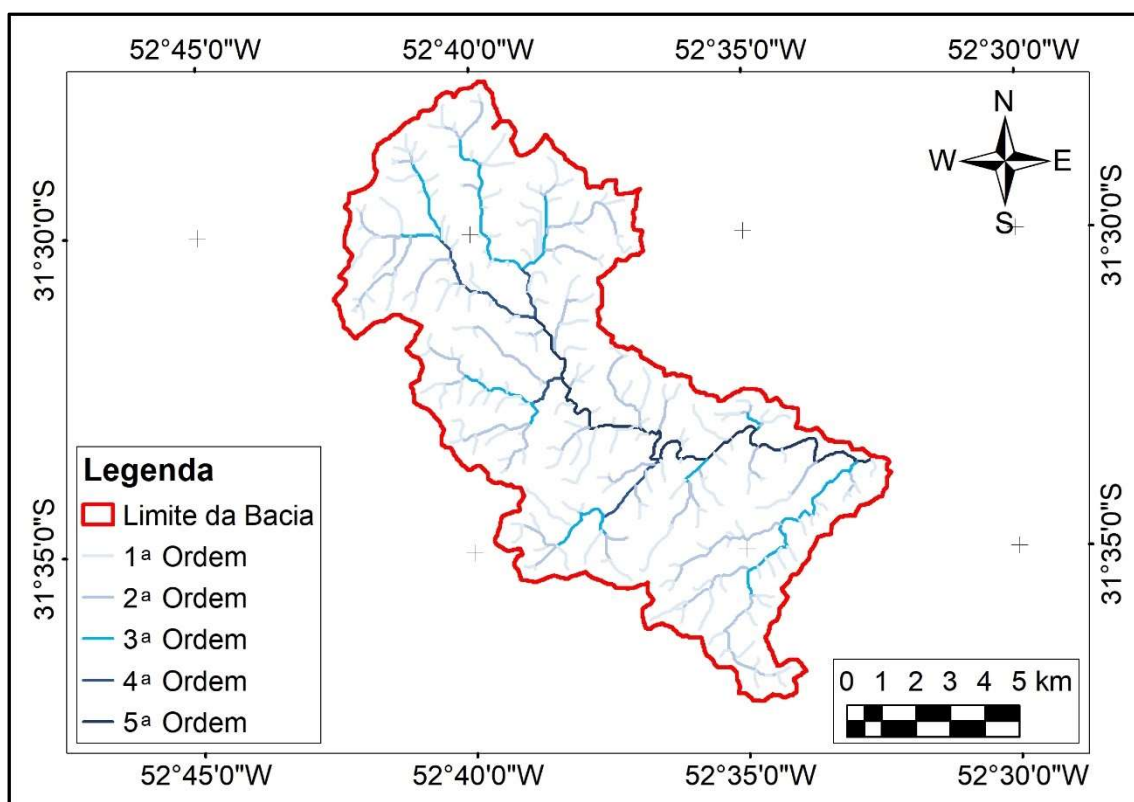


Figura 7 – Mapa da rede de drenagem hierarquizada da BHAC, considerando a classificação de Strahler.

Considerando o foco principal do presente estudo, para além do ordenamento dos cursos d'água, é fundamental conhecer a hierarquização das áreas de captação que compõem a BHAC. Nesse sentido, é importante esclarecer que a referida hierarquização não corresponde à simples identificação das sub-bacias afluentes do arroio Cadeia. Em vez disso, corresponde ao reconhecimento das áreas cujo escoamento abastece diretamente os segmentos de cada um dos níveis da hierarquia fluvial (figura 8). Assim, quando o presente estudo menciona “áreas de captação de terceira ordem”, por

exemplo, faz referência ao conjunto formado pelas áreas de captação que abastecem diretamente segmentos de terceira ordem, não se tratando, portanto, de sub-bacias nas quais a rede de drenagem alcança o terceiro nível de ordenamento.

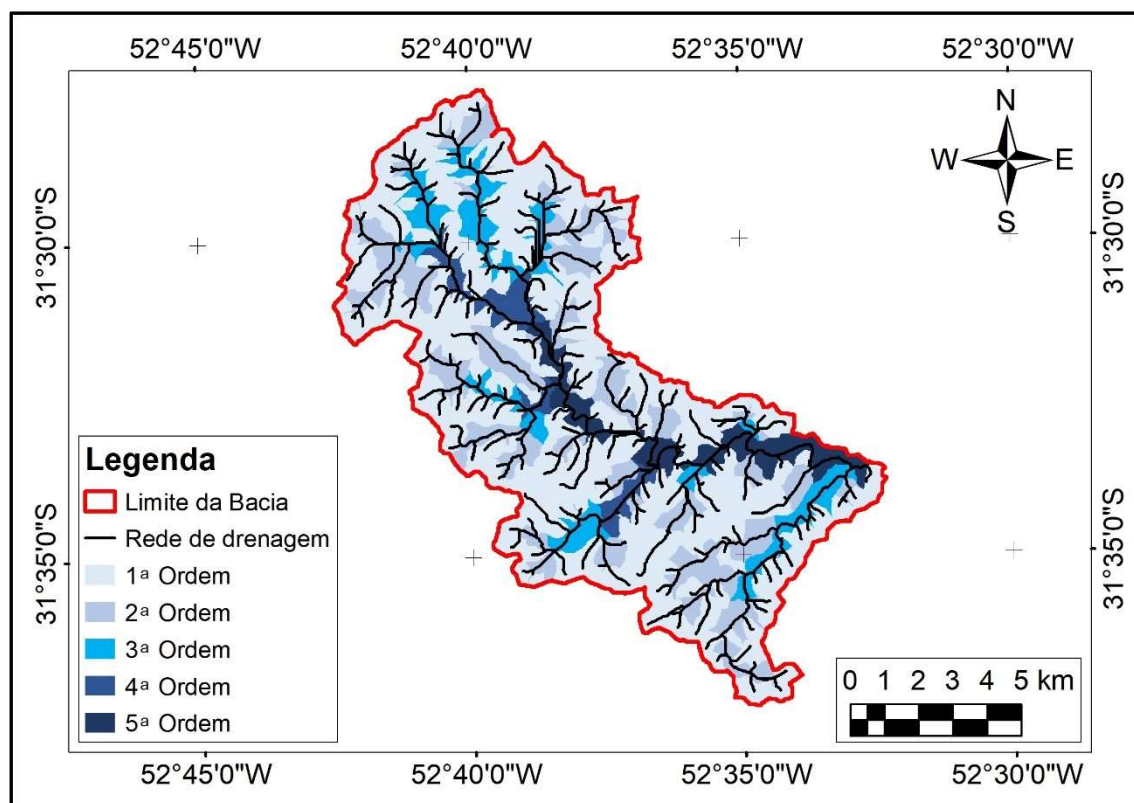


Figura 8 – Mapa das áreas de captação da BHAC hierarquizadas com base no ordenamento (classificação de Strahler) dos segmentos da rede de drenagem por elas diretamente abastecidos.

As dimensões das áreas de captação da BHAC, assim como as dos segmentos da sua rede de drenagem, apresentam valores específicos para cada nível de ordenamento (tabela 1).

Tabela 1 – Aspectos morfométricos da BHAC.

Ordem	Área drenada (km ²)	Área relativa (% da bacia)	Comprimento da drenagem (km)	Comprimento relativo (% da bacia)	Densidade da drenagem (km/km ²)
1ª	73,05	60,21	107,65	48,46	1,47
2ª	26,09	21,50	59,14	26,62	2,27
3ª	10,80	8,91	31,79	14,31	2,94
4ª	4,21	3,47	8,26	3,72	1,96
5ª	7,18	5,91	15,32	6,89	2,13
	121,33	100,00	222,16	100,00	-

Com relação aos solos, a totalidade da BHAC apresenta a classe Argissolo, que corresponde a solos constituídos por material mineral, com evolução avançada, profundidade variável, e que tem como característica a presença de horizonte B textural (SANTOS *et al.*, 2018). Quanto às subordens, verifica-se a predominância de Argissolo Amarelo Distrófico e Argissolo Amarelo Eutrófico, sendo que também se observa a ocorrência de Argissolo Amarelo Alítico, Argissolo Vermelho Distrófico e Argissolo Bruno-Acizentado Distrófico (figura 9).

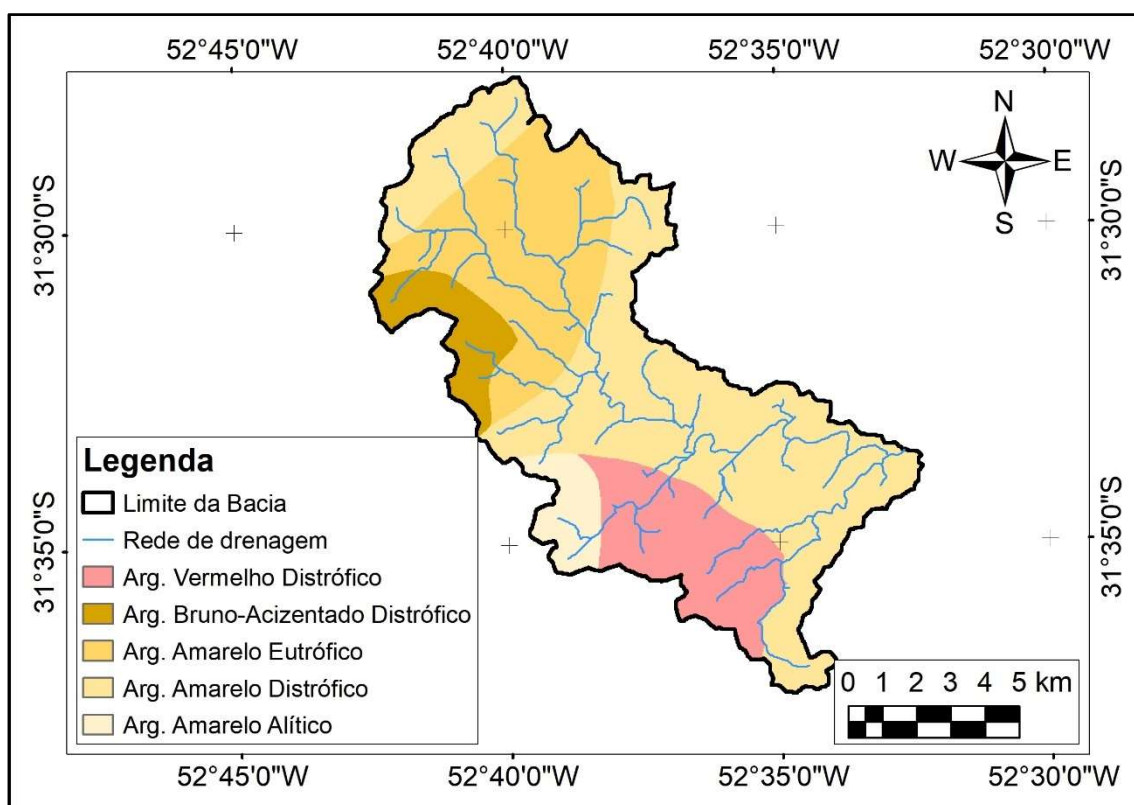


Figura 9 – Mapa de solos da BHAC. Fonte: elaborado a partir de CUNHA *et al.*, 2006. Obs.: rede de drenagem simplificada.

Relativamente à cobertura da terra, o presente estudo recorreu ao mapa de uso do solo elaborado em outra pesquisa também direcionada à BHAC, e que empregou imagens do satélite RapidEye com resolução de 5m. No referido estudo as imagens foram interpretadas com base em classificação supervisionada, através do método da máxima verossimilhança, com a utilização do software *Environment for Visualizing Images* (ENVI). Posteriormente, as imagens foram exportadas para o software ArcGIS, onde foram recortadas conforme o limite da BHAC. Finalmente, a cena foi reamostrada para células de 30m x 30m (STEINMETZ, 2017).

Quanto à cobertura da terra propriamente dita, o mencionado mapa de uso do solo da BHAC (STEINMETZ, 2017) apresenta as classes mata (31%), campo (30%), solo exposto (25%), cultivos (13,9%), e corpos d'água (0,1%) (figuras 10 e 11). As áreas de mata correspondem às áreas cobertas por vegetação nativa de porte arbóreo, bem como por reflorestamento; as áreas de campo são constituídas predominantemente por um estrato herbáceo de espécies nativas, por vezes contendo espécies invasoras; as áreas de solo exposto correspondem às áreas de cultivo que não apresentavam vegetação no momento em que foram geradas as imagens de satélite utilizadas no presente estudo, e também incluem as estradas de terra; as áreas de cultivo são constituídas pela superfície efetivamente plantada, incluindo diversas culturas anuais, como milho, tabaco, feijão e batata, além de perenes, sendo a mais comum o pêssego. (STEINMETZ, 2017; CUNHA *et al.*, 1996).

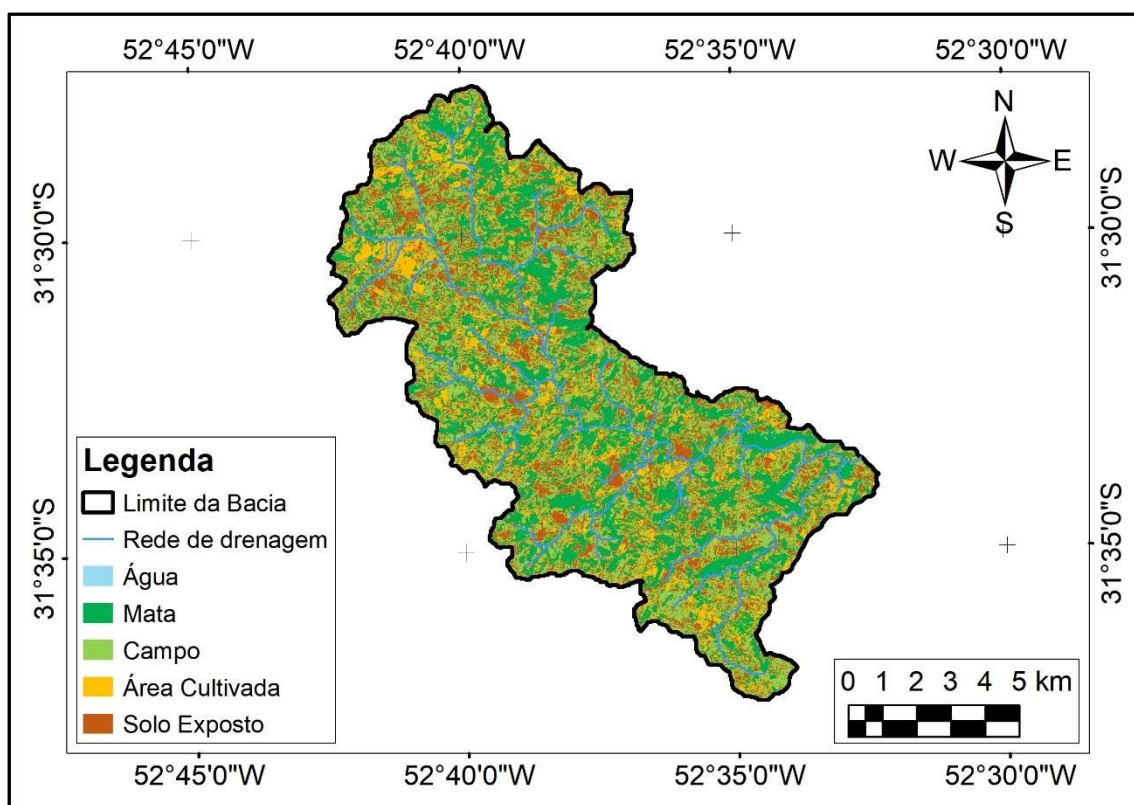


Figura 10 – Mapa de cobertura da terra da BHAC. Fonte: elaborado a partir de STEINMETZ, 2017. Obs.: rede de drenagem simplificada.



Figura 11 – Fotografias de vistas parciais da BHAC, evidenciado diferentes situações de cobertura da terra.

No que se refere à cobertura vegetal original da BHAC, o primeiro aspecto a ser considerado é o bioma no qual a mesma se localiza, no caso, o bioma Pampa. Sendo assim, cabe destacar o fato de que, embora caracterizado pelo predomínio de formações campestres, o bioma Pampa também inclui formações florestais, provavelmente em decorrência de mudanças climáticas para condições mais úmidas ocorridas no Holoceno Superior (Rambo, 1956 *apud* BEHLING *et al.*, 2009; Klein, 1975 *apud* BEHLING *et al.*, 2009). No presente estudo, o reconhecimento da existência de formações vegetais com fitofisionomia tipicamente florestal no bioma Pampa se faz necessário uma vez que a BHAC está localizada justamente em uma região com esse tipo de cobertura vegetal original – a Região Fitoecológica da Floresta Estacional Semidecidual (RFFES), que corresponde a uma área de mais de 10.000 km², distribuídos ao longo da encosta atlântica do Planalto Sul-Rio-Grandense (CORDEIRO; HASENACK, 2009) (figura 12).

