

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL

Nathalia Jastrombek Vieira

**Impacto nas componentes hidrológicas a partir das projeções futuras de uso
do solo na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí (SC):**

Aplicação do modelo SWAT+

Florianópolis

2021

Nathalia Jastrombek Vieira

**Impacto nas componentes hidrológicas a partir das projeções futuras de uso
do solo na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí (SC):**

Aplicação do modelo SWAT+

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. João Henrique Macedo Sá

Florianópolis

2021

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

Vieira, Nathalia Jastrombek

Impacto nas componentes hidrológicas a partir das
projeções futuras de uso do solo na Região Hidrográfica do
Vale do Itajaí (SC) : Aplicação do modelo SWAT+ / Nathalia
Jastrombek Vieira ; orientador, João Henrique Macedo Sá,
2021.

68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Modelagem
hidrológica. 3. Uso e ocupação do solo. 4. SWAT+. I. Macedo
Sá, João Henrique. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.
III. Título.

Nathalia Jastrombek Vieira

**Impacto nas componentes hidrológicas a partir das projeções futuras de uso do solo na
Região Hidrográfica do Vale do Itajaí (SC): Aplicação do modelo SWAT+**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 12 de maio de 2021.

Prof. Maria Elisa Magri, Dra.
Coordenadora do Curso

Prof. João Henrique Macedo Sá, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Patrícia Kazue Uda, Dra
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Alondra B. Alvarez Perez, Msc
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, especialmente a minha mãe Romelia e ao meu irmão Vitor, por me incentivarem e apoiarem em todos os momentos dessa jornada.

À Universidade Federal de Santa Catarina, que para além da educação gratuita e de qualidade, proporcionou aprendizados, experiências e encontros que permanecerão para além da graduação. À família Wojcikiewicz, Cassia, Fernanda, Isadora, Muriel, Marisa e Manuela, obrigada por tornarem meus dias mais felizes e leves!

Ao David, que além do companheirismo na vida, contribuiu com discussões essenciais ao desenvolvimento deste trabalho e me lembrou a respirar fundo.

Por fim, aos professores Pedro, Alexandra, Maria Elisa e Rodrigo, que me inspiraram e motivaram. Ao meu orientador, professor João Henrique.

Muito obrigado!

RESUMO

As mudanças do uso e ocupação do solo de uma bacia hidrográfica alteram suas propriedades de transporte, causando alterações importantes nos processos hidrológicos, que já se encontram num cenário de mudança devido ao câmbio climático. O entendimento da resposta das componentes hidrológicas a este tipo de mudanças no solo visa orientar as políticas públicas de ordenamento territorial para uma gestão responsável do solo, que impacta diretamente na gestão da água. Neste trabalho se analisou, através de modelamento hidrológico, o impacto das alterações de uso e ocupação do solo na infiltração, escoamento superficial e evapotranspiração na região hidrográfica do Vale de Itajaí. Foi utilizado o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT+) com dados de relevo, pedologia, uso e ocupação do solo e dados hidrometeorológicos da área de estudo. Para demonstrar que o modelo é aplicável na região hidrográfica, foi utilizado o método *Split-Sample Test* para calibrar e validar o simulador. Foram utilizados dados de uso e ocupação do solo de 1985 a 2019, para identificar tendências de mudança no ordenamento territorial e assim formular distintos cenários futuros para modelagem hidrológica até o ano 2030. Em termos gerais, os cenários apresentaram um aumento nas áreas ocupadas pela infraestrutura urbana, florestas plantadas e um aumento muito pronunciado na soja. A simulação numérica da evolução das componentes hidrológicas permitiu projetar um aumento expressivo na evapotranspiração, assim como uma diminuição significativa no escoamento superficial e uma redução leve na infiltração na bacia. Estes resultados são consistentes com o aumento na interceptação causado pelos cultivos soja e florestas com fins comerciais e uma diminuição na permeabilidade do solo pelo aumento da infraestrutura urbana.

Palavras-chave: Uso e ocupação do solo. Modelagem hidrológica. SWAT+.

ABSTRACT

Land use changes in a hydrographical basin modify its transport properties leading to important changes in its hydrological processes, in addition to the ongoing disturbances caused by climate change. A more detailed understanding of the response in the hydrological components to these soil changes is required to drive the land use policies that directly impact the water management. In this work, hydrological modelling is used to forecast changes in the infiltration, surface flow and evapotranspiration due to relevant changes in the land use on the hydrographical basin of the Itajaí Valley. To this end, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT+) is feeded with the land use distribution of the region, in addition to topographical and hydrometeorological data. Calibration and validation are performed by the Split-Sample Test method. Land use data from 1985 to 2019 is used to identify relevant trends in the land use to generate realistic future scenarios for 2030. In general, future scenarios exhibit an increase in urban infrastructure, planted forest and a steep increase in soybean plantations. Numerical simulations of the evolution of the hydrological components forecast a significant increase in evapotranspiration and reduction in the surface flow, in addition to a slight reduction on the infiltration for the full basin. These results are consistent with the increase in interception due to industrial agriculture and a permeability reduction due to an increase in urban infrastructure.

Keywords: Land use. Hydrological modelling. SWAT+

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Região Hidrográfica do Vale do Itajaí (SC)	25
Figura 2 - Fases de relevo presentes na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí	28
Figura 3 - Classificação textural encontrada na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí	31
Figura 4 - Uso e cobertura do solo presentes na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí	32
Figura 5 - Estações pluviométricas e climáticas presentes na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí	37
Figura 6 - Precipitação total anual e média global para a Região Hidrográfica do Vale do Itajaí, para o período de 1979 a 2013	43
Figura 7 - Precipitação mensal, vazão simulada e vazão observada para o período de calibração (1983 a 1998) e para o período de validação (1999 a 2013)	44
Figura 8 - Gráfico das tendências de mudança dos usos do solo	45
Figura 9 - Extrapolação da curva de crescimento para Floresta plantada	46
Figura 10 - Extrapolação da curva de crescimento para Infraestrutura urbana	46
Figura 11 - Extrapolação da curva de crescimento para a Soja	47
Figura 12 - Espacialização para os distintos cenários de simulação	49
Figura 13 - Detalhamento da espacialização para os distintos cenários de simulação, com destaque para uma região que apresenta crescimento dos usos de Soja, Infraestrutura urbana e Floresta plantada.	50
Figura 14 - Flutuações das componentes hidrológicas do Cenário Realista em relação ao Cenário Referência	52
Figura 15 - Flutuação dos valores simulados para o Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para a componente precipitação	54
Figura 16 - Flutuação dos valores simulados para o Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para a componente evapotranspiração	55
Figura 17 - Diferença percentual dos cenários Otimista e Pessimista em relação ao Cenário Realista para a componente evapotranspiração	56
Figura 18 - Flutuação dos valores simulados para o Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para a componente infiltração	58
Figura 19 - Diferença percentual dos cenários Otimista e Pessimista em relação ao Cenário Realista para componente infiltração	59

Figura 20 - Flutuação dos valores simulados para o Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para a componente escoamento superficial	60
Figura 21 - Diferença percentual dos cenários Otimista e Pessimista em relação ao Cenário Realista para componente escoamento superficial	61
Figura 22 - Flutuação dos valores simulados para o Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para vazão, do canal em estudo.....	62
Figura 23 - Diferença percentual dos cenários Otimista e Pessimista em relação ao Cenário Realista para vazão, do canal em estudo	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fases de relevo da Região Hidrográfica do Vale do Itajai.....	27
Tabela 2 - Reclassificação dos tipos de solo na Região Hidrográfica do Vale do Itajai	30
Tabela 3 - Classificação dos usos do solo na Região Hidrográfica do Vale do Itajai para uso no SWAT+	33
Tabela 4 - Parâmetros selecionados para calibração do modelo, sua unidade e o intervalo de valores possíveis	38
Tabela 5 - Métricas recomendadas para avaliação de desempenho do modelo para passo de tempo mensal	40
Tabela 6 - Cenários de simulação formulados a partir da da extrapolação das curvas de Floresta plantada, Infraestrutura urbana e Soja	47
Tabela 7 - Cenários de simulação atualizados.....	48
Tabela 8 - Balanço hídrico para os distintos cenários de simulação	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	Revisão bibliográfica	15
2.1	Ciclo Hidrológico.....	15
2.1.1	Precipitação	15
2.1.2	Evapotranspiração	16
2.1.3	Infiltração	17
2.1.4	Escoamento superficial	18
2.2	Modelagem hidrológica.....	19
2.2.1	SWAT+	20
2.3	Influências nos processos hidrológicos.....	22
3	Metodologia	24
3.1	Área de estudo	24
3.2	SWAT+.....	25
3.3	Dados de entrada	27
3.3.1	DECLIVIDADE.....	27
3.3.2	Tipo de solo.....	29
3.3.3	Uso e cobertura do solo.....	31
3.3.4	Dados hidrometeorológicos	35
3.3.4.1	PORTAL HIDROWEB (ANA)	35
3.3.4.2	GLOBAL WEATHER DATA FOR SWAT	35
3.4	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	37
3.5	DETERMINAÇÃO DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO A PARTIR DAS TENDÊNCIAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	40
3.5.1	Algoritmo de mudança de uso do solo.....	41
4	Resultados	42

4.1	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	42
4.2	TENDÊNCIA DE USO DO SOLO	44
4.3	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NAS COMPONENTES HIDROLÓGICAS	51
4.3.1	Precipitação.....	54
4.3.2	Evapotranspiração.....	55
4.3.3	Infiltração.....	57
4.3.4	Escoamento superficial.....	60
5	Conclusões e recomendações	64
5.1.1	Recomendações.....	65
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A ocupação e uso do solo em bacias hidrográficas é uma consequência direta das políticas de planejamento urbano ou proteção ambiental vigentes em cada sub-bacia. As alterações no uso do solo trazem mudanças importantes nas propriedades de transporte da água, que, junto com a mudança climática, tem consequências importantes nas componentes hidrológicas futuras da bacia (WANG *et al*, 2019).

As políticas de ocupação adotadas no presente ajudam a moldar os cenários futuros do comportamento do ciclo hidrológico, afetando suas componentes, como escoamento superficial e recarga de aquíferos, por exemplo (DAVIE, 2008). A compreensão quantitativa dos efeitos destas mudanças deveria nortear a tomada de decisão quanto ao ordenamento territorial, em conjunto com mecanismos mais eficientes de gerenciamento do uso do solo, voltado para o desenvolvimento urbano em bases sustentáveis (CARNEIRO; CARDOSO; AZEVEDO, 2008).

Uma ferramenta comum na quantificação dos efeitos causados pela mudança do uso do solo é a modelagem hidrológica (IVEZIC; BEKIC; ZUGAJ, 2017). Ela pode ser entendida como a representação matemática dos fluxos de água em um sistema. Geralmente possui como objeto de estudo a bacia hidrográfica, que é considerada a unidade territorial preferencial para o planejamento e a gestão ambiental, uma vez que pode ser subdividida em sub-bacias com características ambientais homogêneas (BARBOSA *et al*, 2018).

Os fenômenos hidrológicos estão intimamente ligados às condições climáticas e mudanças no clima resultam em impactos no ciclo hidrológico, como aumento de eventos extremos e mudanças no padrão espacial e temporal (MARENGO, 2008). Segundo Wang *et al.* (2019), mudanças climáticas causam variações espaço-temporais nas precipitações regionais e também mudanças na temperatura.

Comparadas às mudanças climáticas, as alterações no uso e ocupação do solo são mais controláveis e, portanto, alvo de estudos que visam guiar as políticas de ordenamento territorial. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar os impactos causados pelas alterações no uso e ocupação do solo e sua interferência nos processos hidrológicos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar como as tendências atuais de uso e ocupação do solo podem afetar as componentes hidrológicas na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Demonstrar que o modelo matemático SWAT+ pode ser utilizado para a Região Hidrográfica do Vale do Itajaí;
- Construir cenários de uso e ocupação do solo futuros com base nas tendências atuais na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí; e
- Identificar o comportamento das componentes hidrológicas frente às projeções de mudança no uso e ocupação do solo para Região Hidrográfica do Vale do Itajaí.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

A hidrologia moderna se concentra na distribuição de água doce na superfície da Terra, seu movimento sobre e abaixo a superfície e através da atmosfera (DAVIE, 2008). O estudo do ciclo hidrológico é o foco central da hidrologia (CHOW, MAIDMENT, MAYS, 1987).

Os processos do ciclo são iniciados com a energia solar, fornecendo calor necessário para que aconteça a evaporação, transpiração e sublimação. Assim, a água incorpora a atmosfera. O vapor d'água originado desses processos condensa e ocorre a precipitação como chuva ou neve. A água precipitada pode ser interceptada pela vegetação, evaporar, fluir sob a superfície como escoamento superficial até chegar ao curso d'água, infiltrar no solo e ainda fluir na subsuperfície. A água interceptada ou do escoamento superficial retorna a atmosfera por meio da evapotranspiração, que consiste na soma da evaporação e transpiração. A água infiltrada pode percolar até fazer a recarga do aquífero subterrâneo, que depois emerge e forma o escoamento superficial, fluindo para o mar ou evaporando para a atmosfera, dando continuidade ao ciclo. (DAVIE, 2008; CHOW, MAIDMENT, MAYS, 1987; HUNTINGTON, 2010)

2.1.1 Precipitação

Principal componente de entrada no balanço hídrico da fase terrestre do ciclo hidrológico, a precipitação possui um papel importante na avaliação de quantidade e qualidade da água (DAVIE, 2008). A quantidade e o tipo de precipitação afeta o desenvolvimento do solo, crescimento da vegetação e geração de escoamento superficial que, por sua vez, transporta sedimentos, nutrientes e poluentes (EASTON, BOCK, 2015).

Nem toda a água precipitada se torna escoamento superficial ou volume infiltrado no solo. Uma porção significativa é interceptada por superfícies

impermeáveis onde fica armazenada para uma potencial mudança de estado líquido a gasoso.

A precipitação possui grande variabilidade espacial e temporal. Pequenos erros em sua medição podem ocasionar grandes erros a nível de bacia hidrográfica. Ainda assim, a precipitação é uma das componentes hidrológicas aferidas com maior regularidade, com bons registros disponíveis em várias regiões do mundo (DAVIE, 2008; CHOW, MAIDMENT, MAYS, 1987).

2.1.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) é a combinação da evaporação e da transpiração das plantas. A evaporação é o processo de transferência de água em estado líquido para o estado gasoso, a partir de qualquer superfície, seja ela corpos d'água, solo ou vegetação. Já a transpiração ocorre através das folhas da vegetação, que extrai água do solo com suas raízes, a conduz até as extremidades através dos xilemas e, por fim, a difunde na atmosfera por meio de pequenas estruturas chamadas estômatos (DAVIE, 2008; CHOW, MAIDMENT, MAYS, 1987).

Onde há vegetação, a evapotranspiração será a combinação de evaporação a partir do solo, transpiração e evaporação a partir das folhas da vegetação. A importância relativa destes três componentes depende do grau de cobertura por vegetação e do clima local (DAVIE, 2008).

Os métodos diretos e indiretos de obtenção dos valores de evapotranspiração possuem significativa incerteza quando utilizados para longo períodos de tempo e em escala de bacia hidrográfica. Os esforços da pesquisa nessa área estão em produzir modelos que estimam a evapotranspiração, a partir das variáveis climatológicas que influenciam a evapotranspiração. A maioria dos modelos se preocupam em estimar a evapotranspiração potencial sob a superfície terrestre (DAVIE, 2008). Um desses casos é a equação de Penman, que mede a taxa potencial de evaporação de massa de água por unidade de área e tempo, dada por

$$PE = \frac{Q^* \Delta + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta_e}{r_a}}{\lambda(\Delta + \gamma)}$$

onde Q^* é a radiação líquida (W/m^2), Δ é a taxa de crescimento da saturação de pressão de vapor com a temperatura ($kPa/^\circ C$), ρ é a densidade do ar (kg/m^3), c_p é o calor específico do ar a uma pressão constante ($\sim 1,005 J/kg$), δ_e é o déficit da pressão de vapor do ar (kPa), λ é o calor latente de vapor da água (J/kg), γ é a constante psicrométrica ($\sim 0,063 kPa/^\circ C$) e r_a é a resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água (s/m). Posteriormente, a equação foi modificada por Monteith para determinar a evaporação real a partir de uma superfície vegetada, a partir da adição da resistência do dossel (r_c), que representa a habilidade da vegetação do dossel controlar a transpiração, resultando na Equação de Penman-Monteith dada por

$$E_t = \frac{Q^* \Delta + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta_e}{r_a}}{\lambda(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right))}$$

que pode ser utilizada para estimar a taxa de evaporação de volume de água por unidade de área e tempo.

2.1.3 Infiltração

A precipitação que atinge o solo fica suscetível ao processo de infiltração, que consiste na entrada da água no solo sob ação da gravidade e forças capilares. A quantidade e a taxa de infiltração dependem de características locais como saturação de água, textura do solo, densidade aparente, carbono orgânico, permeabilidade, porosidade, entre outros (EASTON, BOCK, 2015).

Pela sua dependência com as características do solo, a componente infiltração possui grande variabilidade espacial, tornando-a um processo complexo que pode ser descrito de forma aproximada com equações matemáticas. O método de Green-Ampt possui uma descrição física simplificada da infiltração, dividindo o

domínio em zona saturada e zona não saturada (CHOW, MAIDMENT, MAYS, 1987). De acordo com Ivezic, Bekic e Zugaj (2017) o modelo de infiltração passou por várias modificações e, devido a sua simplicidade, é utilizado frequentemente. A taxa de infiltração mede o volume infiltrado por unidade de área e tempo e pode ser descrita por

$$i = K_s \left(\frac{Z_f + H_0 + S_f}{Z_f} \right)$$

onde K_s é a condutividade hidráulica (cm/min), Z_f é a profundidade da frente de avanço (cm), S_f é a pressão capilar (cm) e H_0 é a profundidade da lâmina d'água (m).

2.1.4 Escoamento superficial

O escoamento superficial é o produto final da precipitação após esta ter passado por todos os outros processos hidrológicos, sendo o destino final um rio ou canal (DAVIE, 2008). A geração do escoamento superficial é um processo complexo, controlado por diversos fatores, que podem resultar em diferentes tipos de escoamento superficial (EASTON, BOCK, 2015).

Este escoamento pode ocorrer quando a taxa de infiltração do solo é menor que a taxa de precipitação. Normalmente, está associado a eventos de tempestades ou em locais com solo de baixa permeabilidade, ocorrendo frequentemente em áreas urbanas onde superfícies impermeáveis predominam. Pode ocorrer também quando a saturação aumenta e o solo perde a capacidade de armazenamento. Assim, em um solo saturado, toda contribuição na forma de chuva que chega a essas áreas se torna escoamento superficial. Este processo é governado pela topografia e profundidade do solo (EASTON, BOCK, 2015).

Após 20 anos de estudos envolvendo a relação chuva-escoamento superficial para pequenas bacias hidrográficas, o Serviço de Conservação dos Recursos Naturais dos EUA (SCS) formulou uma equação de escoamento superficial que se tornou comumente utilizada a partir dos anos 50 (NEITSCH, S. L. *et al*, 2011; Mishra, Singh, 2003). A equação é dada por

$$Q_{surf} = \frac{(R - I_a)^2}{(R - I_a + S)}$$

onde Q_{surf} é o escoamento superficial acumulado (mm), R é a chuva (mm), S é o parâmetro de retenção (mm) e I_a é a perda inicial (mm), ou seja, que representa todas as perdas nos processos de armazenamento na superfície, interceptação e infiltração.

2.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Um modelo é uma ferramenta que combina quantidades observadas e conhecimentos fundamentais para descrever o comportamento de um sistema através da implementação de métodos científicos (ABDOLLAHI, 2015). É a representação simplificada de um sistema real (Sorooshian *et al*, 2008 *apud* Devia, Ganasri e Dwarakish, 2015).