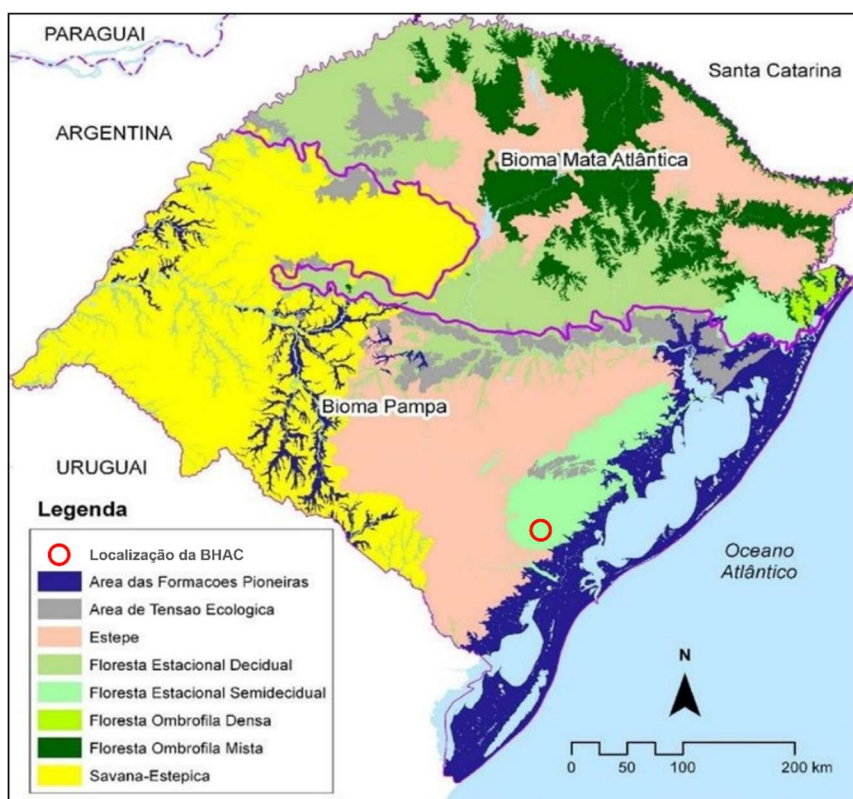


Figura 12 – Mapa das Regiões Fitoecológicas do Rio Grande do Sul, no contexto dos biomas Mata Atlântica e Pampa, incluindo a localização da BHAC. Fonte: adaptado de CORDEIRO; HASENACK, 2009.

Quanto ao estado de conservação da RFFES, apesar do amplo predomínio da vegetação florestal nativa originalmente existente em toda sua extensão, mais de 83% da sua área foi convertida em áreas agrícolas (CORDEIRO; HASENACK, 2009).

Nesse contexto, a BHAC tem potencializada a sua representatividade regional, principalmente no que se refere ao processo antrópico de transformação das paisagens naturais e suas consequências, bem como no que diz respeito às possibilidades de manejo e conservação ambiental.

3.2 Elaboração e Descrição dos Cenários de Cobertura da Terra

Com vistas à etapa de simulação hidrológica da BHAC, foram definidos 19 cenários de cobertura da terra organizados em dois grupos: o primeiro corresponde aos cenários de cobertura total, e, o segundo, aos cenários de cobertura por área de captação hierarquizada. Em ambos os grupos de cenários foram consideradas opções de cobertura as categorias existentes no mapa de

cobertura da terra da BHAC (figura 10), quais sejam: mata; campo; área cultivada; solo exposto. A diferença entre os grupos está no caráter homogêneo (grupo 1) ou misto (grupo 2) estabelecido para a cobertura da BHAC.

Os cenários de cobertura total caracterizam-se pela substituição da cobertura atual da terra por uma única das opções de cobertura consideradas. Assim, esse grupo reúne quatro cenários em que toda a BHAC apresenta apenas uma classe de cobertura: mata (Cen. 01); campo (Cen. 02); área cultivada (Cen. 03); solo exposto (Cen. 04). Os cenários de cobertura total são importantes para a simulação hidrológica por permitirem, graças a sua extrema diferenciação, a identificação de referências de comportamento para a bacia estudada.

Os cenários de cobertura por área de captação hierarquizada também consistem na substituição da cobertura atual da terra por apenas uma das opções de cobertura consideradas, porém de forma espacialmente restrita, em cada cenário, ao conjunto das áreas de captação pertencentes a uma mesma ordem, sendo o restante da área da BHAC convertida na classe solo exposto. A opção por se utilizar o solo exposto como cobertura nas áreas não focais de cada cenário resulta do fato de que essa classe de cobertura tende a apresentar respostas mais acentuadas em simulações chuva-vazão. Assim, uma vez que cada cenário exibe parte da BHAC coberta por solo exposto e parte coberta por uma das demais classes de cobertura consideradas, torna-se possível utilizar as simulações para estimar o impacto de cada classe de cobertura na atenuação das respostas hidrológicas relativamente ao cenário que exibe solo exposto como cobertura total da bacia. Considerando que a BHAC é descrita no presente estudo como uma bacia de quinta ordem, foram elaborados, para cada ordem, três cenários incluindo, separadamente, uma das demais classes de cobertura (mata, campo e área cultivada), totalizando 15 mapas nesse grupo (figuras 13 a 17).

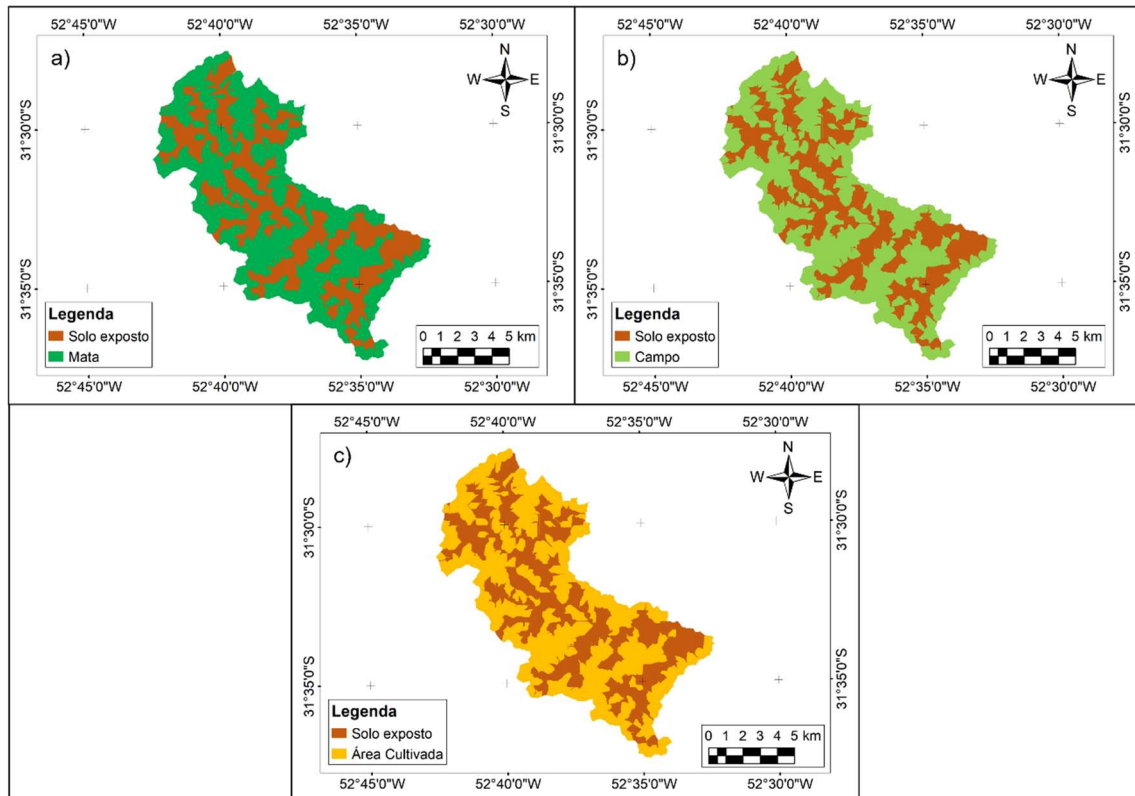


Figura 13 – Mapas de cenários de cobertura da terra na BHAC, distintos entre si pela classe de cobertura presente nas áreas de captação de 1ª ordem: mata (a), campo (b) ou cultivos (c).

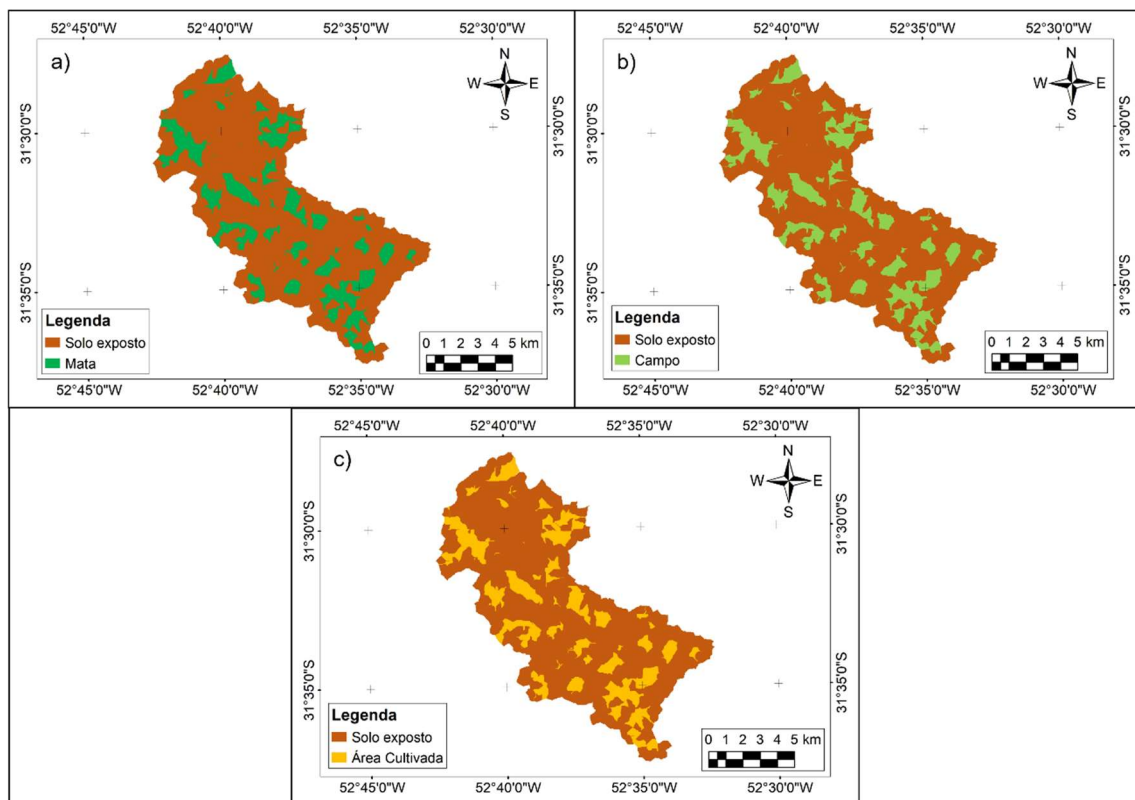


Figura 14 – Mapas de cenários de cobertura da terra na BHAC, distintos entre si pela classe de cobertura presente nas áreas de captação de 2ª ordem: mata (a), campo (b) ou cultivos (c).

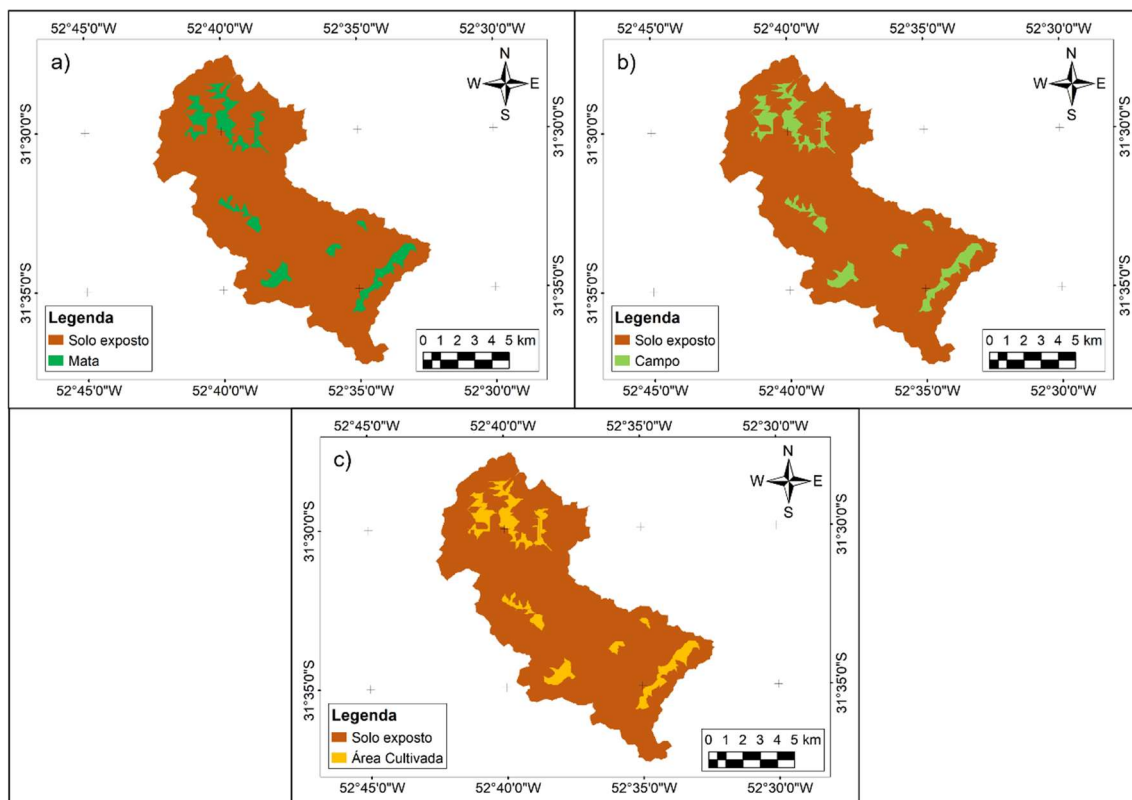


Figura 15 – Mapas de cenários de cobertura da terra na BHAC, distintos entre si pela classe de cobertura presente nas áreas de captação de 3ª ordem: mata (a), campo (b) ou cultivos (c).

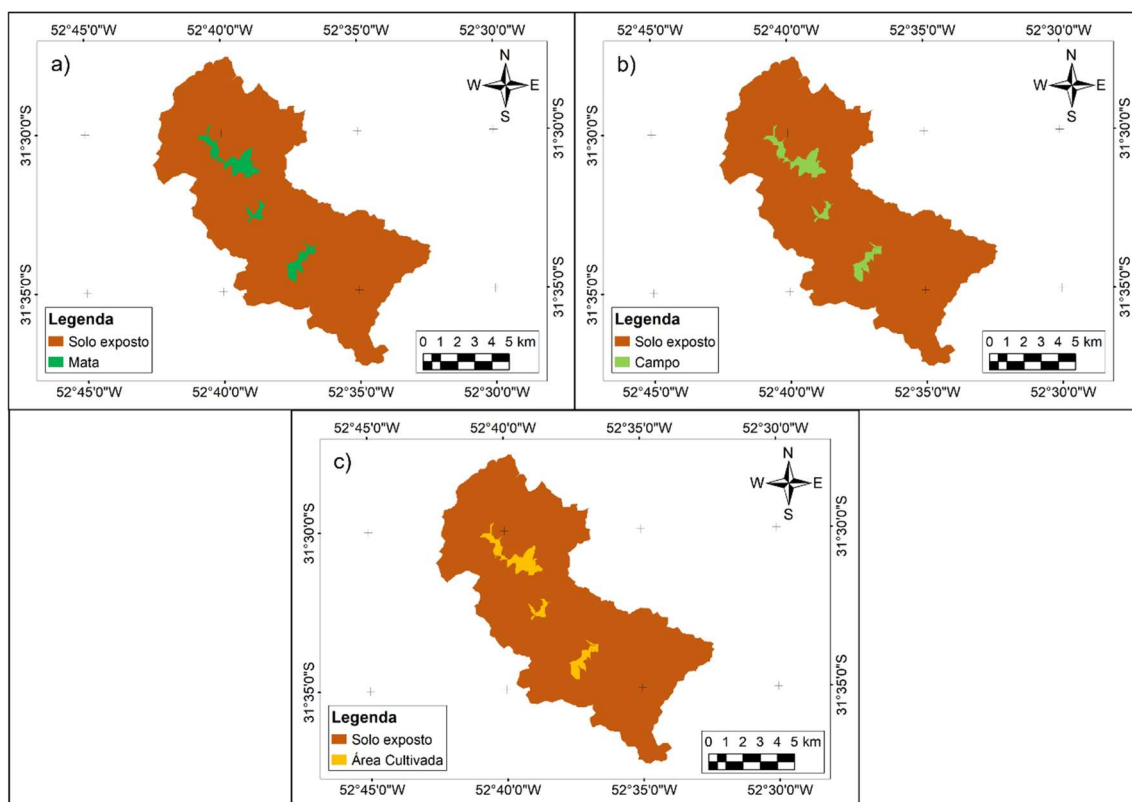


Figura 16 – Mapas de cenários de cobertura da terra na BHAC, distintos entre si pela classe de cobertura presente nas áreas de captação de 4ª ordem: mata (a), campo (b) ou cultivos (c).