Modelos hidrológicos são utilizados para prever o comportamento e o entendimento de diversos processos hidrológicos, levando em consideração dados de chuva, área drenada, propriedades do solo, cobertura vegetal, topografia, entre outros (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015). Um modelo hidrológico baseado no balanço hídrico subdivide o volume de água total em componentes relacionadas ao meio em que o transporte ocorre e a fase em que a água se encontra (IVEZIC; BEKIC; ZUGAJ, 2017).

Os modelos baseados no balanço hídrico possuem diferentes níveis de complexidade. A complexidade de um modelo, primariamente, está relacionada ao número de entradas necessárias e a sua aplicabilidade em locais com diferentes áreas. É necessário que haja equilíbrio entre as necessidades e expectativas do usuário com as possibilidades de modelos reduzidos e as restrições práticas quanto a disponibilidade e confiabilidade de medidas de parâmetros geofísicos, como os hidrológicos, hidráulicos, hidrometeorológicos, entre outros (ABDOLLAHI; BAZARGAN; MCKAY, 2019).

De acordo com Ivezic, Bekic, Zugaj (2017) e Abdollahi, Bazargan e McKay (2019), alguns modelos baseados no balanço hídrico são *WetSpa* (Wang et al, 1996),

MIKE SHE (DHI, 2007), *DGHM model* (Alemaw and Chaoka, 2003), *HIDROMORE* (Sanchez, et al, 2009), *DREAM* (Manfreda et al, 2005) e *SWAT* (Arnold et al, 2000).

2.2.1 SWAT+

O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) foi desenvolvido para avaliar os impactos das políticas de uso do solo, manejo do solo e mudanças climáticas nos recursos hídricos em grandes bacias hidrográficas. Ele é um modelo contínuo no tempo, semi-distribuído e possui modelagem baseada no processo (ARNOLD et al., 2012). Também pode ser utilizado para simular a qualidade e quantidade de água superficial e subterrânea, na avaliação para prevenção e controle da erosão do solo, controle das poluições difusas e gestão ambiental a nível de bacia hidrográfica (USDA, 2021).

O SWAT teve sua primeira versão lançada em 1990 e, nos anos seguintes, já haviam publicações descrevendo a interface baseada no Sistema de Informação Geográfica e as componentes chaves do modelo. Na sequência, diversas versões foram lançadas até o ano de 2012, quando foi lançada sua última versão (ARNOLD et al., 2012).

Nos últimos 20 anos, o SWAT se tornou amplamente utilizado no mundo todo e a diversidade de situações em que foi aplicado permitiu a determinação das suas limitações e possíveis melhorias. Diante ao grande número de mudanças e adições às mais diversas componentes individuais do modelo, o código passou por grandes modificações estruturais e organizacionais, resultando em uma re-implementação completa do modelo, chamada SWAT+. Vale ressaltar que o algoritmo base para cálculo dos processos permanece igual ao do SWAT. O SWAT+ também fornece uma representação espacial mais flexível de interações e processos na bacia hidrográfica (USDA, 2021). Esta nova distribuição é um software de domínio público, conjuntamente desenvolvido por *USDA Agricultural Research Service* (USDA-ARS) e *Texas A&M AgriLife Research*, que faz parte do *Texas University System*.

Durante uma simulação, os processos no ciclo hidrológico de uma bacia podem ser divididos em duas fases: fase terrestre, que diz respeito à quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas que podem ser carreados para o curso

d'água de cada sub-bacia, e a fase aquática, que descreve o movimento da água e o que nela contém nos cursos d'água até a foz da bacia. Para todas as situações estudadas com o SWAT+, o balanço hídrico é a força motriz para as equações fundamentais para cálculo dos processos em uma bacia hidrográfica e é dado pela seguinte equação:

$$SW_t = SW_o + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

onde SW_t é a saturação final de água no solo (mm), SW_o é a saturação inicial de água no solo (mm), R_{day} é a precipitação diária (mm), Q_{surf} é o escoamento superficial (mm), E_a é a evapotranspiração (mm), W_{seep} é a percolação (mm) e Q_{gw} é o escoamento lateral (mm).

Para realizar as simulações, o SWAT divide a bacia hidrográfica em sub-bacias e estas, por sua vez, são subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológicas (do inglês *Hydrologic Response Units*, HRU). Uma HRU consiste em uma unidade de área com características homogêneas a partir da sobreposição das informações de topografia, solo e uso do solo (ARNOLD et al., 2012 e NEITSCH, S. L. et al., 2011). A subdivisão da bacia hidrográfica permite que o modelo diferencie a evapotranspiração para distintos tipos de solos e culturas. Ainda, o escoamento superficial é calculado em cada HRU para então obter o escoamento superficial total da bacia hidrográfica. As subdivisões melhoram a acurácia dos cálculos e permitem uma descrição física mais fiel do balanço hídrico (NEITSCH, S. L. et al., 2011).

Em resumo, o SWAT permite simular a evolução temporal das componentes hidrológicas de uma bacia hidrográfica, sempre e quando as suas variáveis de acoplamento internas estejam ajustadas às dinâmicas da área de estudo. O processo de determinação destas variáveis é conhecido como calibração e permite aumentar a eficiência do modelo e reduzir as suas incertezas. A calibração consiste no ajuste do simulador para reproduzir valores observados mediante a otimização dos seus parâmetros livres (KUWAJIMA, J. I. et al., 2011).

O SWAT+ utiliza diferentes arranjos de equações para determinação das componentes. A evapotranspiração pode ser determinada a partir do Método Penman-

Monteith, Método Priestley-Taylor ou Método Hargreaves, a infiltração é determinada pela equação de Green-Ampt e o escoamento superficial pode ser estimado através da Equação SCS-CN ou da equação de Green-Ampt (NEITSCH, S. L. *et al*, 2011).

2.3 INFLUÊNCIAS NOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS

Mudanças climáticas afetam todos os aspectos do ciclo hidrológico através do balanço de energia na Terra. Uma das principais consequências é a intensificação do ciclo que, de acordo com Huntington (2010), é definido como a aceleração ou aumento das taxas de evaporação, evapotranspiração e precipitação.

Em geral há um aumento no conteúdo de vapor de água na atmosfera que conseqüentemente traz um aumento de temperatura, uma vez que o vapor d'água é um gás de efeito estufa (HUNTINGTON, 2010). Dentre os efeitos causados pelo aumento da temperatura do ar encontram-se o deslocamento das temporadas chuvosas ao redor do mundo, assim como a redução de acúmulos de neve e o seu derretimento prematuro (USGS, 2015).

As estações secas mais longas aumentam a ocorrência de incêndios e tempestades mais frequentes dificultam a recarga dos aquíferos. Isto leva a uma redução geral na disponibilidade de água que causa ainda um aumento da pressão da agricultura sobre os ecossistemas que ajudam a regular a temperatura do planeta e um potencial aumento de pragas e doenças (HUNTINGTON, 2010).

Por outro lado, a infraestrutura desenvolvida para gestão de água está atrelada aos processos hidrológicos dominantes numa região dada. A mudança nestes processos tem um impacto económico, pois envolve mudanças estruturais para o acesso à água com um potencial custo ambiental adicional (USGS, 2015).

As modificações no uso e cobertura do solo também impactam o ciclo hidrológico e tem sido uma área de grande interesse para pesquisas hidrológicas nos últimos 50 anos (DAVIE, T, 2008). Dentre as modificações estão o aumento da urbanização, mudança na cobertura vegetal, mudanças de práticas agrícolas, entre outros.

A expansão urbana tem efeitos significativos na hidrologia do rio que drena certa área, causando aumento do escoamento superficial, alterações climáticas que

afetam o ciclo hidrológico localmente e impacto na qualidade das águas urbanas através de poluições pontuais e difusas (DAVIE, T, 2008).

A supressão da vegetação, sobretudo das florestas, afeta diversas funções relacionadas ao ecossistema florestal, tais como mitigação do clima, diminuição do pico do hidrograma, controle de erosão, melhoramento da qualidade das águas, entre outros. Existe o consenso que, em comparação aos outros usos do solo, a floresta possui maior consumo de água e reduz a vazão dos rios (BALBINOT *et al.*, 2008). Esses efeitos combinados com a mudança climática tem o potencial de causar mudanças de difícil reversão no ciclo da água e no funcionamento dos ecossistemas.

3 METODOLOGIA

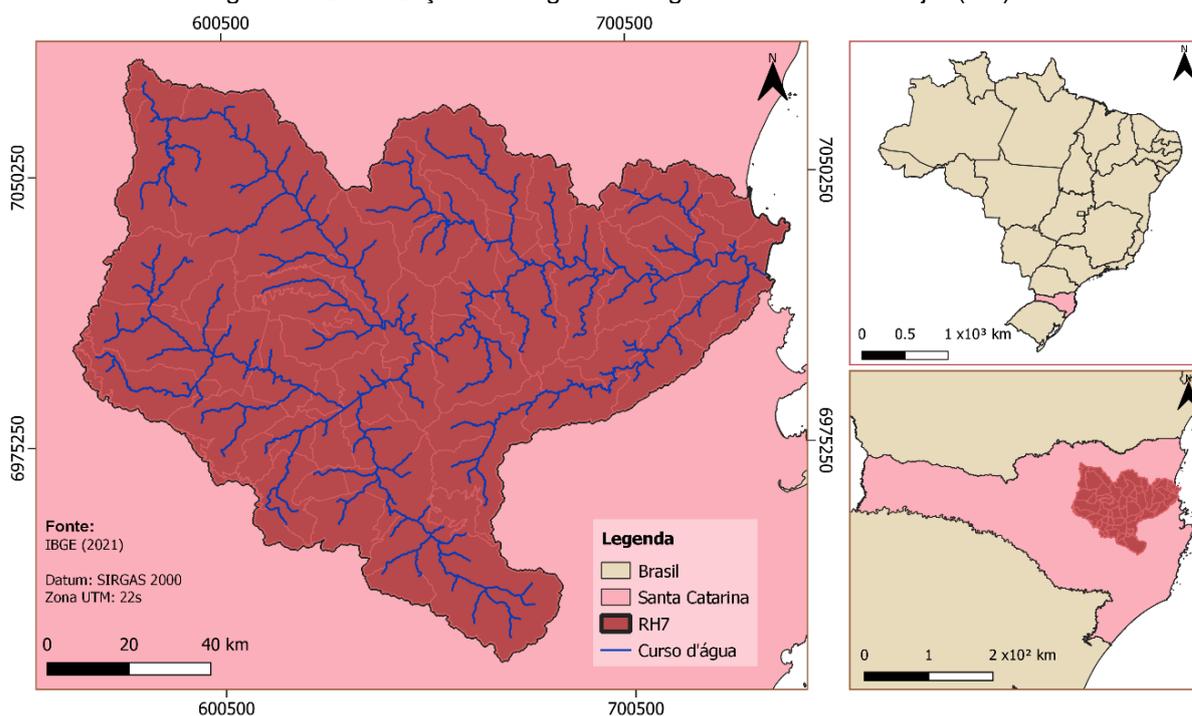
3.1 ÁREA DE ESTUDO

A Região Hidrográfica do Vale do Itajaí (RH7) fica localizada no leste do Estado de Santa Catarina, englobando a bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu e a bacia hidrográfica do Rio Camboriú, além de bacias contíguas (Figura 1). A RH7 possui uma área total de, aproximadamente, 15.310 km², sendo a segunda maior RH do Estado. A região apresenta 40.932 km de cursos d'água, resultando em uma densidade de drenagem de 2,67 km de rio por km². O Rio Itajaí-Açu é o maior curso d'água da bacia (SDS, 2018; FUNDAÇÃO AGÊNCIA DE ÁGUA DO VALE DO ITAJAÍ, 2010).

Quanto ao meio biótico, a RH se situa na região fitoecológica de Floresta Ombrófila Densa, sendo a RH com maior cobertura vegetal nativa de Santa Catarina, totalizando 6.219 km² de remanescentes florestais, equivalente a 40,62% da área total. Ainda, são identificadas 10 Unidades de Conservação (UC) na área da região, sendo a RH com maior número de UC (SDS, 2018).

Em relação a eventos hidrológicos extremos, as inundações são mais recorrentes: 311 eventos entre 2003 e 2015, com média de 24 registros por ano. Em compensação, a região possui menor propensão à ocorrência de estiagens (SDS, 2018).

Figura 1 - Localização da Região Hidrográfica do Vale do Itajaí (SC)



Fonte: Elaborado pela autora

3.2 SWAT+

O SWAT+ se baseia nos processos físicos do ciclo hidrológico, é computacionalmente eficiente e capaz de efetuar simulações contínuas para um longo período de tempo (ARNOLD et al., 2012). Os principais componentes do modelo SWAT+ são clima, hidrologia, temperatura e propriedades do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas, bactérias e patógenos e manejo do solo (ARNOLD et al., 2012). O modelo pode operar com intervalo de tempo diário ou subdiário. Os dados utilizados no presente trabalho são diários e, portanto, será adotado esse intervalo de tempo diário para todas as simulações.

A partir da entrada do Modelo Digital de Elevação da área de estudo, o SWAT+ delimita a bacia hidrográfica e suas sub-bacias. Com a adição de mapas de tipo e uso do solo, o modelo é capaz de subdividir a área em diversas HRUs, a partir da sobreposição das informações de declividade, uso e tipo do solo. A inserção dessas informações é feita através da interface gráfica QSWAT+, na forma de plug-in do

QGIS. O passo seguinte é dar entrada aos dados climáticos que governam os cálculos das dinâmicas do ciclo hidrológico, através do *SWAT+ Editor*. São eles dados diários de precipitação, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa e temperaturas mínima e máxima.

Para que o SWAT+ consiga acessar os dados de tipo e uso do solo, inseridos através de mapas, é necessária a criação de um arquivo de conversão entre os valores numéricos encontrados nos mapas e os códigos de tipo e uso do solo do SWAT+. As conversões para os mapas de tipo e uso do solo são apresentadas nos itens 3.3.2 e 3.3.3, respectivamente.

Após a inserção dos dados de entrada, o usuário pode configurar o período de simulação, o período de “aquecimento do modelo” e a resolução temporal para o cálculo dos processos hidrológicos. Os processos simulados pelo SWAT+ incluem interceptação, escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração, escoamento lateral, redistribuição da água no perfil do solo, uso consuntivo através de bombeamento (se existir), fluxo de retorno e recarga por infiltração de corpos hídricos superficiais, lagoas e canais tributários (ARNOLD et al., 2012). SWAT+ usa um único modelo para crescimento de planta para simular todas as coberturas de solo e diferenciar entre plantas anuais e perenes. O modelo de crescimento da planta é utilizado para avaliar a remoção de água e nutrientes da zona de raiz, transpiração e produção de biomassa. O SWAT+ utiliza o *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE) para prever a produção de sedimentos a partir da paisagem. Em adição, SWAT+ modela o movimento e a transformação de diversas formas de nitrogênio e fósforo, pesticida e sedimentos na bacia hidrográfica, além de permitir que o usuário defina práticas de manejo para cada HRU.

O modelo deve ter seus parâmetros ajustados após a realização de uma primeira simulação mediante o processo de calibração. Com os parâmetros ajustados, se realiza a simulação para obtenção dos resultados dos processos de interesse.

No presente trabalho foram utilizados os seguintes softwares e suas versões: SWAT+ 60.5.2, QSWAT+ 2.0.4 e SWAT+ Editor 2.0.0.

3.3 DADOS DE ENTRADA

3.3.1 DECLIVIDADE

A partir dos modelos digitais de elevação (MDE) são determinadas bandas de declividade, as quais o modelo utiliza para criar as HRUs, junto com as informações de pedologia e uso do solo. Os arquivos utilizados provêm da base de dados *CGIAR-CSI GeoPortal* que fornece dados de elevação digital com 90 metros de resolução obtidos a partir do projeto *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, coordenados pela *National Imagery and Mapping Agency (NIMA)* e *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* e disponibilizados pelo *United States Geological Survey (USGS)* (EMBRAPA, 2021; CGIAR, 2021).

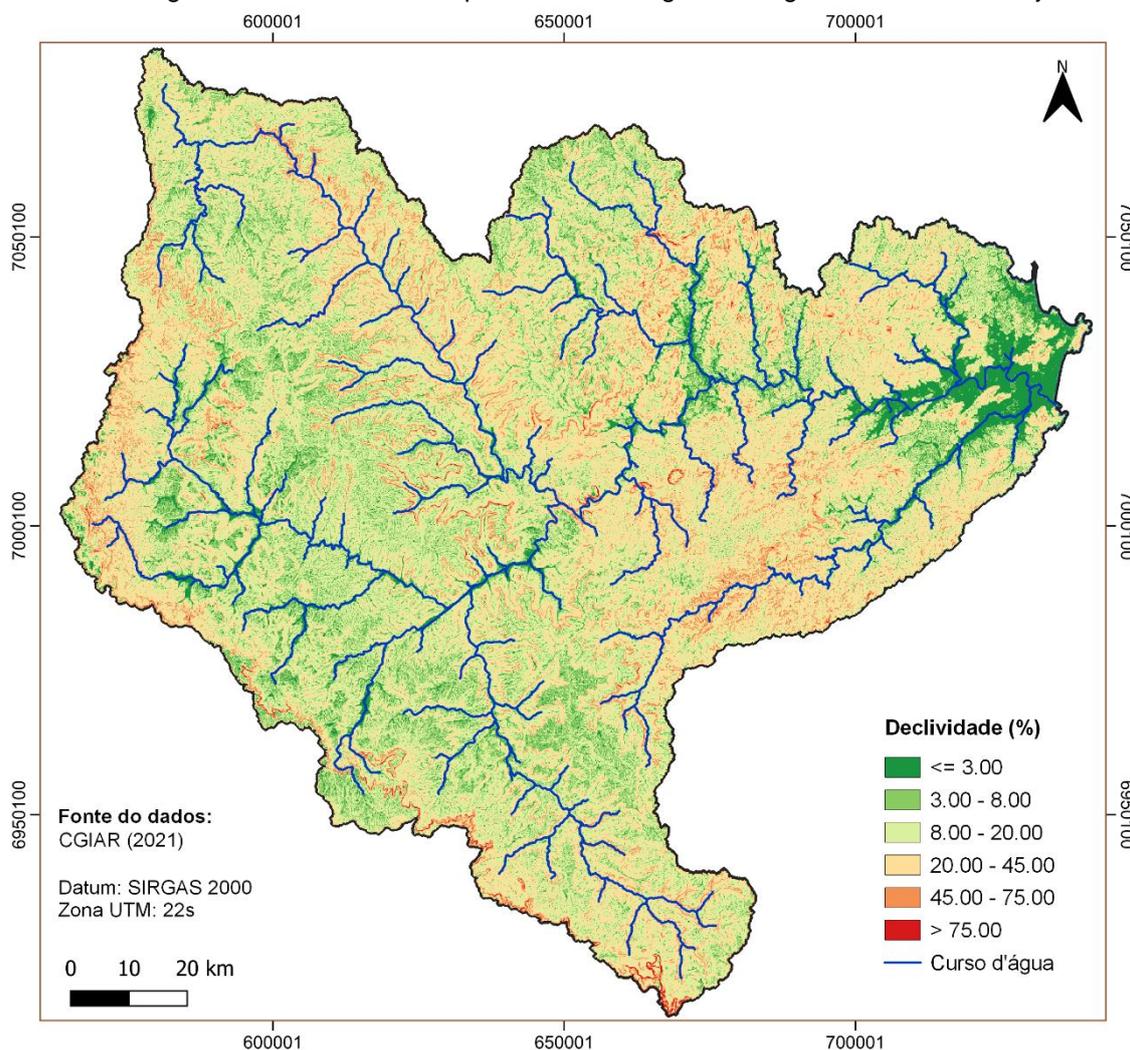
Uma área pode ter seu relevo classificado em fases, de acordo com sua declividade. As fases de relevo da RH7 pode ser observada na Figura 2, classificada de acordo com subdivisão sugerida pela Embrapa, presente na Tabela 1 (EMBRAPA, 2018).