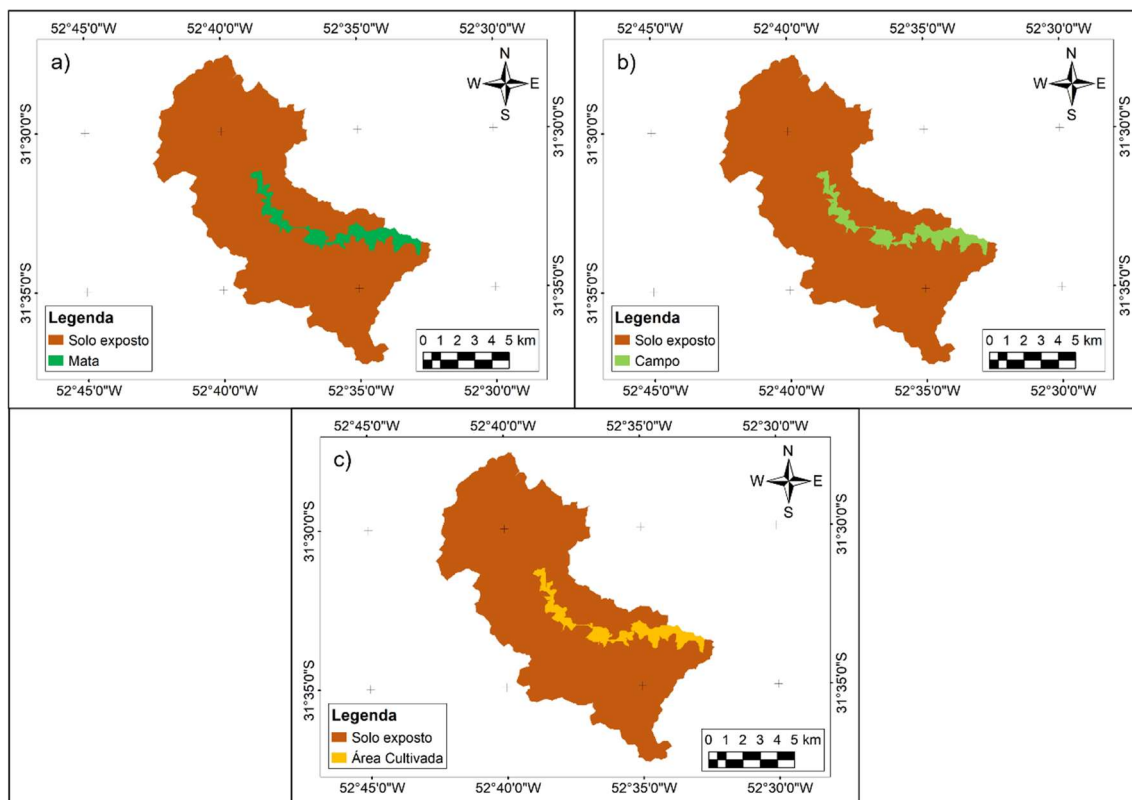


Figura 17 – Mapas de cenários de cobertura da terra na BHAC, distintos entre si pela classe de cobertura presente nas áreas de captação de 5ª ordem: mata (a), campo (b) ou cultivos (c).

A confecção dos mapas de cenários, assim como a de todos os demais mapas apresentados no presente estudo, foi desenvolvida em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), a partir de bases cartográficas digitais já recorrentemente utilizadas no Laboratório de Hidrologia e Modelagem Hidrológica da UFPel, em especial o MDEHC. A edição dos mapas de cenários foi realizada no software ArcGIS Desktop 10.1, em formato vetorial, após o que se procedeu a exportação dos arquivos em formato raster, conforme as especificações inerentes à etapa de simulação.

3.3 Modelagem Hidrológica

3.3.1 Seleção e Descrição do Modelo

Tendo em vista que no presente estudo o escoamento superficial é sensível à variabilidade espacial da cobertura da terra na BHAC, optou-se pela utilização de um modelo hidrológico distribuído, considerando a dependência das variáveis e parâmetros relativamente aos fatores espaciais (TUCCI, 2005),

e a capacidade desse tipo de modelo de fornecer uma visão detalhada das relações entre hidrologia, vegetação, solo e clima em uma bacia hidrográfica (Cuartas *et al.*, *apud* ALVARENGA *et al.*, 2017).

Nesse sentido, selecionou-se o Limburg Soil Erosion Model (LISEM) (DE ROO *et al.*, 1996), desenvolvido nos Países Baixos, em Limburg, como uma ferramenta de suporte a estudos sobre erosão do solo e transporte de sedimentos, bem como para a avaliação de estratégias de conservação do solo. Ressalta-se que no presente estudo são avaliados somente os aspectos associados às respostas hidrológicas. O LISEM pode ser enquadrado como um modelo determinístico, conceitual, distribuído, e discreto, visto que simula a resposta da bacia durante e imediatamente após um evento de chuva (VARGAS *et al.*, 2021).

Relativamente ao seu modo de funcionamento, o LISEM utiliza equações fisicamente baseadas para descrever interceptação, infiltração e movimento de água no solo, armazenamento em depressões da superfície, desprendimento de partículas por escoamento, capacidade de transporte de corpos hídricos, escoamento superficial e em rios (DE ROO *et al.*, 1996). Assim, a área da bacia hidrográfica é dividida em células, e, para cada célula, durante um intervalo de tempo pré-estabelecido, são calculados os processos de interceptação, volume d'água infiltrado no solo, volume d'água armazenado na superfície do solo e escoamento superficial, sendo todos esses processos iniciados a partir da distribuição espacial da precipitação (figura 18) (JETTEN, 2018).

No processo de simulação, quando uma dada precipitação apresenta intensidade suficientemente alta para superar as capacidades de interceptação, infiltração e armazenamento, tem-se a modelagem do escoamento superficial. O LISEM é capaz de estimar o escoamento superficial incluindo desde o movimento inicial da água sobre o solo até os eventuais efeitos causados nos cursos d'água envolvidos, tais como inundações (figura 19) (JETTEN, 2017).

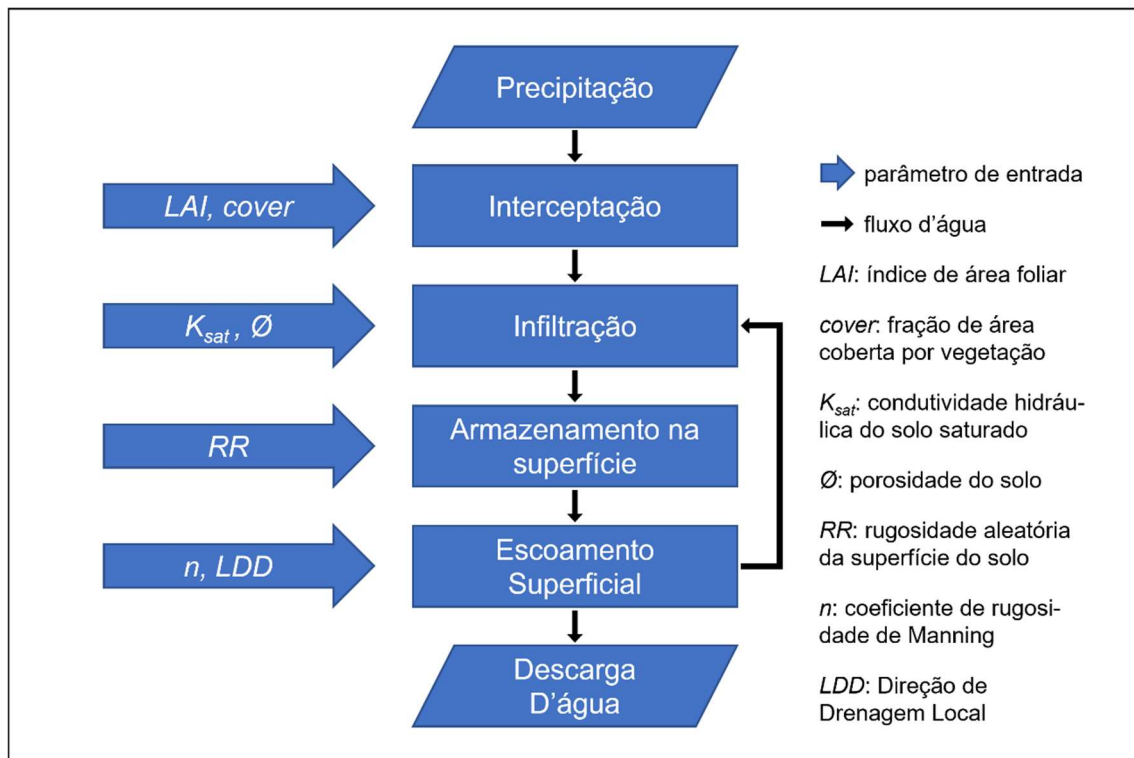


Figura 18 – Esquema com a estrutura geral do fluxo d'água no LISEM. Fonte: adaptado de Jetten (2018).

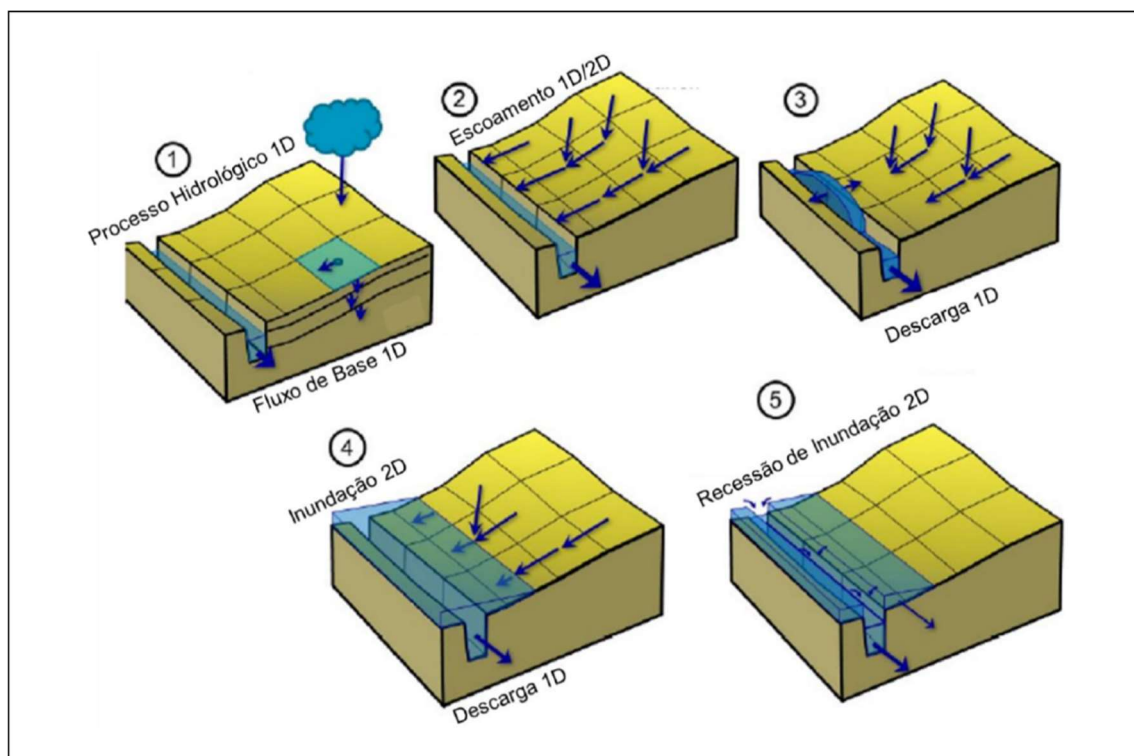


Figura 19 – Esquema com representações do escoamento no LISEM. Fonte: adaptado de Jetten (2017).

Uma característica que se destaca no LISEM é a sua integração a uma plataforma SIG (PCRaster), o que possibilita que diversas variáveis espacialmente heterogêneas sejam utilizadas como dados de entrada no modelo diretamente a partir dos mapas que as descrevem, sem a necessidade de conversão dos mapas. Como o tamanho das células utilizadas na modelagem deve ser capaz de garantir a sensibilidade do modelo à variabilidade espacial das variáveis envolvidas, a ausência de integração de um SIG exigiria digitação manual, algo absolutamente inviável face ao frequentemente grande número de dados envolvidos (DE ROO; JETTEN, 1999).

O LISEM tem sido mundialmente utilizado para bacias hidrográficas de distintas dimensões. Especificamente na BHAC, o modelo já foi aplicado com vistas a avaliação do seu desempenho na simulação do escoamento superficial direto, tendo obtido resultados promissores (VARGAS *et al.*, 2021).

3.3.2 Preparo e Operacionalização das Simulações

Uma vez que a precipitação corresponde a uma das principais variáveis de entrada nos modelos chuva-vazão, uma importante etapa preliminar à simulação corresponde à seleção dos eventos de chuva a serem considerados. Sendo assim, no presente estudo foram selecionados três eventos de chuva (figura 20) dentre 11 eventos utilizados em uma análise de calibração do LISEM já realizada para a BHAC (VARGAS *et al.*, 2021), e que contou com a utilização de dados pluviométricos e fluviométricos obtidos via monitoramento. Os critérios para a seleção dos três eventos de chuva foram a diferenciação pluviométrica dos eventos entre si, bem como a qualidade das respostas simuladas para cada um deles.

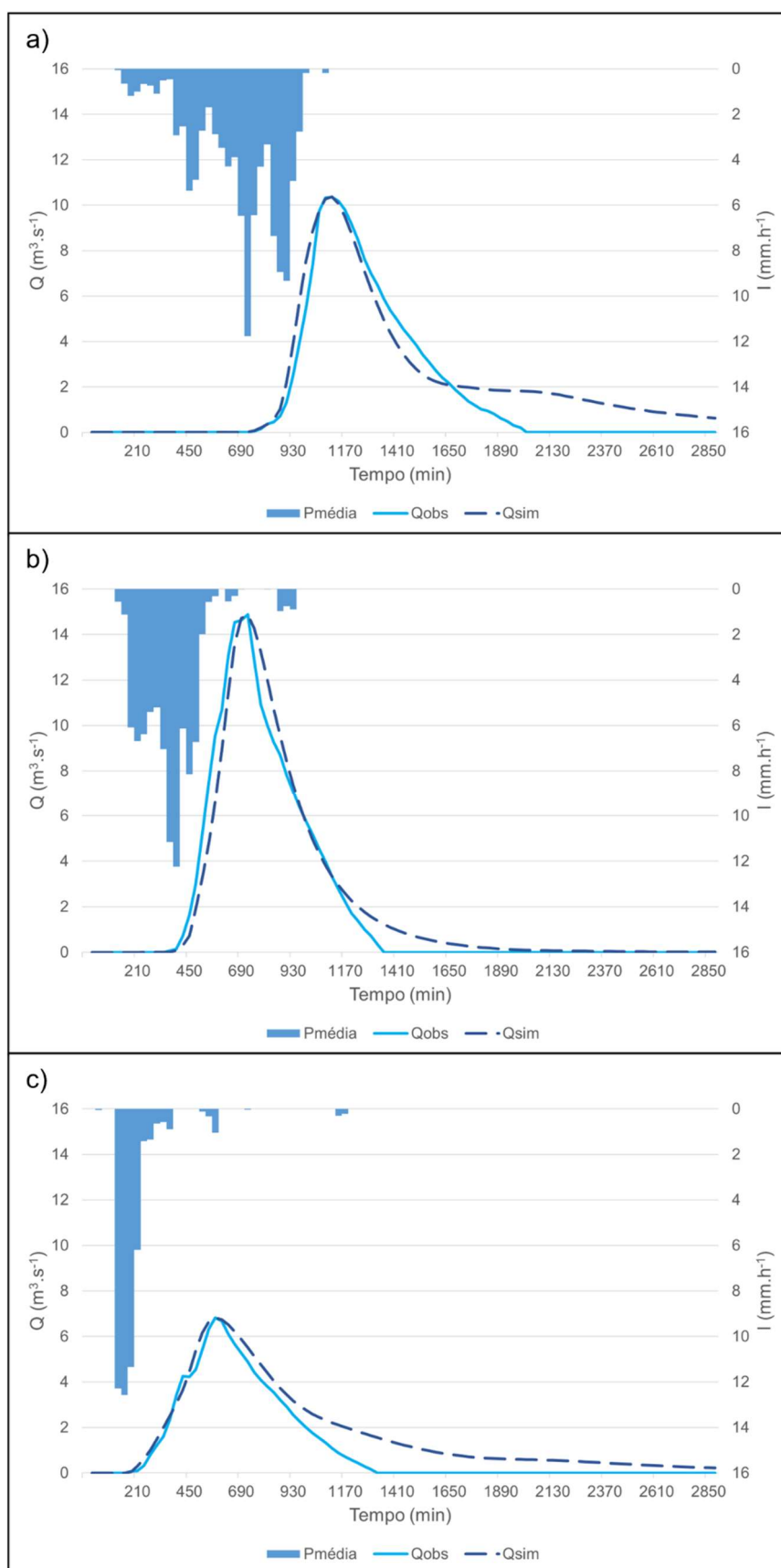


Figura 20 – Gráfico de eventos de chuva utilizados em análise de calibração do LISEM direcionada à BHAC, e considerados no presente estudo como eventos 1 (a), 2 (b) e 3 (c). Fonte: elaborado a partir de VARGAS *et al.*, 2021.

O evento 1 corresponde a uma chuva com duração de aproximadamente 870 min, precipitação total (P_{total}) igual a 53,5 mm, e intensidade com tendência geral de aumento durante todo o evento, alcançando o valor máximo de 11,76 mm.h⁻¹, caracterizando um evento com padrão atrasado, no qual a intensidade máxima ocorre no terço final da sua duração. Já o evento 2, com duração de cerca de 810 min e P_{total} igual a 44,6 mm, apresenta intensidade acima de 5 mm.h⁻¹ durante a primeira metade do evento, atingindo o valor máximo de 12,24 mm.h⁻¹ entre o terço inicial e o terço final da sua duração, consistindo em um padrão intermediário. O evento 3, por sua vez, tem duração de aproximadamente 450 min, P_{total} igual a 24,7 mm, e intensidade concentrada no terço inicial do evento, com valor máximo igual a 12,58 mm.h⁻¹ e tendência geral de redução, caracterizando um evento de padrão adiantado.

Quanto à qualidade das respostas simuladas, o desempenho do LISEM pode ser considerado excelente para os três eventos considerados, o que fica evidente quando se constata a similaridade dos hidrogramas referentes à vazão observada (Q_{obs}) e à vazão simulada (Q_{sim}) para os mesmos. Diferenças mais perceptíveis ocorrem apenas na parte final da fase de recessão.

O desempenho do modelo também foi verificado com a aplicação do coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), um coeficiente adimensional amplamente utilizado para avaliar a performance de modelos hidrológicos (HARMEL; SMITH, 2007). Matematicamente, o C_{NS} pode ser definido com um menos a soma das diferenças entre valores previstos e observados, sendo o valor máximo (1,0) correspondente ao ajuste perfeito (KRAUSE *et al.*, 2005). As simulações realizadas para os eventos considerados no presente estudo obtiveram os valores de 0,91, 0,97 e 0,87 para os eventos 1, 2 e 3, respectivamente. Esses valores ratificam a seleção dos três eventos em questão, já que o C_{NS} pode ser classificado como satisfatório ($0,50 < C_{NS} < 0,54$), bom ($0,54 < C_{NS} < 0,65$) ou muito bom ($C_{NS} > 0,65$) (MORIASI *et al.* 2007).