Tabela 1 - Fases de relevo da Região Hidrográfica do Vale do Itajai

Classe de relevo	Declividade (%)
Plano	< 3
Suave ondulado	3 - 8
Ondulado	8 - 20
Forte ondulado	20 - 45
Montanhoso	45 - 75
Escarpado	> 75

Fonte: Adaptado de Embrapa (2018)

Figura 2 - Fases de relevo presentes na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme a Figura 2 predominam na bacia hidrográfica as fases de relevo Ondulado (37,37%) e Forte Ondulado (34,24%), seguidos de Suave Ondulado (16,41%) e Plano (6,61%). As fases de relevo Montanhoso (4,95%) e Escarpado (0,15%) são as de menor ocorrência.

A resolução de 90 metros foi escolhida a fim de otimizar o processo computacional, por conta da grande extensão da RH7. As bandas de declividade escolhidas foram 0 - 50% e 50% - máximo encontrado na região.

3.3.2 TIPO DE SOLO

O mapa de distribuição espacial dos tipos de solo da Região Hidrográfica do Rio Itajaí foi obtido a partir da base de dados da Embrapa (EMBRAPA, 2004). Nele constam os tipos de meio presentes na RH7, que podem ser descrição do solo ou da cobertura do solo, como por exemplo, afloramento rochoso, áreas urbanas, entre outros.

A classificação dos diferentes tipos de solo foi feita com base no agrupamento textural regado pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2018) e relacionado com os grupos hidrológicos de solo, classificação com base em características de infiltração do solos utilizada pelo *Natural Resource Conservation Service* (NRCS) (NEITSCH et al., 2011).

A Tabela 2 apresenta as conversões das classificações utilizadas para o tipo de solo.

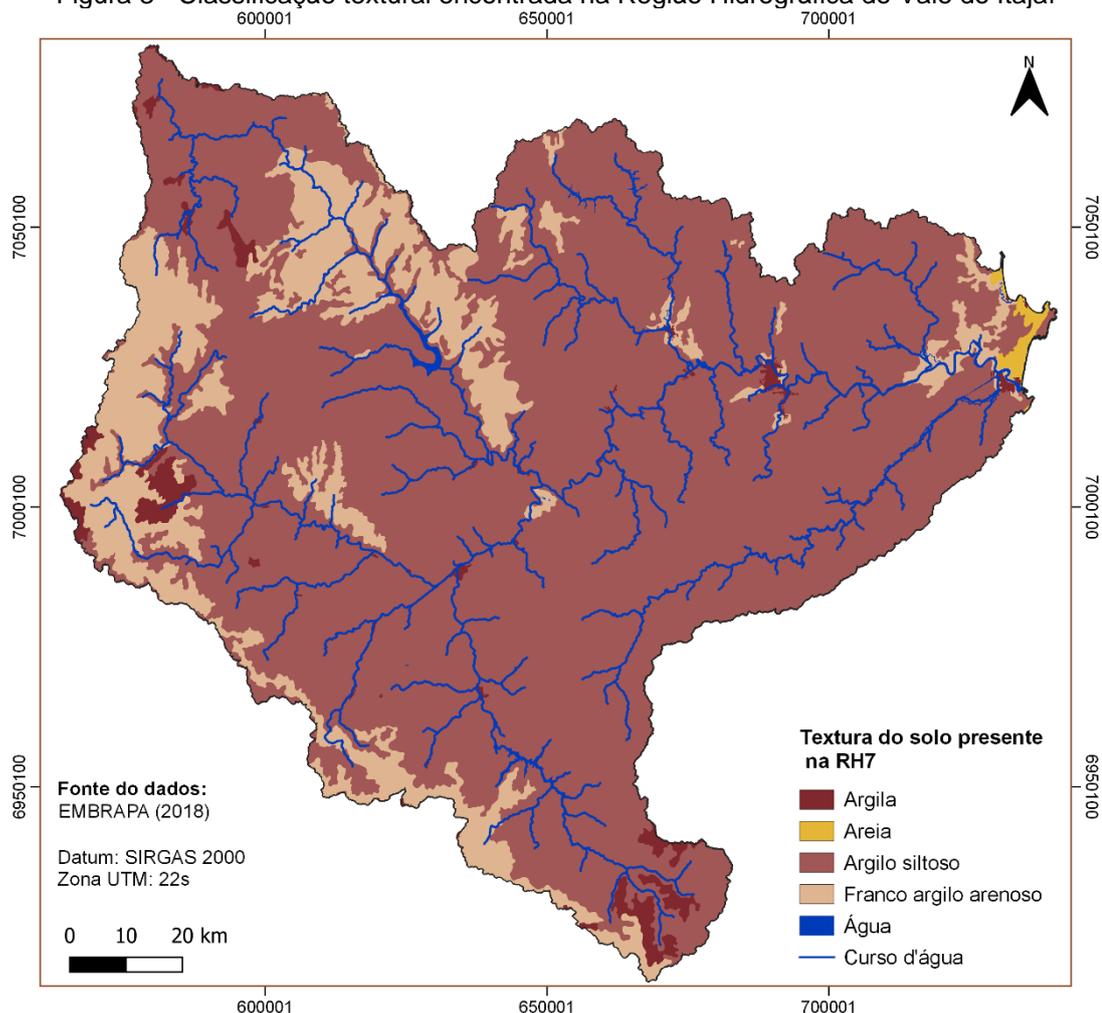
Tabela 2 - Reclassificação dos tipos de solo na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí

Descrição Mapa de Solos de SC	Grupamento textural (SiBCS)	Grupo Hidrológico de solo (NRCS)	Descrição do Grupo Hidrológico de Solo
Arenosa	Areia	A	Solos com alta taxa de infiltração, mesmo quando completamente molhados. Possuem uma elevada taxa de transmissão de água.
Dunas			
Praias			
Areias quartzosas			
Média	Franco argilo arenoso	B	Solos com moderada taxa de infiltração quando completamente molhados. Possuem uma moderada taxa de transmissão de água.
Solo orgânico			
Argilosa	Argilo siltoso	C	Os solos têm uma taxa de infiltração lenta quando completamente molhados. Possuem uma taxa de transmissão de água lenta.
Muito argilosa	Franco argiloso		
Solo indiscriminado de mangue			
Ilha			
Urbano	Argila	D	Solos com taxa de infiltração muito lenta quando completamente molhados. Possuem uma taxa de transmissão de água muito lenta.
Afloramento rochoso			
Corpo d'água	Água		

Fonte: Elaborada pela autora a partir de EMBRAPA (2018) e Neitsh et al, (2011)

A Figura 3 apresenta os solos encontrados na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí. A classificação textural da região é predominantemente composta de solo Argilo Siltoso (81,24%) seguido do solo Franco Argilo Arenoso (15,53%), Argila (2,08%) e Areia (0,31%).

Figura 3 - Classificação textural encontrada na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí



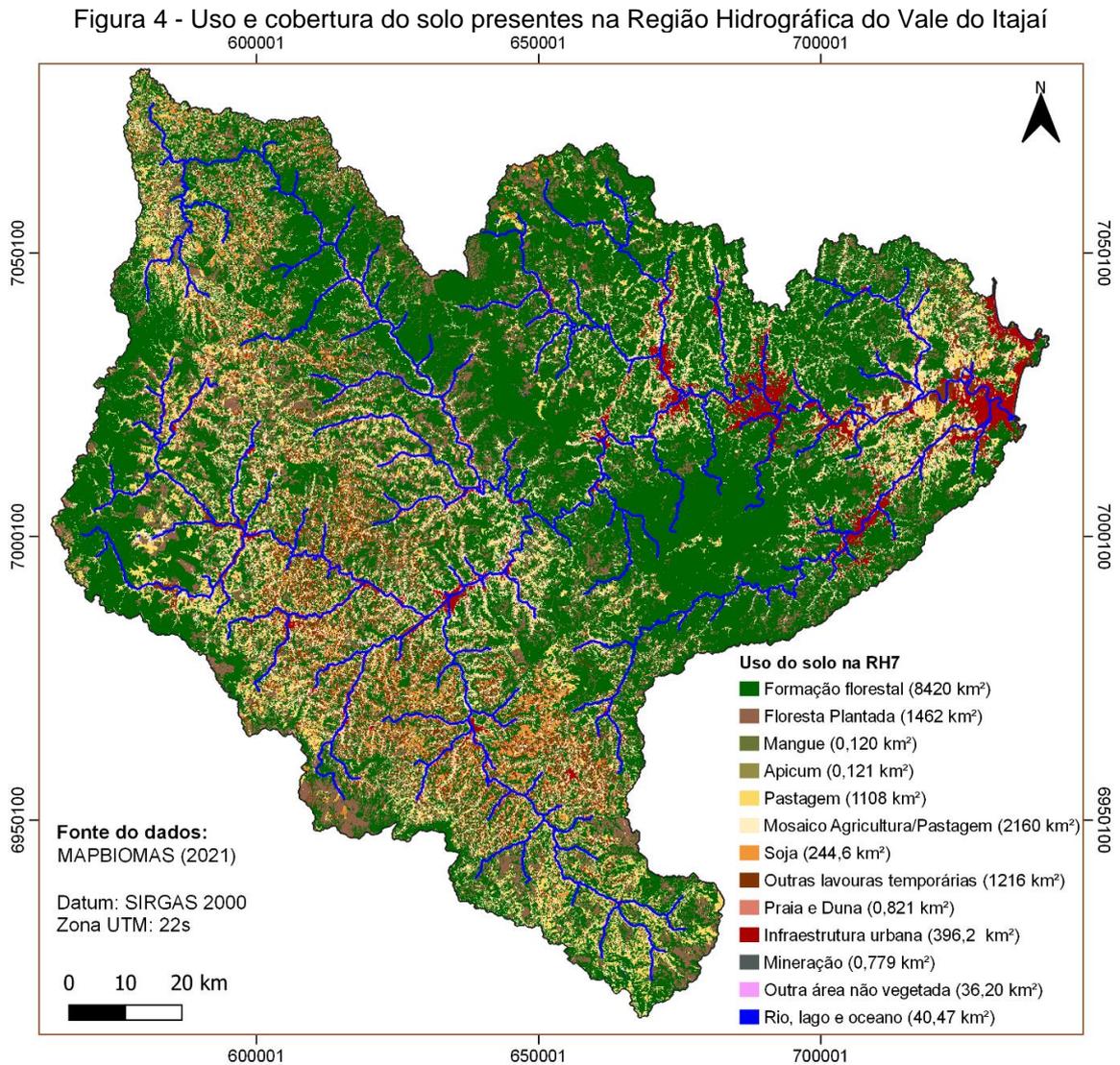
Fonte: Elaborado pela autora

3.3.3 USO E COBERTURA DO SOLO

Os dados de uso e ocupação do solo foram obtidos através do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomias). Dentre outros projetos, este envolve especialistas em biomas, uso da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação que utilizam processamento em nuvem e classificadores automatizados para criar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso do solo do Brasil (MAPBIOMAS, 2020).

Todos os mapas são criados a partir da classificação pixel a pixel de imagens de satélites Landsat, com resolução de 30 metros (MAPBIOMAS, 2020). O conjunto

de dados utilizado foi da Coleção 5.0, que possui informação de uso e cobertura do solo do período de 1985 a 2019 e 21 classificações possíveis, sendo que na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí foram identificadas 13 (Figura 4).



Fonte: Elaborado pela autora

O SWAT possui uma extensa base de dados de uso e cobertura do solo, o que possibilitou a conversão das 11 classificações do MapBiomias para códigos do SWAT. A Tabela 3 apresenta a conversão da classificação do MapBiomias para códigos do SWAT+.

Tabela 3 - Classificação dos usos do solo na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí para uso no SWAT+

Nome MapBiomias	Descrição MapBiomias	Código SWAT	Descrição SWAT
Formação Florestal	Floresta Ombrófila Densa, Aberta e Mista e Floresta Estacional Semi-Decidual, Floresta Estacional Decidual e Formação Pioneira Arbórea.	FRSD_SUHF	Forest deciduos subtropical humid forest
Floresta plantada	Espécies arbóreas plantadas para fins comerciais (ex. eucalipto, pinus, araucária)	PINE	Pine
Mangue	Formações florestais, densas, sempre-verdes, frequentemente inundadas pela maré e associadas ao ecossistema costeiro de manguezal	WETF	Wetlands forested
Apicum	Apicuns ou Salgados são formações quase sempre desprovidas de vegetação arbórea, associadas a uma zona mais alta, hipersalina e menos inundada do manguezal, em geral na transição entre este e a terra firme	WETN	Wetland non forested
Pastagem	Área de pastagem, predominantemente plantadas, vinculadas à atividade agropecuária. As áreas de pastagem natural são predominantemente classificadas como formação campestre que podem ou não ser pastejadas	PAST	Pasture
Lavoura temporária	Sem descrição	AGRL	Agricultural land generic

Nome MapBiomias	Descrição MapBiomias	Código SWAT	Descrição SWAT
Soja	Áreas cultivadas com a cultura da soja (a partir do ano de 2000)	SOYB	Soybean
Outras lavouras temporárias	Áreas ocupadas com cultivos agrícolas de curta ou média duração, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, que após a colheita necessitam de novo plantio para produzir. Os mapas anteriores ao ano de 2000 incluem lavouras de soja.	AGRL	Agricultural land generic
Mosaico de agricultura e pastagem	Áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura.	CRGR	Cropland/Grassland mosaic
Infraestrutura urbana	Áreas urbanizadas com predomínio de superfícies não vegetadas, incluindo estradas, vias e construções.	URHD	Residential-High Density
Mineração	Áreas referentes a extração mineral de grande porte, havendo clara exposição do solo por ação de maquinário pesado. Somente são consideradas áreas próximas a referência da digital da AhkBrasilien (AHK) e do CPRM	BSVG	Barren or sparsley vegetated
Outra área não vegetada	Áreas de superfícies não permeáveis (infra-estrutura, expansão urbana ou mineração) não mapeadas em suas classes	URML	Residential-Med/Low density

Nome MapBiomias	Descrição MapBiomias	Código SWAT	Descrição SWAT
Rio, lago e oceano	Rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água	WATR	Water arid

Fonte: Elaborado pela autora com base em MAPBIOMAS (2020)

3.3.4 DADOS HIDROMETEREOLÓGICOS

Os dados obtidos através do Portal HidroWeb e Global Weather Data for SWAT resultaram em 34 anos de dados diários de precipitação, vento, umidade relativa, radiação solar e temperaturas mínima e máxima.

3.3.4.1 PORTAL HIDROWEB (ANA)

Os dados pluviométricos e fluviométricos foram obtidos no Portal HidroWeb, que é a ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), oferecendo ao usuário acesso aos dados coletados pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), coordenada pela Agência Nacional das Águas (ANA).

Duzentas e vinte e oito estações pluviométricas estão disponíveis na base de dados do Portal HidroWeb para a RH7, sendo que 132 não possuíam informações de localização, impossibilitando seu uso no modelo. Das estações que restaram, foi aplicado um teste de consistência dos valores, no qual foram descartadas as estações que apresentaram a proporção de valores faltantes por valores válidos maiores que 10% para o período de estudo. Com essa etapa, 32 estações pluviométricas foram descartadas, restando 44 aptas a serem utilizadas no modelo.

3.3.4.2 GLOBAL WEATHER DATA FOR SWAT

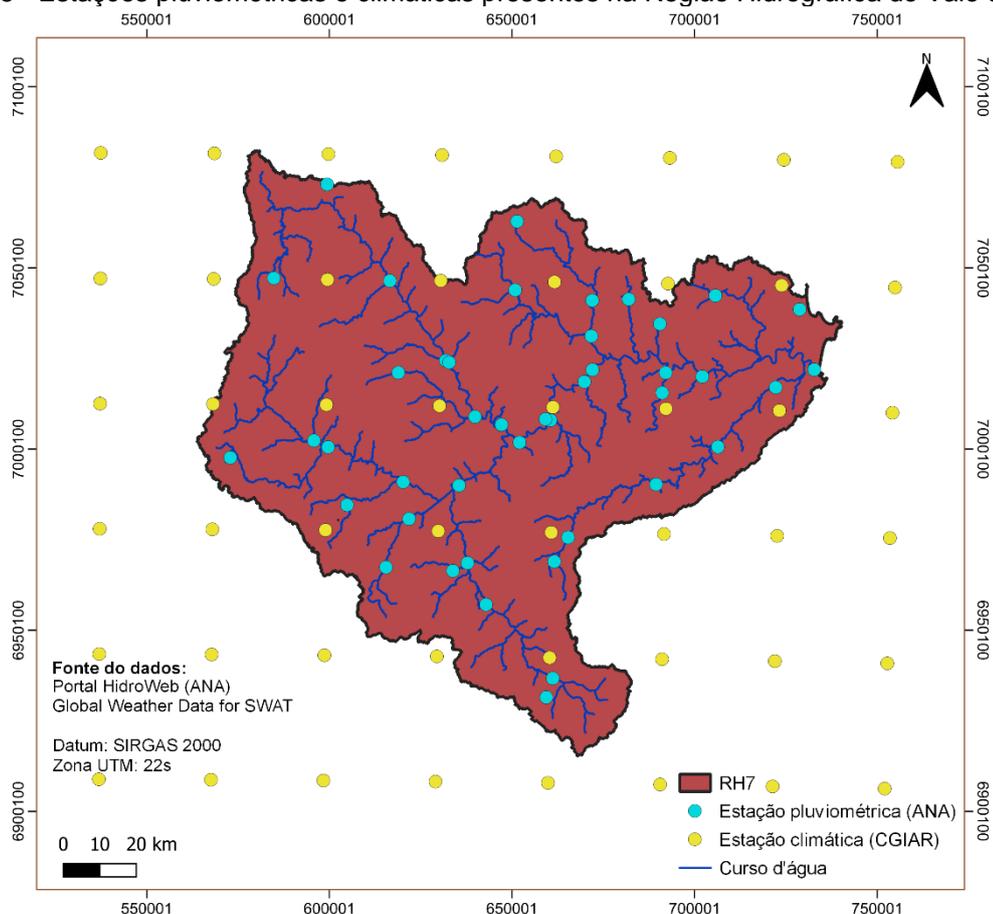
Na ausência de dados observados, dados diários de precipitação, temperatura mínima e máxima, vento, umidade relativa e radiação solar podem ser obtidos através do *Global Weather Data for SWAT*, para o período de 1979 a 2014. O *Global Weather*

Data for SWAT possui um sistema de gerenciamento de bases de dados que gera arquivos com formatação compatível com o SWAT+, a partir de dados gerados pelo modelo *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), elaborado por cientistas do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), para a região da área de estudo (NCAR, 2017; NCDC, 2011; TEXAS A&M AGRILIFE RESEARCH, 2021).

O modelo *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) representa interações globais entre oceanos, atmosfera e superfície terrestre utilizando dados observados de diversas fontes, tais como, observações de superfície, observações de balões de ar, observações satelitais, entre outros. A partir desses dados, o modelo é capaz de gerar uma série histórica com aferições diárias para a região e o período de estudo solicitado pelo usuário (NCDC, 2011).

Para a Região Hidrográfica do Vale do Itajaí, o sistema gerou 64 estações virtuais. Destas, 16 estações se localizam no domínio da bacia, contribuindo com os valores de precipitação. Ou seja, para dados de radiação solar, temperatura, umidade relativa e vento serão utilizados os valores das 64 estações, enquanto que os valores de precipitação só serão utilizados os valores das 16 estações que se encontram no domínio da bacia da RH7. Assim, o número de estações totais de precipitação, levando em consideração os dados obtidos nas bases de dados do Portal Hidroweb e Global Weather Data for SWAT, é de 60, conforme Figura 5.