Uma vez selecionados os eventos de chuva, pode-se avançar para a definição dos demais dados de entrada do modelo. Nesse sentido, levando em conta a importância que o presente estudo atribui à cobertura da terra e à sua variabilidade, para cada mapa de cenário elaborado procedeu-se a incorporação de dados com valores específicos para cada classe de cobertura considerada, no que se refere aos seguintes parâmetros: rugosidade aleatória da superfície do solo (cm); coeficiente de rugosidade de superfície de Manning; fração de área coberta por vegetação; altura da vegetação (m).

Os parâmetros referentes às classes de cobertura da terra, devidamente incorporados aos mapas dos cenários, são apenas parte do conjunto de parâmetros envolvidos na análise de sensibilidade do LISEM. Os valores utilizados para todos esses parâmetros, bem como para os parâmetros inerentes à etapa de calibração, foram os mesmos já definidos para a BHAC em estudo realizado com o propósito avaliar o desempenho do LISEM na simulação do escoamento superficial direto dessa bacia, com especial atenção à toda a parametrização envolvida (VARGAS, *et al.*, 2021).

Uma vez confirmada a calibração, passou-se a etapa de simulação propriamente dita, com a aplicação do LISEM aos 19 cenários elaborados, considerando os três eventos de chuva selecionados, totalizando 57 simulações.

3.4 Tabulação e Análise de Dados

Os resultados obtidos nas simulações foram tabulados em planilhas Excel, no sentido de viabilizar o cálculo de variáveis resposta, tais como escoamento superficial direto (ESD), vazão de pico (Q_p) e tempo de pico (t_p), bem como de permitir a confecção de hidrogramas de ESD e gráficos comparativos com base na hierarquização das áreas de captação.

No que se refere à etapa de análise dos resultados obtidos na simulação, procedeu-se a descrição sistemática dos dados decorrentes da modelagem hidrológica dos 19 cenários considerados.

Os cenários do grupo 1, com cobertura homogênea em toda a BHAC, são comparados entre si e com aquele que considera a cobertura atual da terra, tomado como cenário de referência, no sentido de expressar o impacto hidrológico das diferentes classes de cobertura existentes na bacia.

Já para os cenários do grupo 2, com a cobertura da terra variando conforme a ordem das áreas de captação da BHAC, as comparações são feitas, inicialmente, entre os cenários com variação de cobertura apenas nas áreas de uma mesma ordem. Cabe observar que os conjuntos das áreas de captação de cada ordem apresentam diferentes extensões territoriais (tabela 1), o que certamente influencia os valores absolutos de suas respostas hidrológicas. Com base nisso, os cenários com variação de cobertura apenas nas áreas de uma mesma ordem são comparados entre si e com o cenário de solo exposto em toda a extensão da bacia, tomado como cenário de referência por ser a classe de cobertura que tende a apresentar as respostas mais acentuadas em simulações chuva-vazão.

No sentido de permitir a comparação entre cenários com variação de cobertura nas áreas de ordens diferentes, recorreu-se à relativização dos valores obtidos nas simulações de ESD, Q_p e t_p . Para tanto, calculou-se a diferença entre os valores simulados para cada cenário e aquele obtido para o respectivo cenário de referência, sendo o resultado dividido pela área do conjunto das áreas de captação correspondente. O referido cálculo é representado pela seguinte expressão matemática:

$$I = \frac{V_{Cx,n} - V_{CR}}{A_n}$$

onde I é o impacto na variável resposta (ESD, Q_p ou t_p); $V_{Cx,n}$ é o valor (de ESD, Q_p ou t_p) simulado para o cenário com classe de cobertura “x” nas áreas de captação da ordem “n”; V_{CR} é o valor (de ESD, Q_p ou t_p) simulado para o cenário de referência; e A_n é a área total (km^2) do conjunto de áreas de captação da ordem “n”.

Assim, torna-se possível estimar, para o conjunto das áreas de captação de cada ordem, valores para os efeitos hidrológicos que a substituição de 1 km^2 de determinado tipo de cobertura impõe à BHAC como um todo, sendo esses valores plenamente passíveis de comparação.

4 Resultados e Discussão

Os resultados do presente estudo estão organizados de acordo com o tipo de cenário considerado, seguindo o agrupamento definido durante a sua elaboração, quais sejam: cenários de cobertura total (grupo 1) e cenários de cobertura por área de captação hierarquizada (grupo 2). A seguir apresenta-se a descrição das respostas simuladas para cada cenário de ambos os grupos, sendo que, para os cenários do grupo 2, também são expostas comparações entre os resultados obtidos para os diferentes níveis hierárquicos das áreas de captação.

4.1 Cenários de Cobertura Total

As simulações envolvendo os cenários de cobertura total realizadas para os eventos de chuva considerados revelaram distintos comportamentos de ESD, Q_p e t_p (tabela 2; figura 21).

Os valores obtidos para o ESD revelaram, para os três eventos de chuva, uma mesma sequência de cenários: solo exposto > área cultivada > cobertura atual > campo > mata. Assim, quando se analisa a razão de escoamento, i.e., ESD/P_{total} , observa-se que, para os três eventos de chuva, os cenários de área cultivada e solo exposto apresentam valores acentuados relativamente ao cenário de cobertura atual (cenário de referência), enquanto os cenários de campo e mata apresentam valores atenuados. O cenário de solo exposto corresponde às maiores acentuações, e o cenário de mata às maiores atenuações, sendo que a diferença entre esses extremos da razão de escoamento ultrapassa 7% na estimativa para o evento de chuva 3 (antecipado). Ainda analisando a razão de escoamento, observa-se que os quatro cenários de cobertura total e o cenário de referência (cobertura atual) apresentam um aumento da relação ESD/P_{total} ao longo da série de eventos de chuva, com os menores valores para o evento 1 (padrão atrasado), seguido do evento 2 (padrão intermediário), e os maiores valores para o evento 3 (padrão adiantado).

Tabela 2 – Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura total na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3.

Evento de chuva	cobertura da terra	ESD (mm)	ESD/P _{total} (%)	diferença por cenário (%)*	Q _p (m ³ .s ⁻¹)	t _p (min.)
1 (atrasado)	solo exposto	4,62	8,64	2,58	22,11	960 m
	área cultivada	3,96	7,40	1,34	16,98	990
	cobertura atual	3,24	6,06	-	10,36 ↓	1.110 M
	campo	3,08	5,76	-0,3	11,37 ↑	1.020
	mata	1,91	3,57	-2,49	6,7	1.080
2 (intermediário)	solo exposto	4,03	9,04	2,00	31,08	540 m
	área cultivada	3,61	8,09	1,05	21,53	600
	cobertura atual	3,14	7,04	-	14,87	720
	campo	2,66	5,96	-1,08	10,84	750
	mata	1,78	3,99	-3,05	5,12	960 M
3 (adiantado)	solo exposto	3,42	13,85	3,81	15,02	360 m
	área cultivada	2,96	11,98	1,94	10,77	420
	cobertura atual	2,48	10,04	-	6,82 ↓	570
	campo	2,37	9,60	-0,44	6,95 ↑	540
	mata	1,58	6,40	-3,64	3,64	720 M

Cenários de cobertura da terra ordenados por evento de chuva e em função dos valores simulados para o ESD. O número de setas para cima ou para baixo indica a diferença de posição dos valores simulados para a variável Q_p relativamente à sequência de valores simulados e ordenados para o ESD em resposta ao mesmo evento de chuva. A letra “m”, minúscula ou maiúscula, indica, respectivamente, o menor e o maior valor de t_p simulado para cada evento de chuva. (*) Diferença como função do cenário de cobertura atual (cenário de referência).

Com relação à Q_p, para o evento 2 (padrão intermediário), foram obtidos resultados com valores na mesma sequência daqueles obtidos para ESD. Para os eventos 1 e 3 (padrões atrasado e adiantado, respectivamente), a sequência de cenários com base nos valores de Q_p foi solo exposto > área cultivada > campo > cobertura atual > mata, diferindo da sequência obtida para o evento 2 provavelmente devido a alguma influência da diferenciação entre as precipitações.

Relativamente ao t_p, as simulações expuseram o cenário de solo exposto com os menores valores nos três eventos de chuva considerados, seguido imediatamente pelo cenário de área cultivada; os maiores valores foram obtidos para o cenário de mata, nos eventos 2 e 3, e para o cenário de cobertura atual, no evento 1, no qual o cenário de mata apresentou o segundo maior valor.

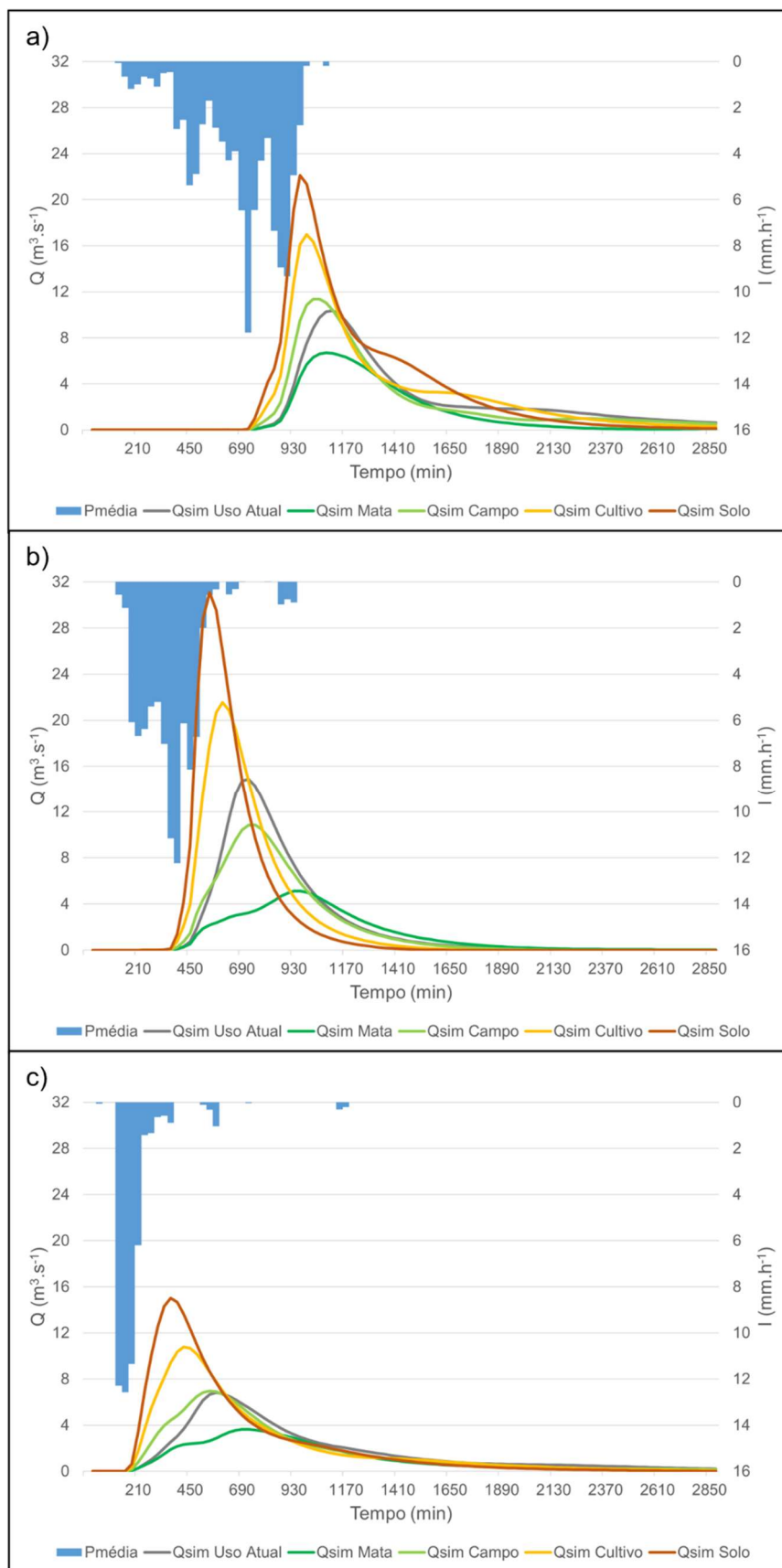


Figura 21 – Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura total na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

Considerando-se que, conforme já mencionado, a BHAC situa-se na Região Fitoecológica da Floresta Estacional Semidecidual (CORDEIRO; HASENACK, 2009), e que, portanto, já foi predominantemente coberta por mata nativa, cabe salientar, no presente estudo, o fato de o cenário de mata destacar-se dos demais, inclusive do cenário de cobertura atual. Os resultados das simulações revelaram o cenário de mata com os menores valores de ESD e Q_p para os três eventos considerados, e o maior valor de t_p nos eventos 2 e 3, e o segundo maior valor de t_p no evento 1. Tais resultados mostram-se alinhados com o amplo reconhecimento da vegetação florestal como um dos tipos de cobertura da terra com melhor desempenho na atenuação de respostas hidrológicas face a episódios de chuva (LIMA; ZAKIA, 2004; HÜMANN *et al.*, 2011; GAROFOLO; RODRIGUEZ, 2022). Resultados convergentes também foram encontrados por Pinto *et al.* (2019), em estudo relacionado à influência do uso da terra nas propriedades hidrológicas do solo da bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, em Minas Gerais. O estudo, que estimou a condutividade hidráulica do solo com base na utilização de algoritmos de aprendizado de máquina, encontrou os maiores valores associados à mata nativa, e os menores valores correspondentes a pastagem e campo rupestre. Em suas conclusões, os autores sugerem que o desmatamento da bacia estudada tende a reduzir a condutividade hidráulica do solo, diminuindo a infiltração, a recarga do lençol freático e a capacidade de armazenamento de água, comportamento que pode aumentar o escoamento superficial e a erosão do solo. Nessa mesma linha, Oliveira *et al.* (2020), em estudo que abordou a influência da cobertura da terra no escoamento de uma pequena bacia hidrográfica no município de Eldorado do Sul - RS, com base na utilização de parcelas de erosão, registrou os menores valores de escoamento para a classe de cobertura correspondente à floresta nativa.

Nesse contexto, a análise das simulações envolvendo os cenários de cobertura total sugere que a cobertura da terra atualmente existente na BHAC a afasta significativamente da sua condição hidrológica natural (com cobertura predominantemente florestal), uma vez que acarreta aumento do ESD, elevação da Q_p , e antecipação do t_p (esta última, em dois dos três eventos de chuva considerados). Entretanto, cabe mencionar que o cenário de cobertura atual, tal como concebido no presente estudo, pode apresentar variações ao longo de

períodos relativamente curtos. Dorneles (2020), realizou 11 classificações da cobertura da terra da BHAC, entre maio de 2015 e outubro de 2018, com base nas mesmas classes de cobertura utilizadas no presente estudo, e constatou diferenças consideráveis nas proporções das classes verificadas em cada classificação. As maiores variações ocorreram para as classes de solo exposto e área cultivada, provavelmente por corresponderem a duas fases dos cultivos anuais amplamente praticados na BHAC. Nos cultivos anuais, especialmente naqueles em que se pratica o plantio convencional, é comum a ocorrência de solo exposto nos estágios de pousio ou preparo do solo para o plantio, constituindo, assim, um ciclo de alternância com as áreas cultivadas (ROVANI; CASSOL, 2012). O fato de a cobertura da terra variar em períodos de tempo relativamente curtos exige cautela na interpretação das simulações hidrológicas obtidas no presente estudo para a chamada “cobertura atual” da BHAC, de modo que é importante enfatizar que a sua validade está atrelada à época em que foram produzidas as imagens de satélite utilizadas na classificação.

4.2 Cenários de Cobertura por Área de Captação Hierarquizada

As simulações envolvendo os cenários de cobertura da terra com diferenças restritas às áreas de captação de primeira ordem revelaram, para os três eventos de chuva, valores de ESD e Q_p em uma mesma sequência de cenários: cenário de referência (solo exposto em toda a bacia) > área cultivada > campo > mata. Quanto às variações do ESD em função da cobertura, a análise da razão de escoamento revela as maiores variações para o cenário de mata, cuja diferença para o cenário de referência ultrapassa 4% na estimativa para o evento de chuva 3 (antecipado). Além disso, todos os quatro cenários apresentam um aumento da relação ESD/P_{total} ao longo da série de eventos de chuva, com os menores valores para o evento 1 (padrão atrasado), seguido do evento 2 (padrão intermediário), e os maiores valores para o evento 3 (padrão adiantado). Relativamente ao t_p , as simulações expuseram os cenários de solo exposto e área cultivada com os menores valores nos três eventos de chuva. Os maiores valores de t_p foram obtidos para os cenários de mata e campo, nos eventos 1 e 3, e somente para o cenário de mata, no evento 2 (tabela 3; figura 22).

Tabela 3 – Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3, sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 1ª ordem.

Evento de chuva	cobertura da terra	ESD (mm)	ESD/P _{total} (%)	diferença por cenário (%)**	Q _p (m ³ .s ⁻¹)	t _p (min.)
1 (atrasado)	solo exposto *	4,62	8,64	-	22,11	960 m
	área cultivada	4,30	8,04	-0,60	20,65	960 m
	campo	3,89	7,27	-1,37	18,66	990 M
	mata	3,13	5,85	-2,79	16,06	990 M
2 (intermediário)	solo exposto *	4,03	9,04	-	31,08	540 m
	área cultivada	3,85	8,63	-0,41	28,26	540 m
	campo	3,60	8,07	-0,97	24,82	570
	mata	2,93	6,57	-2,47	17,69	600 M
3 (adiantado)	solo exposto *	3,42	13,85	-	15,02	360 m
	área cultivada	3,21	13,00	-0,85	13,70	360 m
	campo	2,93	11,86	-1,99	12,13	390 M
	mata	2,42	9,80	-4,05	9,67	390 M

Cenários de cobertura da terra ordenados por evento de chuva e em função dos valores simulados para o ESD. (*) Diferentemente dos demais cenários, que exibem diferenças de cobertura especificamente nas áreas de captação de 1ª ordem, o cenário de solo exposto corresponde a um cenário de cobertura total, e é aqui apresentado apenas como cenário de referência, para contextualizar a análise dos demais cenários. A letra “m”, minúscula ou maiúscula, indica, respectivamente, o menor e o maior valor de t_p simulado para cada evento de chuva. (**) Diferença como função do cenário de referência.

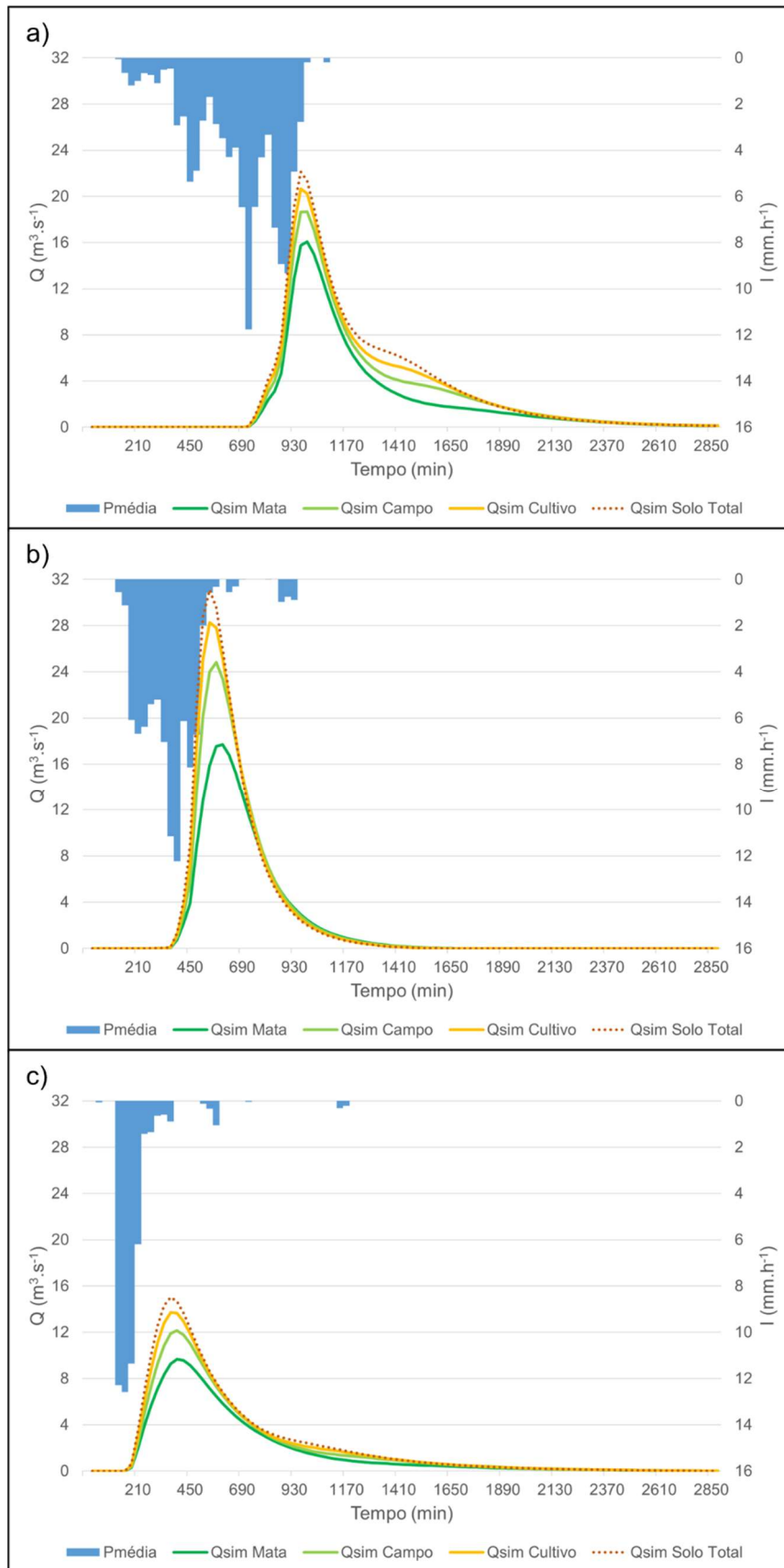


Figura 22 – Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c), sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 1ª ordem.

As simulações referentes aos cenários de cobertura da terra com diferenças restritas às áreas de captação de segunda ordem revelaram, para os três eventos de chuva considerados, valores de ESD e Q_p em uma mesma sequência de cenários: cenário de referência (solo exposto em toda a bacia) > área cultivada > campo > mata. Quanto às variações do ESD em função da cobertura, a análise da razão de escoamento revela as maiores variações para o cenário de mata, cuja diferença para o cenário de referência chega a 1,95% na estimativa para o evento de chuva 3 (antecipado). Além disso, todos os quatro cenários apresentam um aumento da relação ESD/P_{total} ao longo da série de eventos de chuva, com os menores valores para o evento 1 (padrão atrasado), seguido do evento 2 (padrão intermediário), e os maiores valores para o evento 3 (padrão adiantado). Relativamente ao t_p , as simulações expuseram o cenário de solo exposto com os menores valores nos três eventos de chuva considerados, o que se deu conjuntamente aos cenários de área cultivada e campo, no evento 1, e ao cenário de área cultivada, no evento 2; os maiores valores foram obtidos para os cenários de mata e campo, no evento 2, e somente para o cenário de mata, nos eventos 1 e 3 (tabela 4; figura 23).

Tabela 4 – Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3, sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 2ª ordem.

Evento de chuva	cobertura da terra	ESD (mm)	ESD/P_{total} (%)	diferença por cenário (%)**	Q_p (m³.s⁻¹)	t_p (min.)
1 (atrasado)	solo exposto *	4,62	8,64	-	22,11	960 m
	área cultivada	4,47	8,36	-0,28	21,05	960 m
	campo	4,27	7,98	-0,66	19,56	960 m
	mata	3,92	7,33	-1,31	17,82	990 M
2 (intermediário)	solo exposto *	4,03	9,04	-	31,08	540 m
	área cultivada	3,95	8,86	-0,18	29,67	540 m
	campo	3,82	8,57	-0,47	27,56	570 M
	mata	3,54	7,94	-1,10	24,48	570 M
3 (adiantado)	solo exposto *	3,42	13,85	-	15,02	360 m
	área cultivada	3,32	13,44	-0,41	13,93	390
	campo	3,18	12,87	-0,98	12,51	390
	mata	2,94	11,90	-1,95	10,66	420 M

Cenários de cobertura da terra ordenados por evento de chuva e em função dos valores simulados para o ESD. (*) Diferentemente dos demais cenários, que exibem diferenças de cobertura especificamente nas áreas de captação de 2ª ordem, o cenário de solo exposto corresponde a um cenário de cobertura total, e é aqui apresentado apenas como cenário de referência, para contextualizar a análise dos demais cenários. A letra “m”, minúscula ou maiúscula, indica, respectivamente, o menor e o maior valor de t_p simulado para cada evento de chuva. (**) Diferença como função do cenário de referência.

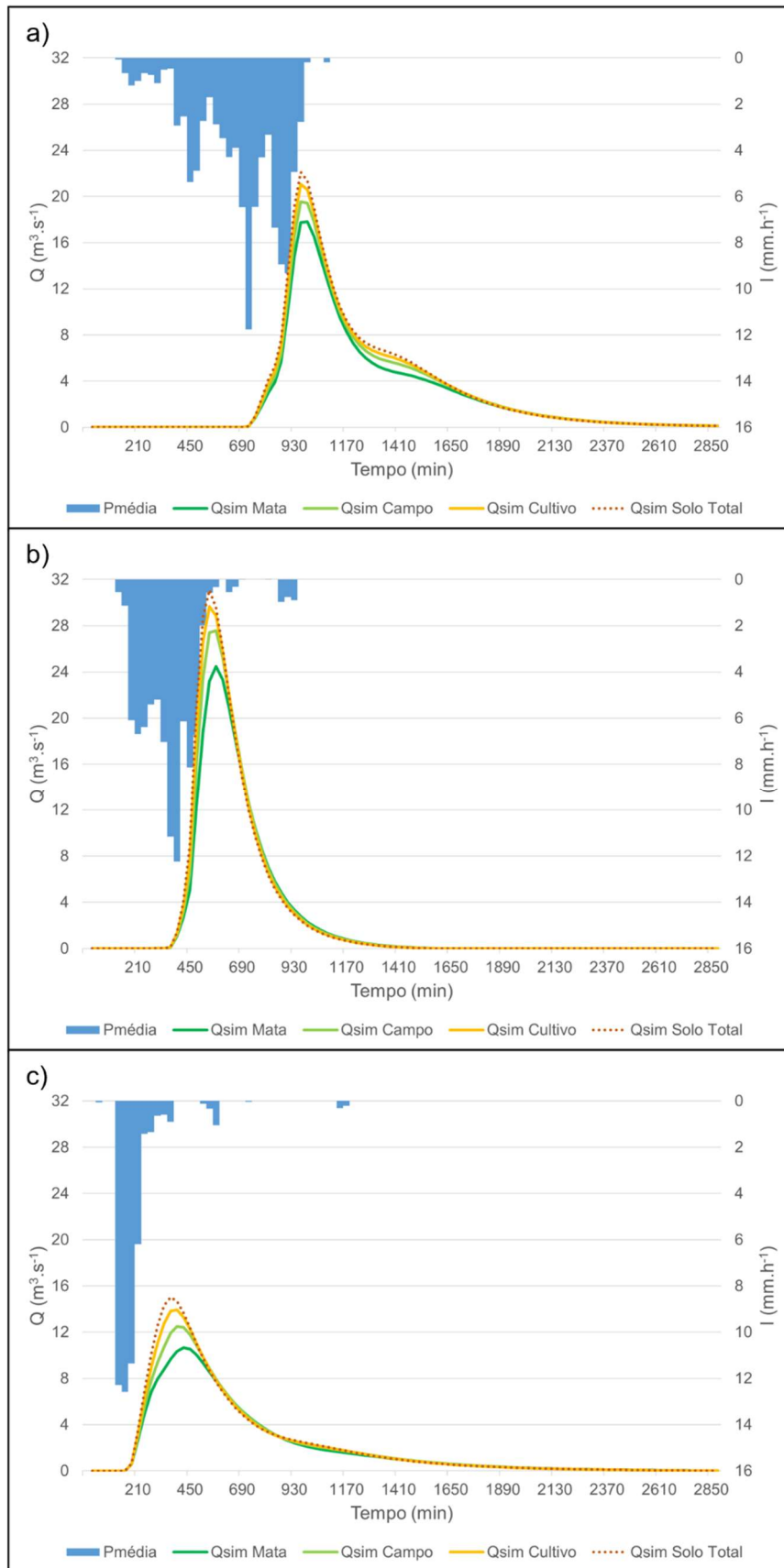


Figura 23 – Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c), sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 2ª ordem.

As simulações envolvendo os cenários de cobertura da terra com diferenças restritas às áreas de captação de terceira ordem revelaram, para os três eventos de chuva considerados, valores de ESD e Q_p em uma mesma sequência de cenários: cenário de referência (solo exposto em toda a bacia) > área cultivada > campo > mata. Quanto às variações do ESD em função da cobertura, a análise da razão de escoamento revela as maiores variações para o cenário de mata, cuja diferença para o cenário de referência chega a 0,98% na estimativa para o evento de chuva 3 (antecipado). Além disso, todos os quatro cenários apresentam um aumento da relação ESD/P_{total} ao longo da série de eventos de chuva, com os menores valores para o evento 1 (padrão atrasado), seguido do evento 2 (padrão intermediário), e os maiores valores para o evento 3 (padrão adiantado). Relativamente ao t_p , as simulações expuseram o cenário de solo exposto com os menores valores nos três eventos de chuva considerados, o que se deu conjuntamente ao cenário de área cultivada, nos eventos 1 e 2; os maiores valores foram obtidos para os cenários de mata e campo, nos eventos 1 e 2, e somente para o cenário de mata, no evento 3 (tabela 5; figura 24).

Tabela 5 – Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3, sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 3ª ordem.

Evento de chuva	cobertura da terra	ESD (mm)	ESD/P_{total} (%)	diferença por cenário (%)**	Q_p ($m^3.s^{-1}$)	t_p (min.)
1 (atrasado)	solo exposto *	4,62	8,64	-	22,11	960 m
	área cultivada	4,52	8,45	-0,19	20,07	960 m
	campo	4,40	8,22	-0,42	17,42	990 M
	mata	4,19	7,83	-0,81	14,62	990 M
2 (intermediário)	solo exposto *	4,03	9,04	-	31,08	540 m
	área cultivada	3,97	8,90	-0,14	29,44	540 m
	campo	3,89	8,72	-0,32	27,35	570 M
	mata	3,73	8,36	-0,68	24,43	570 M
3 (adiantado)	solo exposto *	3,42	13,85	-	15,02	360 m
	área cultivada	3,37	13,64	-0,21	13,57	390
	campo	3,30	13,36	-0,49	11,78	450
	mata	3,18	12,87	-0,98	10,09	510 M

Cenários de cobertura da terra ordenados por evento de chuva e em função dos valores simulados para o ESD. (*) Diferentemente dos demais cenários, que exibem diferenças de cobertura especificamente nas áreas de captação de 3ª ordem, o cenário de solo exposto corresponde a um cenário de cobertura total, e é aqui apresentado apenas como cenário de referência, para contextualizar a análise dos demais cenários. A letra “m”, minúscula ou maiúscula, indica, respectivamente, o menor e o maior valor de t_p simulado para cada evento de chuva. (**) Diferença como função do cenário de referência.

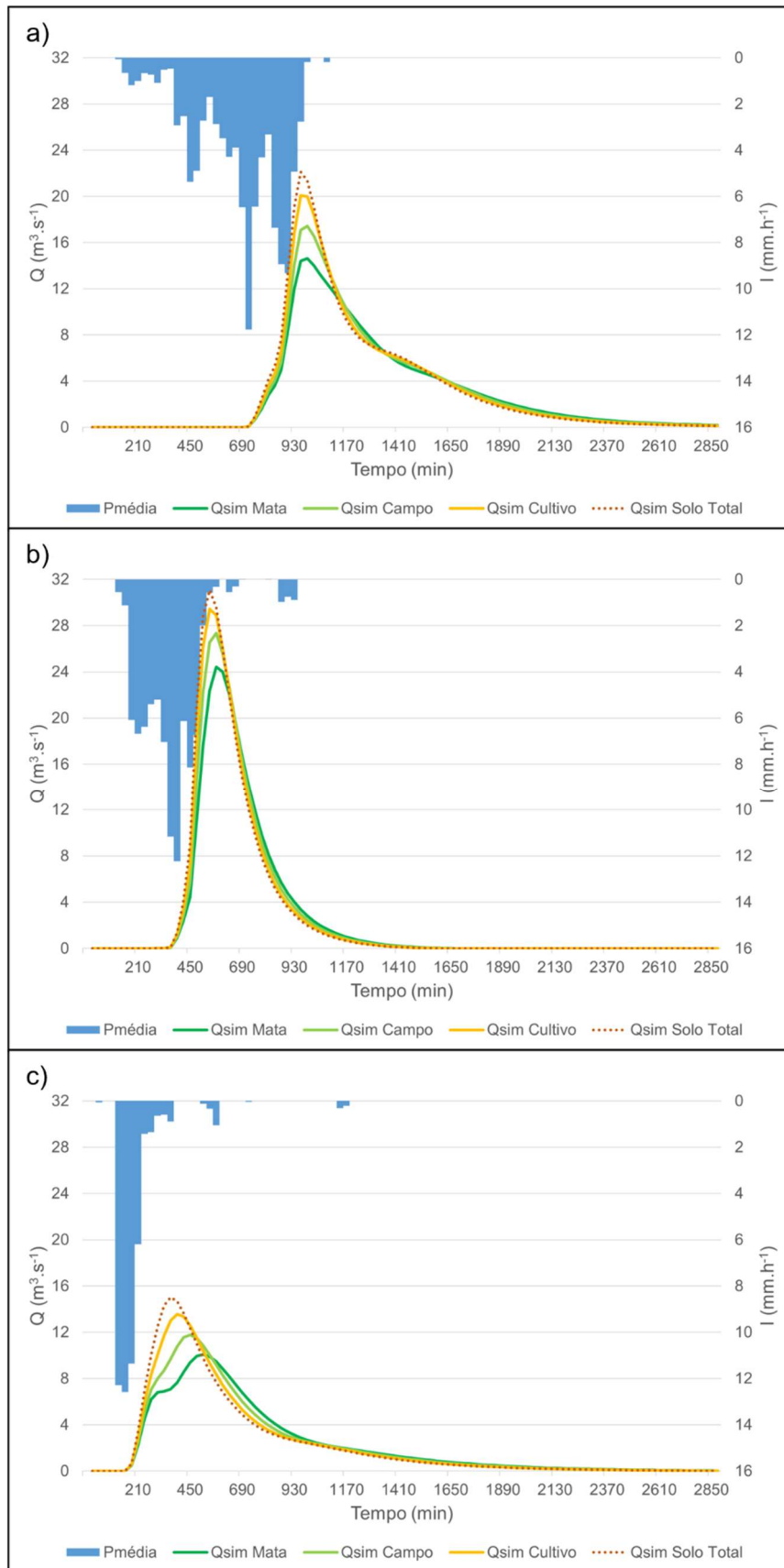


Figura 24 – Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c), sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 3ª ordem.