Figura 5 - Estações pluviométricas e climáticas presentes na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí



Fonte: Elaborado pela autora

3.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

O primeiro passo no processo de calibração do SWAT+ é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para uma dada área. O usuário pode determinar as variáveis que necessitam de ajuste com base em seu julgamento ou em uma análise de sensibilidade, que consiste no processo de determinação da taxa de mudança na resposta do modelo com respeito às mudanças nos dados de entrada (ARNOLD *et al.*, 2012).

A escolha dos parâmetros a serem calibrados foi feita a partir de trabalhos já realizados de modelagem hidrológica utilizando o SWAT. Os parâmetros foram escolhidos com base em Briguenti (2015), Moreira, Schwambach e Rigo (2018) e Briguenti (2019) se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros selecionados para calibração do modelo, sua unidade e o intervalo de valores possíveis

Parâmetro	Descrição (unidade)	Intervalo de valores
CN2	Curva Número inicial para condição de umidade do solo II (adimensional)	35 - 95
Alpha	Fator do escoamento de base (dias)	0 - 1
Surlag	Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias)	0,05 - 24
Revap	Coeficiente de ascensão de água do aquífero raso para zona de raiz (adimensional)	0,02 - 0,2
Lat_len	Comprimento da declividade para escoamento subsuperficial (m)	0 - 150
Perco	Coeficiente de percolação (adimensional)	0 - 1
AWC	Armazenamento de água no solo (mm água/mm)	0,01 - 1

Determinados os parâmetros mais sensíveis, o segundo passo é o processo de calibração. A calibração do modelo é realizada delimitando os valores mínimos e máximos, levando em consideração as incertezas, para os parâmetros de entrada e comparando os valores simulados para um dado conjunto de condições assumidas com os dados observados para a mesmas condições, através de funções objetivo (ARNOLD *et al.*, 2012).

O processo de calibração foi realizado no *software SWAT+ Toolbox versão 0.7.6*, onde é possível configurar o tipo de mudança do valor do parâmetro (valor absoluto, substituição e porcentagem) e a variação que o valor do parâmetro pode sofrer, de acordo com o tipo de mudança escolhido. Para este trabalho foi aplicada a mudança de 20% nos parâmetros, para mais ou para menos. Para avaliar o desempenho do modelo na representação dos valores observados, duas funções objetivo serão utilizadas: *Nash-Sutcliff Efficiency (NSE)* e *Percent Bias (PBIAS)*.

O NSE determina a magnitude relativa da variância residual comparada com a variância das medidas observadas. O NSE varia entre menos infinito e 1,0, sendo

1,0 o valor ótimo. Valores entre 0 e 1 geralmente são considerados aceitáveis, enquanto valores menores ou iguais a 0 indicam um desempenho inaceitável, conforme equação:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]$$

onde Y_i^{obs} é o i -ésimo valor observado, Y_i^{sim} é o i -ésimo valor simulado, Y^{mean} é a média dos valores observados e n é o número total de observações. Essa função é recomendada por ser comumente utilizada, fornecendo um grande volume dos valores reportados. Devat e Dezetter (1991 *apud* MORIASI *et al*, 2007) acreditam que o NSE é a melhor função objetivo para verificar o ajuste geral entre os hidrogramas observado e simulado.

O *PBIAS* mede o desvio do valor simulado em relação ao seu correspondente observado, expresso em porcentagem. O valor ótimo para *PBIAS* é 0, com valores próximos de zero indicando uma simulação acurada. Valores positivos indicam uma tendência a subestimar os valores, enquanto valores negativos indicam uma superestimativa de valores por parte do modelo, conforme equação:

$$PBias = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

onde Y_i^{obs} é o i -ésimo valor observado, Y_i^{sim} é o i -ésimo valor simulado e n é o número total de observações. Essa função permite identificar claramente fortes desvios do modelo, e possui uma definição semelhante com a *Deviation of Streamflow Volume* (Dv), que por sua vez é frequentemente utilizada para quantificar erros no balanço hídrico. É importante destacar que para a componente de vazão os valores de *PBIAS* tendem apresentar maiores variações entre anos secos e úmidos (Gupta *et al*, 1999). Por isso é importante garantir a existência de anos secos e úmidos no período de calibração e validação (MORIASI *et al.*, 2007).

A partir de uma coletânea de diversos trabalhos envolvendo modelagem hidrológica, Moriasi *et al.* (2007) compilou os resultados recomendados para avaliar o desempenho do modelo para passo de tempo mensal, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Métricas recomendadas para avaliação de desempenho do modelo para passo de tempo mensal

Avaliação do desempenho	NSE	PBIAS (%)
Muito bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,50$	$\geq \pm 25$

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007)

O processo final é a validação do modelo para o componente de interesse, por exemplo, vazão, concentração de sedimentos, evapotranspiração, etc. A validação envolve realizar a simulação utilizando os parâmetros determinados no processo de calibração e comparar com os dados observados que não foram utilizados na calibração (ARNOLD *et al.*, 2012).

3.5 DETERMINAÇÃO DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO A PARTIR DAS TENDÊNCIAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A identificação da tendência de uso e ocupação do solo foi realizada a partir da análise dos mapas anuais obtidos de MapBiomas Coleção 5.0 para o período de 1985 a 2019, totalizando 34 anos. Para cada ano, foram computados os diferentes usos do solo e suas respectivas áreas, permitindo a identificação dos usos do solo que apresentavam uma tendência clara de mudança para o período de estudo.

Após identificar os usos do solo com tendência de mudança pronunciada, usou-se uma ferramenta de previsão para extrapolar a série temporal com base no seu histórico de flutuações. A ferramenta “Forecast” do *Microsoft Excel* incorpora essas capacidades e permite estimar a variação do intervalo de confiança. O intervalo de confiança define a região que contém uma parcela significativa dos prováveis eventos. Para a criação dos cenários foi adotado o intervalo de confiança de 95%, ou seja que 95% dos valores futuros provavelmente estarão contidos no dado intervalo.

Desta maneira, foram obtidos três cenários para simulação para o ano de 2030: um Cenário Realista, baseado na curva de tendência central; um Cenário Otimista, baseado na curva de limite inferior do limite de confiança e um Cenário Pessimista, baseado na curva de limite superior. Ainda, foi criado o Cenário Referência com a distribuição de usos do solo constantes nos valores de 2019.

É importante ressaltar que os cenários foram criados a partir da tendência de mudança de cada uso do solo, sem levar em consideração suas interações, mas garantindo a conservação da área total da bacia hidrográfica. Portanto, o aumento de um tipo de solo implica na diminuição de outro.

3.5.1 ALGORITMO DE MUDANÇA DE USO DO SOLO

A análise das séries temporais de ocupação e uso do solo permitiu identificar as categorias com maior variação relativa aos correspondentes valores iniciais e ainda estimar uma projeção central e intervalo de confiança para valores futuros. No entanto, esta informação é insuficiente para determinar espacialmente as parcelas de solo que serão provavelmente afetadas por tais mudanças. Parcelas de solo são definidas como elementos de 30 x 30 metros que correspondem a um pixel do arquivo raster.

Além de fatores naturais, as dinâmicas de uso do solo são controladas por fatores econômicos, políticos e sociais que fogem do escopo deste trabalho. No entanto, é possível sintetizar um conjunto simples de regras de mudança que satisfazem o senso comum e podem ser iteradas para redefinir as categorias das parcelas de uma maneira consistente com os cenários buscados.

Primeiramente, deve-se determinar quais parcelas podem sofrer alterações e quais não. Por exemplo, parcelas pertencentes a rios, lagos e oceanos, não devem sofrer alterações, pois este estudo não busca entender processos de erosão, retificação ou mudanças decorrentes do nível do mar. Da mesma maneira, regiões externas à área de estudo não serão alteradas para preservar a área da bacia hidrográfica. Finalmente, as parcelas que pertencem às categorias crescentes não sofrem alterações para não reduzir a velocidade de convergência do procedimento.

Se uma parcela não pertence às categorias protegidas (CP) e crescentes (CC) ela pode se tornar um membro de CC sempre que ela seja vizinha de alguma parcela

membro do CC. Isto garante que as mudanças aconteçam sempre na periferia de uma categoria crescente sem alterar parcelas protegidas nem re-assinando outras parcelas crescentes. O procedimento termina quando todas as categorias crescentes atingem os valores de área desejados. O algoritmo foi implementado na linguagem de programação *Python 3.8* e pode ser resumido assim:

1. Definição de categorias que não podem ser alteradas (CP) e as que apresentam crescimento (CC)
2. Verifica se alguma categoria em CC atingiu o valor objetivo de área. Se for o caso, a categoria passa a ser membro de CP. Se o conjunto CC ficar vazio o procedimento termina (FIM).
3. Seleção de uma parcela aleatória (PA: parcela aleatória).
4. Se a categoria de PA pertence a CC ou CP, retorna a 3.
5. Se PA for vizinha de uma ou várias parcelas em CC, é atribuída a PA a categoria de um vizinho aleatório que seja membro de CC. Retorna a 2.