As simulações referentes aos cenários de cobertura com diferenças restritas às áreas de captação de quarta ordem revelaram, para os três eventos de chuva considerados, valores de ESD e Q_p em uma mesma sequência de cenários: cenário de referência (solo exposto em toda a bacia) > área cultivada > campo > mata. Quanto às variações do ESD em função da cobertura, a análise da razão de escoamento revela as maiores variações para o cenário de mata, cuja diferença para o cenário de referência chega a 0,53% na estimativa para o evento de chuva 3 (antecipado). Além disso, todos os quatro cenários apresentam um aumento da relação ESD/P_{total} ao longo da série de eventos de chuva, com os menores valores para o evento 1 (padrão atrasado), seguido do evento 2 (padrão intermediário), e os maiores valores para o evento 3 (padrão adiantado). Relativamente ao t_p , as simulações expuseram os cenários de solo exposto, área cultivada e campo com os menores valores no evento de chuva 2, no qual o cenário de mata obteve o maior valor. Os eventos 1 e 3 não exibiram diferenciações do t_p para os cenários analisados (tabela 6; figura 25).

Tabela 6 – Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3, sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 4ª ordem.

Evento de chuva	cobertura da terra	ESD (mm)	ESD/P_{total} (%)	diferença por cenário (%)**	Q_p ($m^3.s^{-1}$)	t_p (min.)
1 (atrasado)	solo exposto *	4,62	8,64	-	22,11	960
	área cultivada	4,57	8,54	-0,10	22,07	960
	campo	4,51	8,43	-0,21	22,04	960
	mata	4,42	8,26	-0,38	22,03	960
2 (intermediário)	solo exposto *	4,03	9,04	-	31,08	540 m
	área cultivada	4,00	8,97	-0,07	29,56	540 m
	campo	3,95	8,86	-0,18	27,34	540 m
	mata	3,87	8,68	-0,36	25,02	570 M
3 (adiantado)	solo exposto *	3,42	13,85	-	15,02	360
	área cultivada	3,39	13,72	-0,13	14,97	360
	campo	3,35	13,56	-0,29	14,94	360
	mata	3,29	13,32	-0,53	14,93	360

Cenários de cobertura da terra ordenados por evento de chuva e em função dos valores simulados para o ESD. (*) Diferentemente dos demais cenários, que exibem diferenças de cobertura especificamente nas áreas de captação de 4ª ordem, o cenário de solo exposto corresponde a um cenário de cobertura total, e é aqui apresentado apenas como cenário de referência, para contextualizar a análise dos demais cenários. A letra “m”, minúscula ou maiúscula, indica, respectivamente, o menor e o maior valor de t_p simulado para cada evento de chuva. (**) Diferença como função do cenário de referência.

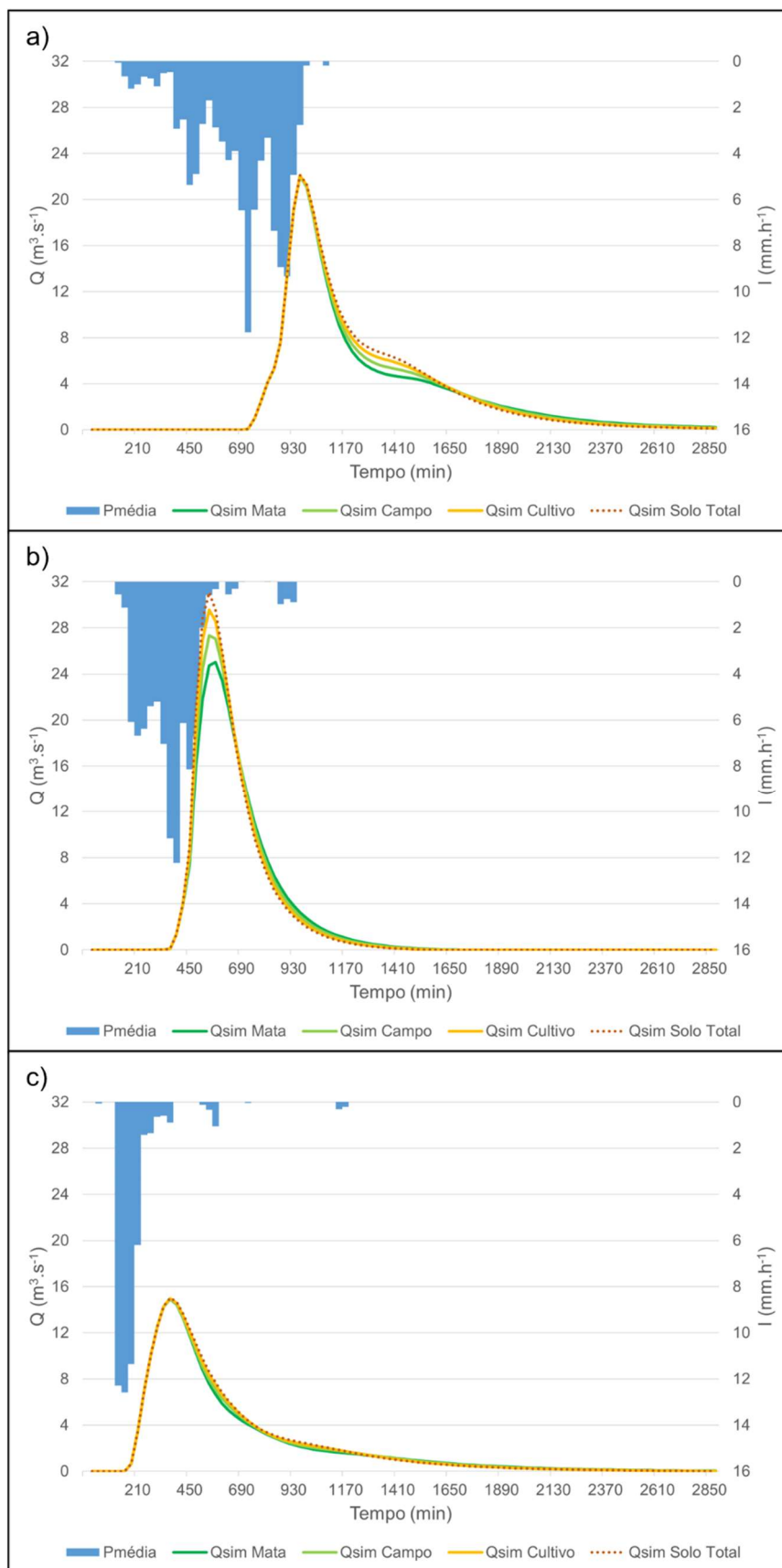


Figura 25 – Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c), sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 4ª ordem.

As simulações envolvendo os cenários de cobertura com diferenças restritas às áreas de captação de quinta ordem revelaram, para os três eventos de chuva considerados, valores de ESD e Q_p em uma mesma sequência de cenários: cenário de referência (solo exposto em toda a bacia) > área cultivada > campo > mata. Quanto às variações do ESD em função da cobertura, a análise da razão de escoamento revela as maiores variações para o cenário de mata, cuja diferença para o cenário de referência chega a 1,46% na estimativa para o evento de chuva 3 (antecipado). Além disso, todos os quatro cenários apresentam um aumento da relação ESD/P_{total} ao longo da série de eventos de chuva, com os menores valores para o evento 1 (padrão atrasado), seguido do evento 2 (padrão intermediário), e os maiores valores para o evento 3 (padrão adiantado). Relativamente ao t_p , as simulações expuseram o cenário de solo exposto com os menores valores nos três eventos de chuva considerados, o que se deu conjuntamente ao cenário de área cultivada, no evento 1, e aos cenários de área cultivada e campo, no evento 3; os menores valores foram obtidos para os cenários de mata e campo, no evento 1, e somente para o cenário de mata, nos eventos 2 e 3 (tabela 7; figura 26).

Tabela 7 – Respostas hidrológicas estimadas para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em decorrência dos eventos de chuva 1, 2 e 3, sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 5ª ordem.

Evento de chuva	cobertura da terra	ESD (mm)	ESD/P_{total} (%)	diferença por cenário (%)**	Q_p ($m^3.s^{-1}$)	t_p (min.)
1 (atrasado)	solo exposto *	4,62	8,64	-	22,11	960 m
	área cultivada	4,55	8,50	-0,14	20,46	960 m
	campo	4,44	8,30	-0,34	18,69	990 M
	mata	4,26	7,96	-0,68	16,86	990 M
2 (intermediário)	solo exposto *	4,03	9,04	-	31,08	540 m
	área cultivada	3,96	8,88	-0,16	26,68	570
	campo	3,86	8,65	-0,39	21,10	600
	mata	3,74	8,39	-0,65	16,83	690 M
3 (adiantado)	solo exposto *	3,42	13,85	-	15,02	360 m
	área cultivada	3,34	13,52	-0,33	13,82	360 m
	campo	3,23	13,08	-0,77	12,51	360 m
	mata	3,06	12,39	-1,46	11,33	390 M

Cenários de cobertura da terra ordenados por evento de chuva e em função dos valores simulados para o ESD. (*) Diferentemente dos demais cenários, que exibem diferenças de cobertura especificamente nas áreas de captação de 5ª ordem, o cenário de solo exposto corresponde a um cenário de cobertura total, e é aqui apresentado apenas como cenário de referência, para contextualizar a análise dos demais cenários. A letra “m”, minúscula ou maiúscula, indica, respectivamente, o menor e o maior valor de t_p simulado para cada evento de chuva. (**) Diferença como função do cenário de referência.

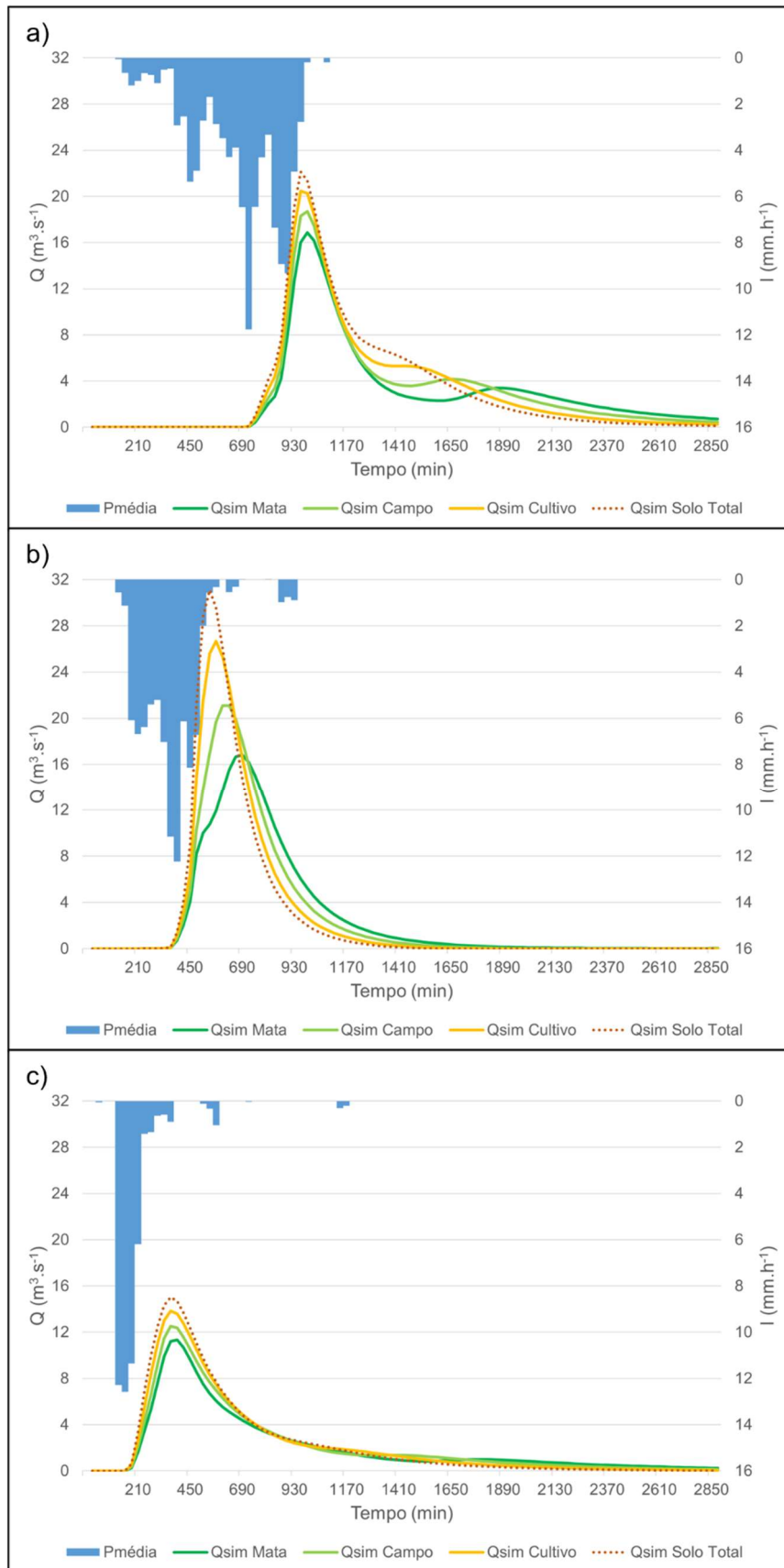


Figura 26 – Hidrogramas de ESD estimados para diferentes cenários de cobertura da terra na BHAC em resposta aos eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c), sendo as diferenças de cobertura restritas às áreas de captação de 5ª ordem.

A análise geral de todos os cenários de cobertura por área de captação hierarquizada reforça a constatação já descrita para os cenários de cobertura total, acerca do destaque para o cenário de mata. Para as áreas de captação das cinco ordens de drenagem analisadas, o cenário de mata apresentou os menores valores simulados para ESD e Q_p nos três eventos de chuva considerados, e o maior valor de t_p em todos os eventos para os quais as simulações revelaram alterações nessa variável. Tais constatações são condizentes com a comum atribuição de alta eficiência à vegetação florestal no que se refere à sua capacidade de atenuar respostas hidrológicas face a eventos de chuva (LIMA; ZAKIA, 2004; HÜMANN *et al.*, 2011; GAROFOLO; RODRIGUEZ, 2022).

Quando se analisa isoladamente o conjunto formado pelas áreas de captação de cada uma das cinco ordens de drenagem, no contexto dos três eventos de chuva, é possível observar que a razão de escoamento se reduz à medida em que se avança do cenário de referência em direção ao cenário de mata, sendo as maiores diferenças alcançadas para o evento de chuva 3, com padrão adiantado. Chuvas com esse padrão normalmente estão associadas à convecção em dias mais quentes e úmidos (REBOITA, 2010). Com base nisso, é possível sugerir que a cobertura da terra na BHAC não influencia apenas no volume total escoado, mas também oferece melhores condições de resposta mediante eventos de chuva com padrão adiantado, os quais frequentemente apresentam alta intensidade, com maior restrição à infiltração de água no solo (FONTOURA, 2019).

A relativamente baixa variabilidade dos valores de ESD, Q_p e t_p simulados para os cenários de cobertura com diferenças restritas às áreas de captação de quarta ordem pode ter sido influenciada pelo fato do conjunto dessas áreas corresponder a apenas 3,47% da área total da BHAC, o que tende a reduzir o seu impacto na dinâmica hidrológica da bacia como um todo, além de permitir a conjectura sobre eventuais limitações do modelo quanto à sensibilidade a variações espaciais menos expressivas. Cabe lembrar que a modelagem hidrológica distribuída, por ser pretensamente sensível à variabilidade espacial da bacia hidrográfica, depende da escala em que as informações espaciais das variáveis de entrada são disponibilizadas (MILLER, 2002).

Especificamente quanto ao t_p , a baixa variabilidade dos valores obtidos nas simulações, apesar de ser mais evidenciável nos resultados referentes aos cenários de cobertura com diferenças restritas às áreas de captação de quarta ordem, também pode ser verificada nos demais cenários de cobertura por área e captação hierarquizada. Isso pode ser explicado pela discretização temporal, uma vez que a modelagem realizada no presente estudo considerou um passo de tempo de 30 minutos, definido a partir da ponderação referente aos aspectos de representatividade dos hidrogramas simulados e tempo de processamento computacional (VARGAS, 2021). Salienta-se o fato de que a definição do intervalo de tempo no processo de modelagem tem efeito direto na sua capacidade de representação da variabilidade temporal das precipitações (TUCCI, 2005). Mesmo com a baixa variabilidade dos valores simulados para o t_p , a análise isolada do conjunto formado pelas áreas de captação de cada uma das cinco ordens de drenagem, no contexto dos três eventos de chuva, permite notar que o cenário de referência (solo exposto) e o cenário de área cultivada apresentam os menores valores. Esse comportamento reflete-se nos valores mais altos de Q_p , uma vez que há maior alteração hidráulica do escoamento, com aumento de velocidade (CUDWORTH, 1989).

No sentido de permitir a análise comparativa das áreas de captação das cinco ordens de drenagem analisadas, são apresentadas a seguir as estimativas do impacto causado pelos diferentes cenários de cobertura da terra no ESD, na Q_p e no t_p simulados para os três eventos de chuva considerados, assumindo o cenário de solo exposto como referência.

Com relação ao ESD, a análise do impacto estimado dos diferentes cenários de cobertura da terra com base na hierarquização das áreas de captação (figura 27) revelou uma clara tendência de aumento no impacto de todos os cenários conforme se avança no ordenamento. As áreas de primeira ordem mostraram os menores impactos estimados para os três cenários de cobertura, nos três eventos de chuva. As áreas de quinta ordem exibiram os maiores impactos estimados para os três cenários de cobertura, nos eventos de chuva 2 e 3 (padrão intermediário e adiantado, respectivamente), sendo que no evento 1 (padrão atrasado) esse comportamento se repetiu para o cenário de mata, mas não para os cenários de campo e área cultivada, nos quais os maiores impactos incidiram sobre as áreas de quarta ordem, seguidas pelas de quinta ordem.

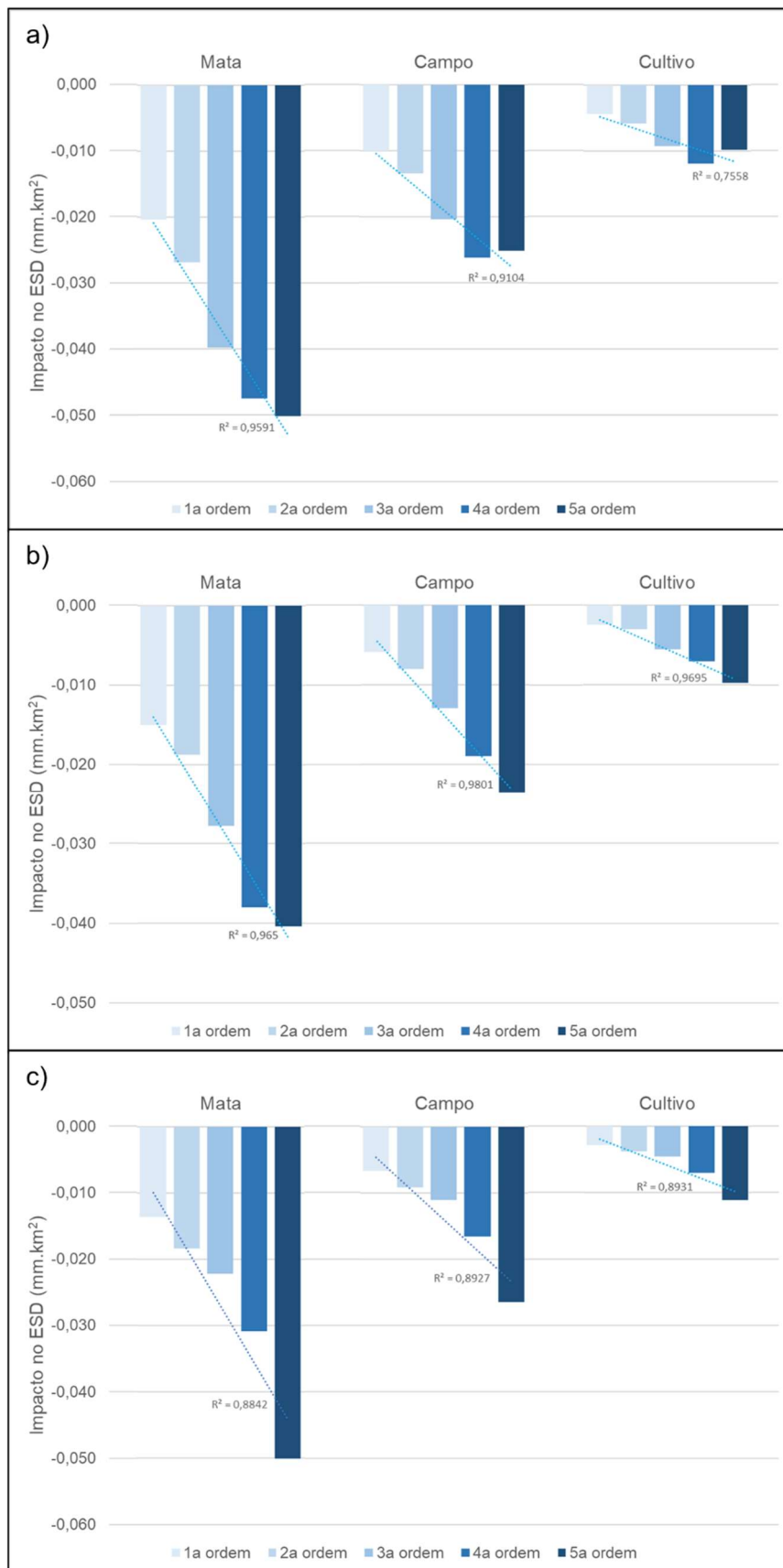


Figura 27 – Gráficos do impacto de diferentes cenários de cobertura da terra sobre o ESD estimado para a BHAC, com base na hierarquização das áreas de captação, assumindo solo exposto como cenário de referência, e considerando os eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

No que se refere à Q_p , a análise do impacto estimado dos diferentes cenários de cobertura da terra com base na hierarquização das áreas de captação (figura 28) mostrou, principalmente para o evento de chuva 2 (padrão intermediário), uma clara tendência de aumento no impacto conforme se avança no ordenamento. Nos eventos 1 e 3 (padrão atrasado e adiantado, respectivamente), a análise de tendência resultou influenciada pelo comportamento aparentemente destoante dos resultados obtidos para as simulações referentes às áreas de captação de quarta ordem, com valores extremamente baixos, que afetaram consideravelmente o coeficiente de determinação (R^2). Conforme já comentado, o conjunto das áreas de captação de quarta ordem corresponde a apenas 3,47% da área total da BHAC, o que pode deixar os respectivos resultados suscetíveis a limitações eventualmente apresentadas pelo modelo relativamente à sua sensibilidade a variações espaciais menos expressivas. Nas simulações do evento de chuva 2 (padrão intermediário), as áreas de primeira ordem mostraram os menores impactos estimados para os três cenários de cobertura. As áreas de quinta ordem exibiram os maiores impactos estimados para os três cenários de cobertura, nos três eventos de chuva.

No que diz respeito ao t_p , a análise do impacto estimado dos diferentes cenários de cobertura da terra provavelmente sofreu influência da já comentada discretização temporal adotada no presente estudo, com passo de tempo de 30 minutos. Dessa forma, os respectivos gráficos (figura 29) devem ser interpretados com cautela, o que não impede que se observe alguns indicativos de tendência de comportamento. Um exemplo pode ser encontrado no cenário de mata, que revelou, principalmente para os eventos de chuva 1 e 2 (padrão atrasado e intermediário, respectivamente), uma tendência de aumento no seu impacto sobre o t_p conforme se avança no ordenamento das áreas de captação. Essa tendência também pode ser visualizada, ainda que de forma mais sutil, nos cenários de campo, relativamente ao evento de chuva 2 (padrão intermediário).

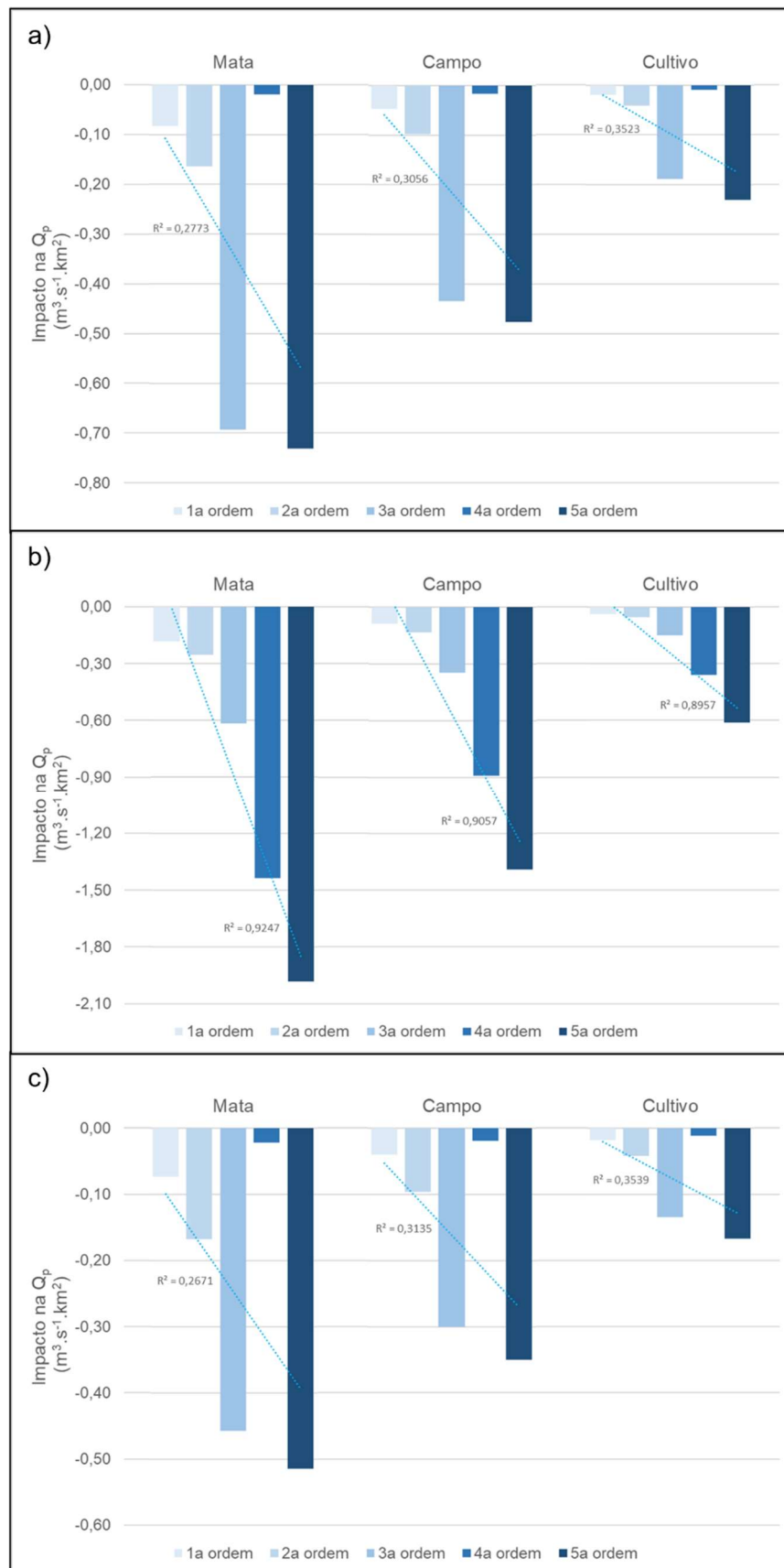


Figura 28 – Gráficos do impacto de diferentes cenários de cobertura da terra sobre a Q_p estimada para a BHAC, com base na hierarquização das áreas de captação, assumindo solo exposto como cenário de referência, e considerando os eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

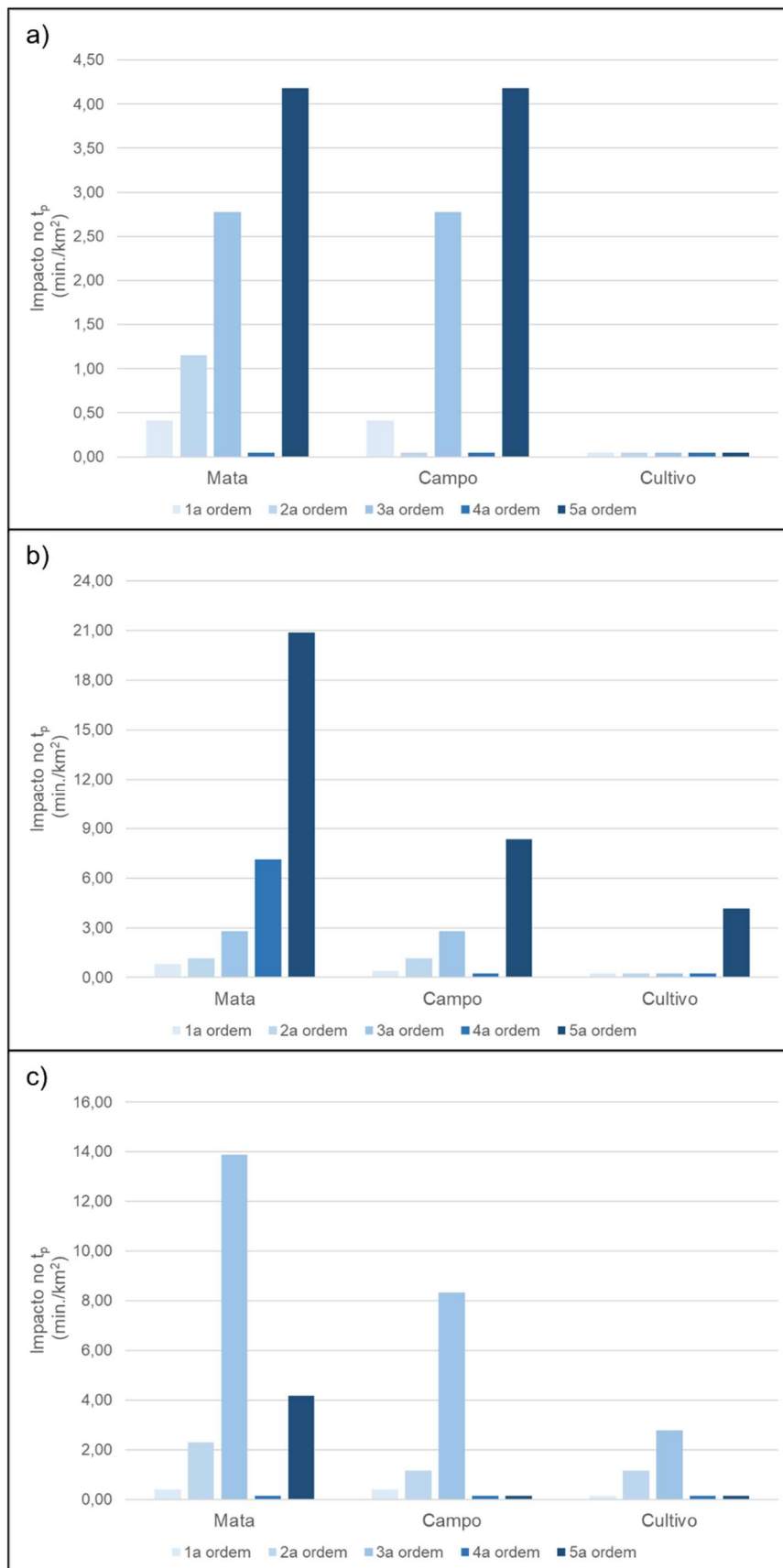


Figura 29 – Gráficos do impacto de diferentes cenários de cobertura da terra sobre o t_p estimado para a BHAC, com base na hierarquização das áreas de captação, assumindo solo exposto como cenário de referência, e considerando os eventos de chuva 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

De forma geral, a análise dos impactos da cobertura da terra estimados para o ESD, a Q_p e o t_p , com base na hierarquização das áreas de captação da BHAC, indica uma tendência de aumento na influência conforme se avança na hierarquia. Dito de outro modo, o condicionamento hidrológico exercido pela cobertura da terra na BHAC mostra-se mais expressivo nas áreas de captação cujo escoamento abastece diretamente segmentos de maiores ordens na hierarquia fluvial. Diante disso, duas considerações tornam-se oportunas. A primeira diz respeito ao fato dos aspectos climáticos, geomorfológicos, pedológicos e de cobertura vegetal serem os principais fatores condicionantes da geração de escoamento superficial em bacias hidrográficas (CRUZ; TUCCI, 2008; COLLISCHONN; DORNELLES, 2015). A segunda consiste em reconhecer que a precipitação e a cobertura da terra correspondem a variáveis de entrada com valores constantes nas comparações realizadas no presente estudo entre os diferentes níveis da hierarquia fluvial da BHAC. Assim, a explicação para os resultados encontrados provavelmente reside em especificidades geomorfológicas, principalmente a declividade, e pedológicas das áreas de captação de cada nível hierárquico analisado.

Devido à escassez de publicações especificamente voltadas para a análise do escoamento superficial em função do ordenamento das áreas de captação, tal como concebido no presente trabalho, estudos suplementares são recomendáveis, tanto com vistas à análise de maior número e diversidade de eventos de chuva simulados para a BHAC, quanto no sentido de verificar a ocorrência de respostas hidrológicas semelhantes em outras bacias hidrográficas. No caso da BHAC, cabe retomar o já mencionado fato das áreas mais declivosas não estarem nas porções mais altas, correspondentes às cabeceiras, e sim concentradas em porções mais baixas, muitas vezes em áreas cujo escoamento abastece diretamente segmentos de quarta e quinta ordem. Essa relação entre a declividade e a hierarquia das áreas de captação pode vir a assumir importância na determinação dos resultados alcançados no presente estudo, e, por isso, merece aprofundamento. Entretanto, os resultados já disponíveis permitem, per se, refletir sobre a sua consideração em estratégias voltadas para a conservação hidrológica.

Indiscutivelmente, a conservação dos recursos hídricos requer a atenção ao fato de que as bacias hidrográficas não são homogêneas (TAMBOSI *et al.*, 2015), devendo o seu zoneamento ser realizado de forma criteriosa (CARVALHO, 2014). Nesse sentido, diversos elementos têm sido apresentados como aspectos relacionados à heterogeneidade hidroambiental de bacias hidrográficas, tais como áreas de nascentes, encostas íngremes, matas ciliares, banhados e várzeas, planícies de inundação (RIBEIRO *et al.*, 2018). Sem dúvida, o arranjo espacial assumido por esses elementos tende a ser peculiar em cada bacia hidrográfica, principalmente devido às suas características de clima, relevo e solo. Justamente por isso, é possível reconhecer que esses elementos são, de forma geral, associáveis também à hierarquização da drenagem. As nascentes, por exemplo, restringem-se aos segmentos de primeira ordem; as encostas íngremes tendem a se concentrarem próximas aos segmentos de primeira e segunda ordem (diferentemente do que ocorre na BHAC); as planícies de inundação, por sua vez, são mais comuns nas cercanias de segmentos de maiores ordens de drenagem, ocorrendo normalmente às margens dos trechos mais rebaixados e aplainados do curso principal (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Nesse contexto, cabe reconhecer que as zonas de cabeceiras são normalmente descritas como prioritárias em estratégias de conservação de bacias hidrográficas. Fortes argumentos nesse sentido relacionam-se ao fato dessas zonas guardarem a maioria das nascentes, que são afloramentos naturais do lençol freático, cuja dinâmica depende de uma frágil cadeia de fatores climáticos, geomorfológicos, pedológicos e de cobertura da terra (PINTO *et al.*, 2004). Assim, a priorização das zonas de cabeceiras corresponde a uma justificável maior atenção às áreas de captação de primeira e segunda ordem, principalmente no sentido de garantir a manutenção do fluxo hídrico das nascentes, levando em conta aspectos quantitativos e qualitativos (METEDIERI *et al.*, 2018).

Entretanto, dependendo dos objetivos pretendidos, determinadas estratégias de conservação podem, também justificavelmente, vir a priorizar áreas de captação em maiores níveis de ordenamento. No caso da BHAC, os resultados do presente estudo sugerem que as áreas de quinta ordem, concebidas como aquelas cujo escoamento abastece diretamente segmentos de quinta ordem, são as mais eficientes em reduzir o ESD e a Q_p , bem como em

aumentar o t_p , quando cobertas por algum tipo de vegetação, sendo as maiores reduções estimadas para a cobertura de mata. Esse padrão de comportamento é coerente com a recomendação de priorização das áreas de quinta ordem em estratégias que visem, por exemplo, o reflorestamento com vistas ao controle de inundações associadas a eventos de chuva intensa. Nessa mesma linha, é possível vislumbrar a aplicação de resultados desse tipo no contexto de diversos instrumentos de planejamento e gestão ambiental, tais como as Áreas de Preservação Permanente (APPs), especialmente as ripárias (ANDRADE, 2018), as áreas de reserva legal (SILVA; RANIERI, 2014) e o pagamento por serviços ambientais (GJORUP *et al.*, 2016). Esses e outros instrumentos estão fortemente relacionados ao estabelecimento de critérios de conservação e recuperação ambiental, e a hierarquização das áreas de captação pode vir a constituir uma interessante alternativa relativamente aos aspectos hidroambientais.

5 Considerações Finais

O presente estudo simulou, via modelagem, respostas hidrológicas a diferentes cenários de cobertura da terra, considerando a influência da hierarquização das áreas de captação da BHAC.

Com relação aos tipos de cobertura da terra considerados, e assumindo o solo exposto como cenário de referência, verificou-se que os demais cenários estão associados à atenuação das respostas hidrológicas simuladas para a BHAC, sendo que a magnitude de atenuação foi significativamente diferente em cada cenário, resultando na sequência mata > campo > área cultivada. A referida atenuação das respostas hidrológicas consiste na redução do ESD e da Q_p , assim como no aumento do t_p . Esses resultados reforçam a importância da vegetação florestal no controle da dinâmica hidrológica em bacias hidrográficas. Especificamente na análise dos cenários de cobertura total, que incluiu o cenário de cobertura atual, o resultado das simulações o inseriu em posições intermediárias, entre os cenários de mata e campo ou campo e área cultivada, dependendo do evento de chuva considerado. Em todos os casos, fica evidente o afastamento atual da BHAC relativamente às suas condições hidrológicas naturais, caracterizadas pela ampla predominância de cobertura florestal.

No que se refere à análise dos cenários feita com base na hierarquização das áreas de captação, os resultados das simulações dos cenários de mata, campo e área cultivada apontam, conforme se avança no ordenamento, para uma tendência de aumento do impacto atenuante das respostas hidrológicas relativamente ao cenário de solo exposto. Os maiores impactos foram estimados para o cenário de mata nas áreas de captação cujo escoamento abastece diretamente segmentos de quinta ordem.

Quanto aos três eventos de chuva utilizados durante a modelagem, considerados representativos de precipitações com padrão atrasado (evento 1), intermediário (evento 2) e adiantado (evento 3), as diferenças entre os mesmos foram suficientes para determinar aumento da razão de escoamento (ESD/P_{total}) ao longo da série de eventos de chuva, com os menores valores para o evento 1 (padrão atrasado), seguido do evento 2 (padrão intermediário), e os maiores valores para o evento 3 (padrão adiantado).

Relativamente à possibilidade de aplicação prática dos resultados obtidos, pode-se sustentar que diferentes objetivos de conservação hidrológica podem determinar medidas que levem à priorização de áreas de captação em níveis específicos de ordenamento. No caso da BHAC, os resultados do presente estudo revelam um maior impacto atenuante das respostas hidrológicas associado às áreas cujo escoamento abastece diretamente segmentos de quinta ordem, e esse padrão de comportamento é coerente com a recomendação de priorização dessas áreas em estratégias que visem, por exemplo, o reflorestamento com vistas ao controle de inundações associadas a eventos de chuva intensa.

Estudos suplementares sobre a análise do escoamento superficial em função da hierarquização das áreas de captação são recomendáveis, tanto com vistas à análise de maior número e diversidade de eventos de chuva simulados para a BHAC, quanto no sentido de verificar a ocorrência de respostas hidrológicas semelhante em outras bacias hidrográficas.

Referências

ALMEIDA, N. V.; CUNHA, S. B. da; NASCIMENTO, F. R. A Cobertura Vegetal e sua Importância na Análise Morfodinâmica da Bacia Hidrográfica do Rio Taperoá – Nordeste do Brasil/Paraíba. **Geonorte**, Edição especial, v. 3, n. 4, p. 365-378, 2012.

ALVARENGA, Livia Alves. **Impactos Hidrológicos Decorrentes de Diferentes Cenários de Cobertura do Solo e Mudanças Climáticas em Uma Bacia Hidrográfica da Serra da Mantiqueira, Utilizando o Modelo DHSVM**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, 2015, 170p.

ANDRADE, Daniel Campanelli de. **Metodologia para Dimensionamento de Área de Preservação Permanente Ripária**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, 2018, 106p.

BEHLING, H.; JESKE-PIERUSCHKA, V.; SCHÜLER, L.; PILLAR, V. P. Dinâmica dos Campos no Sul do Brasil Durante o Quaternário Tardio. *In*: PILLAR, V. P; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. S.; JACQUES, A. V. A. (Orgs.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009, p. 13-25.

BORETTI, A.; ROSA, L. Reassessing the projections of the World Water Development Report. **npj Clean Water**, v. 2, n. 15, 2019.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRUIJNZEEL, L. A. (De)Forestation and Dry Season Flow in the Tropics: a closer look. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 1, n. 3, p. 229-243, 1989.

CALDEIRA, T. L. *et al.* Modelagem Hidrológica Determinística Chuva-Vazão em Bacias Hidrográficas: uma abordagem introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 5, n. 1, p. 22-32, 2018.

CAO, Z.; WANG, S.; LUO, P.; XIE, D.; ZHU, W. Watershed Ecohydrological Processes in a Changing Environment: opportunities and challenges. **Water**, v. 14, n. 1502, 2022.

CARVALHO, Rodrigo Guimarães de. As Bacias Hidrográficas Enquanto Unidades de Planejamento e Zoneamento Ambiental no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, n.36, Volume Especial, p. 26-43, 2014.

CECH, Thomas V. **Principles of Water Resources**: history, development, management, and policy. 4ª ed. New York: John Wiley & Sons, 2018, 528p.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. A Análise da Densidade de Drenagem e suas Implicações Geomorfológicas. **Geografia**, v. 4, n. 8, p. 23-42, 1979.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. Análise Morfométrica de Bacias Hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. A Variabilidade Espacial e Temporal da Densidade de Drenagem. **Notícia Geomorfológica**, v. 21 n. 42, p. 3-22, 1981.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Geomorfologia**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980, 188p.

CHU, H. J. *et al.* Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 24, n. 18, p. 2538-2554, 2010.

COBLE, A. A.; WYMORE, A. S.; POTTER, J. D.; MCDOWELL, W. H. Land Use Overrides Stream Order and Season in Driving Dissolved Organic Matter Dynamics Throughout the Year in a River Network. **Environmental Science & Technology**, v. 56, n. 3, p. 2009-2020, 2022.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2ª ed. Porto Alegre: ABRH, 2015, 336p.

CORDEIRO, J. L. P.; HASENACK, H. Cobertura Vegetal Atual do Rio Grande do Sul. *In*: PILLAR, V. P.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. S.; JACQUES, A. V. A. (Orgs.). **Campos Sulinos**: conservação e uso sustentável da biodiversidade. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009, p. 285-299.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 111-124, 2008.

CUDWORTH, A. G. Jr. **Flood Hydrology Manual**: a water resources technical publication. Denver: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1989, 243p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos Solos do Município de Morro Redondo**. Pelotas: EMPRAPA-CPACT; UFPel, (Documentos, 23/96), 1996. 28p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeiras**. Pelotas: EMPRAPA-CPACT; UFPel, (Documentos, 55/06), 2006. 43p.

DE ROO, A. P. J.; JETTEN, V. G. Calibrating and Validating the LISEM Model for Two Data Sets from the Netherlands and South Africa. **Catena**, v. 37, n. 3-4, p. 477-493, 1999.

DE ROO, A. P. J.; WESSELING, C. G.; RITSEMA, C. J. LISEM: a Single-event Physically Based Hydrological and Soil Erosion Model for Drainage Basins. I: theory, input and output. **Hydrological Processes**, v. 10, n. 8, p. 1107-1117, 1996.

DORNELES, Viviane Rodrigues. **Aplicabilidade de Curvas-Chave para Modelagem de Produção de Sedimentos a Partir da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)**. Tese. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020, 175p.

DUNN, W. C.; MILNE, B. T.; MANTILLA, R.; GUPTA, V. K. Scaling Relations Between Riparian Vegetation and Stream Order in the Whitewater River Network, Kansas, USA. **Landscape Ecology**. v. 26, n. 7, p. 983-997, 2011.

EKNESS, P.; RANDHIR, T. Effects of Riparian Areas, Stream Order, and Land Use Disturbance on Watershed-Scale Habitat Potential: an ecohydrologic approach to policy. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 6, p. 1468-1482, 2007.

EMBRAPA. **Estação Agroclimatológica de Pelotas**, Convênio Embrapa/UFPel, 2022. Disponível em <<http://agromet.cpact.embrapa.br/estacao/normais.html>>. Acesso em 7 de novembro de 2022.

EMBRAPA. **Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979, 83p.

FALKENMARK, M. *et al.* **Water, a Reflection of Land Use**: options for counteracting land and water mismanagement. Stockholm: Swedish Natural Science Research Council, 1999. 128p.

FONTOURA, Jéssica Ribeiro. **Padrões de Distribuição Temporal das Precipitações Intensas no Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2019. 242p.

GAROFOLLO, L.; RODRIGUEZ, D. A. Impacto Observado das Mudanças no Uso e Cobertura da Terra na Hidrologia de Bacias com Ênfase em Regiões Tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, 2022.

- GAYATHRI, K. Devia; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, 2015.
- GJORUP, A. F.; FIDALGO, E. C. C.; PRADO, R. B.; SCHULER, A. E. Análise de Procedimentos para Seleção de Áreas Prioritárias em Programas de Pagamento por Serviços Ambientais Hídricos. **Ambiente e Água**, v. 11, n. 1, p. 225-238, 2016.
- HARMEL, R. D., SMITH P. K. Consideration of Measurement Uncertainty in the Evaluation of Goodness-of-fit in Hydrologic and Water Quality Modeling. **Journal of Hydrology**, v.337, n. 3-4, p. 326-336, 2007.
- HEWLETT, J. D.; HIBBERT, A. R. Factors Affecting the Response of Small Watersheds to Precipitation in Humid Areas. *In*: SOPPER, W. E.; LULL, H. W. (Eds.). **Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology**. New York: Pergamon, Pennsylvania State University, 1967, p. 275-290.
- HORTON, R. E. The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 14, p. 446-460, 1933.
- HORTON, R. E. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.
- HUANG, S.; BUDD, W. W.; CHAN, S.; LIN, Y. Stream Order, Hierarchy, and Energy Convergence of Land Use. **Ecological Modelling**, v. 205, n. 1-2, p. 255-264, 2007.
- HÜMANN, M. *et al.* Identification of Runoff Processes - the impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. **Journal of Hydrology**, v. 409, n. 3-4, p. 637-649, 2011.
- JETTEN, V. **LISEM user manual, version 3.9x**. Utrecht: Utrecht University, 2017. 64 p.
- JETTEN, V. **LISEM user manual, version 4.96x**. Utrecht: Utrecht University, 2018. 255p.
- KELLY-QUINN, M.; BRUEN, M.; CARLSSON, J.; GURNELL, A.; JARVIE, H.; PIGGOTT, J. Managing the small stream network for improved water quality, biodiversity and ecosystem services protection (SSNet). **Research Ideas and Outcomes**, 5: e33400, 2019.
- KOUMROUYAN, Adriana. **Desenvolvimento de Cenários de Cobertura da Terra em uma Bacia de Mesoescala no Bioma Mata Atlântica e Análise de Respostas Hidrológicas Simuladas pelo Modelo DHSVM**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015, 144p.

- KRAUSE, P., BOYLE, D. P. BÄSE, F. Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, p. 89-97, 2005.
- KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul Segundo a Classificação Climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.
- LI, L.; GOU, M.; WANG, N.; MA, W.; XIAO, W.; LIU, C.; LA, L. Landscape Configuration Mediates Hydrology and Nonpoint Source Pollution Under Climate Change and Agricultural Expansion. **Ecological Indicators**, v. 129, 2021.
- LIMA, W. de P.; FERRAZ, S. F. de B.; FERRAZ, K. M. P. M. Interações Bióticas e Abióticas na Paisagem: uma perspectiva eco-hidrológica. *In*: CALIJURI, M. do C.; CUNHA, D. G. F. (Orgs.) **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 215-44.
- LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de Matas Ciliares. *In*: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. (Orgs.). **Matas Ciliares: conservação e recuperação**. São Paulo: Universidade de São Paulo, FAPESP, 2004, p. 33-44.
- MARSTON, R. A. Geomorphology and Vegetation on Hillslopes: interactions, dependencies and feedback loops. **Geomorphology**, v. 116, n. 3-4, p. 206-217, 2010.
- METEDIERI, J. F.; LEAL, M. S.; TONELLO, K. C. A Floresta e a Dinâmica Hidrológica de Nascentes. *In*: SCHIEBELBEIN, Luis Miguel (Org.). **Gestão de Recursos Hídricos e Sustentabilidade**. Ponta Grossa: Atena, 2018, p. 1-16.
- MOURIER, B.; WALTER, C.; MEROT, P. Soil Distribution in Valleys According to Stream Order. **Catena**, v. 72, n. 3, p. 395-404, 2008.
- MILLER, Scott N. **Scale Effects of Geometric Complexity, Misclassification Error and Land Cover Change in Distributed Hydrologic Modeling**. Thesis (Doctorate in Philosophy) – Major in Watershed Management, The university of Arizona, 2002, 172p.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n.3, p. 885-900, 2007.
- NAIMAN, R. J.; BILBY, R. E.; BISSON, P. A. Riparian Ecology and Management in the Pacific Coastal Rain Forest. **BioScience**, v. 50, n.11, p. 996-1011, 2000.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NUNES, Gabriela Schiavon. **Aplicabilidade de Modelos de Hidrograma Unitário em Bacias Hidrográficas Hidrologicamente Distintas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2015, 190p.

OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. S. Land-Use Change Impacts on the Hydrology of the Upper Grande River Basin, Brazil. **CERNE**, v. 24, n. 4, p. 334-343, 2018.

OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. L. N.; NETO, G. K. Escoamento Superficial e Perdas de Solo em Sub-Bacia Florestal, Município de Eldorado do Sul, RS. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 58111-58132, 2020.

PINTO, L. C.; MELLO, C. R. de; NORTON, L. D.; CURI, N. Land-Use Influence on the Soil Hydrology: an approach in upper Grande River basin, Southeast Brazil. **Ciencia e Agrotecnologia**, 43: e015619, 2019.

PINTO, L. V. A.; BOTELHO, S. A.; DAVIDE, A. C.; FERREIRA, E. Estudo das Nascentes da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 197-206, 2004.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A., DA ROCHA, R. P., AMBRIZZI T. Regimes de Precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

RIBEIRO, J. A.; MATOS, T. V. da S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Zoneamento de Áreas de Restrição e Controle Relevantes para a Conservação de Recursos Hídricos: uma proposta metodológica aplicada à bacia hidrográfica do rio Veloso (sub-bacia do rio Paraopeba), Minas Gerais, Brasil. In: SCHIEBELBEIN, Luis Miguel (Org.). **Gestão de Recursos Hídricos e Sustentabilidade**. Ponta Grossa: Atena, 2018, p. 54-65.

RIJTEMA, P. E. An Analysis of Actual Evapotranspiration. **Agricultural Research Reports**, v. 659, p. 1-107, 1965.

ROVANI, F. F. M.; CASSOL, R. Áreas de Preservação Permanente e Conflitos Ambientais no Município de Barão de Cotegipe (RS): uma análise com auxílio das geotecnologias. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 32, n. 2, p. 51-70, 2012.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, SiBCS**. 5. ed., Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SILVA, J. A. A. *et al.* **O Código Florestal e a Ciência**: contribuições para o diálogo. 2ª ed. São Paulo: Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, SBPC; Academia Brasileira de Ciências, ABC, 2012. 294p.

SILVA, J. S. da; RANIERI, V. E. L. O Mecanismo de Compensação de Reserva Legal e suas Implicações Econômicas e Ambientais. **Ambiente & Sociedade**, vol. XVII, n. 1, p. 115-132, 2014.

STEINMETZ, Aline Alonzo. **Estimativa de Cheias Aplicando a Técnica de Hidrograma Unitário com Diferentes Abordagens de Discretização Espacial em uma Sub-Bacia do Arroio Pelotas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2017, 109p.

STRAHLER, A. N. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957.

SWEENEY, B. W.; NEWBOLD, J. D. Streamside Forest Buffer width Needed to Protect Stream Water Quality, Habitat, and Organisms: a literature review. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 50, n. 3, p. 560-584, 2014.

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

THANAPAKPAWIN, P. *et al.* Effects of Landuse Change on the Hydrologic Regime of the Mae Chaem River Basin. NW Thailand. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 334, n. 1, p. 215-230, 2007.

TROCH, P. A.; CARRILLO, G. A.; HEIDBÜCHEL, I; RAJAGOPAL, S.; SWITANEK, M.; VOLKMANN, T. H. M.; YAEGER, M. Dealing with landscape heterogeneity in watershed hydrology: a review of recent progress toward new hydrological theory. **Geography Compass**, v. 3, n. 1, p. 375-392, 2009.

TUCCI, Carlos. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678p.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Recursos Hídricos no Século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011, 328p.

VARGAS *et al.* Capability of LISEM to Estimate Flood Hydrographs in a Watershed with Predominance of Long-duration Rainfall Events. **Natural Hazards**, v. 109, n.1, p. 593-614, 2021.

WALTER, M. T. *et al.* Hydrologically Sensitive Areas: variable source area hydrology implications for water quality risk assessment. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 55, n. 3, p. 277-84, 2000.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 4, n. 5, p. 1077-1089, 2005.