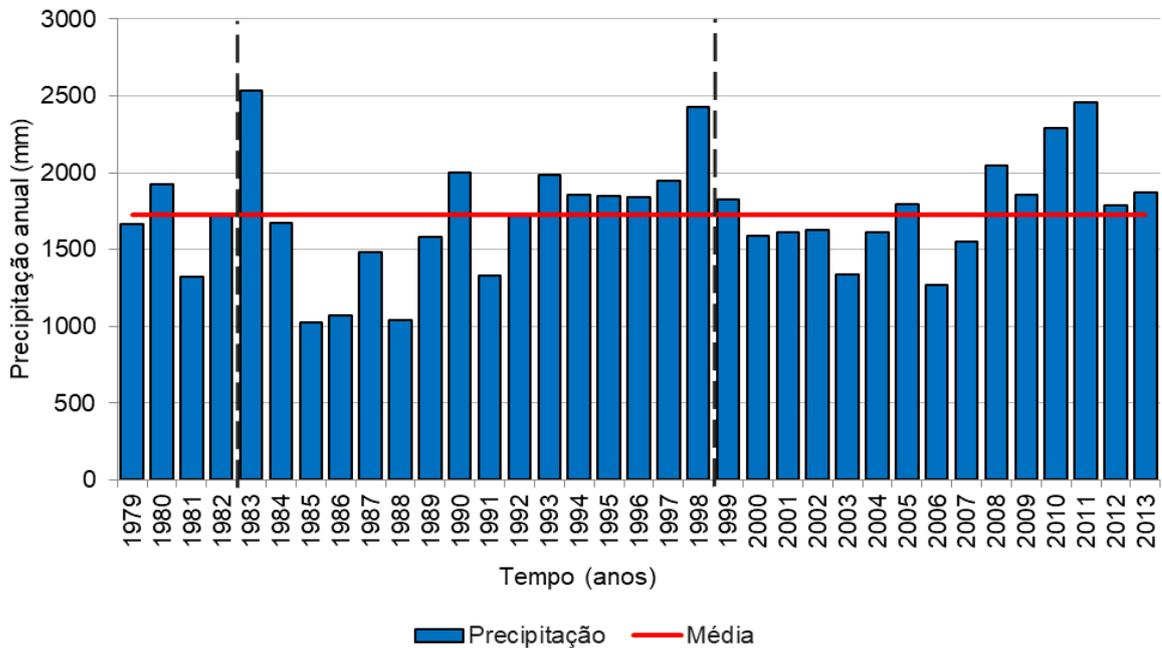
Para inicializar o procedimento anterior, se colocam em CP todas as categorias das parcelas que não devem ser modificadas. O procedimento descrito atribui igual probabilidade de mudança a todas as parcelas periféricas a uma categoria crescente, fazendo com que a redefinição de categoria aconteça de maneira orgânica e não preferencial.

4 RESULTADOS

4.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Segundo Arnold *et al.* (2012), uma boa calibração e validação de modelo deve envolver dados observados incluindo dados de anos úmidos e secos. A Figura 6 apresenta a precipitação total anual e a média global para o período. Os anos secos são aqueles abaixo e mais distantes da curva média e os anos úmidos os que estão acima.

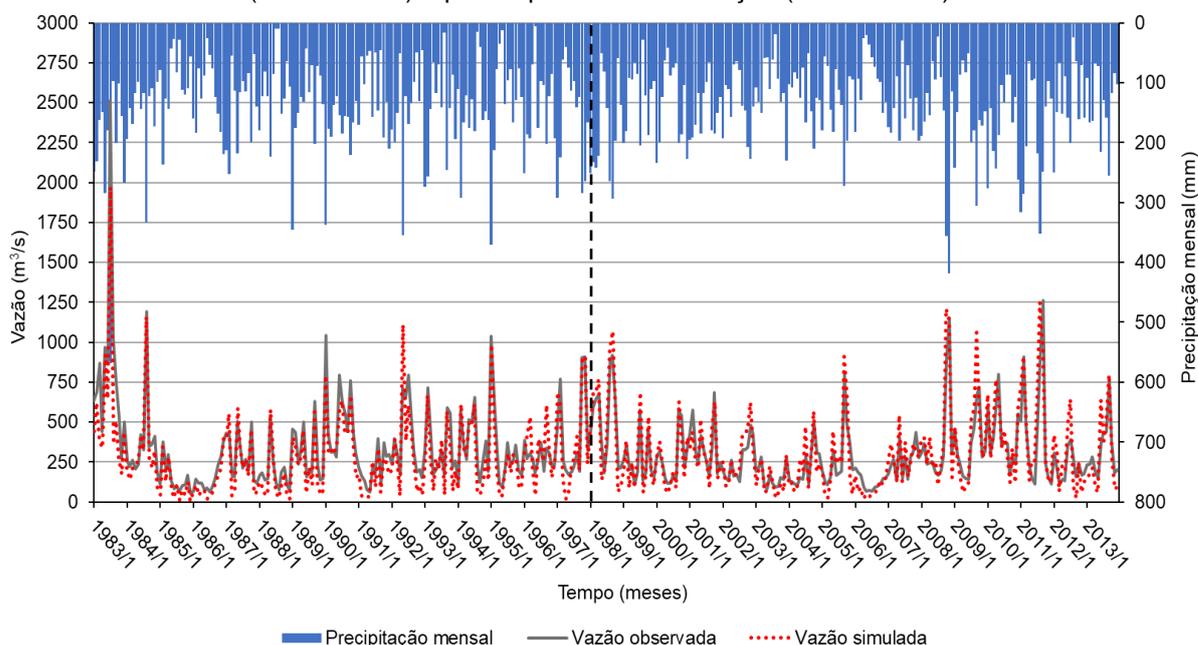
Figura 6 - Precipitação total anual e média global para a Região Hidrográfica do Vale do Itajaí, para o período de 1979 a 2013



As linhas tracejadas separam a série nos períodos de aquecimento do modelo, de calibração e de validação. Para os três períodos é possível observar a ocorrência de anos secos e anos úmidos, garantindo assim que o modelo foi calibrado para os diferentes cenários possíveis.

Numa primeira simulação para o período de calibração e comparação dos valores simulados com os valores observados de vazão mensal para um dado canal, os valores de NSE e PBIAS foram de 0,805 e 14,63%, respectivamente, que os classificavam como desempenho “Muito bom” e “Bom”. Na tentativa de melhorar os valores das funções objetivo, realizou-se a calibração para os sete parâmetros previamente escolhidos. Os valores resultantes desse processo foram NSE igual a 0,811 e PBIAS igual a 15,30, mantendo a classificação do desempenho do modelo original. As curvas de vazão simulada para o período de calibração e validação estão apresentadas na Figura 7.

Figura 7 - Precipitação mensal, vazão simulada e vazão observada para o período de calibração (1983 a 1998) e para o período de validação (1999 a 2013)



A partir da análise da Figura 7 percebe-se que, de uma forma geral, o modelo tende a superestimar levemente os picos de vazão, com exceção dos anos em que ocorreram eventos extremos, como 1983, 1984, 2008 e 2011. Ainda, o modelo possui a tendência de subestimar os valores mínimos para todo o período de estudo.

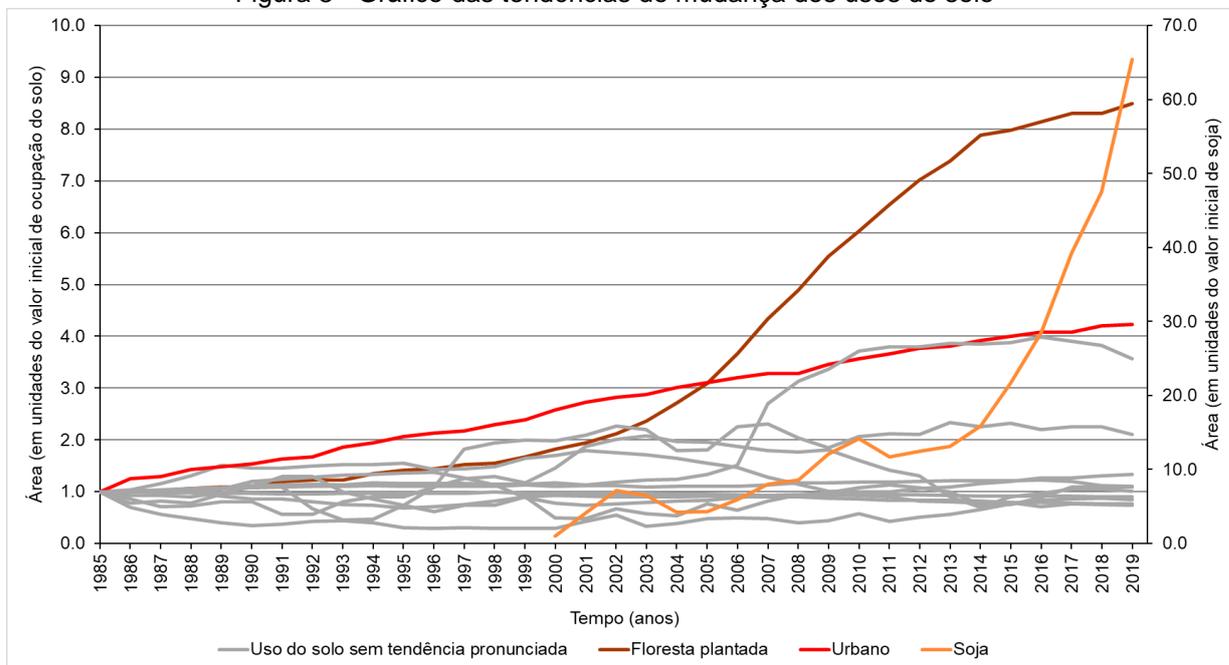
4.2 TENDÊNCIA DE USO DO SOLO

A partir da série histórica de uso do solo, foi gerado o gráfico da Figura 8 que contém a tendência de mudança de cada uso do solo presente na RH7. Salienta-se que, por uma mudança na metodologia de classificação do MapBiomas, o cultivo da soja passou a ser representado separadamente a partir do ano de 2000. Anteriormente, a soja fazia parte da classe “Lavouras temporárias” (MAPBIOMAS, 2020).

Para facilitar a interpretação das tendências de variação de categorias distintas com valores de uso do solo muito diversos, os valores de área foram normalizados pelos valores correspondentes de uso do solo inicial em 1985, com exceção da soja, que foi normalizada pelo seu valor inicial em 2000. Desta maneira todas as curvas

partem do valor 1, o que facilita identificar se houve crescimento, redução ou flutuação ao longo dos anos.

Figura 8 - Gráfico das tendências de mudança dos usos do solo



É possível observar na Figura 8 que as categorias de uso do solo que apresentam maiores mudanças foram a Soja, Floresta plantada e Infraestrutura urbana. Pode ser observado que a infraestrutura urbana apresenta um crescimento linear e a Floresta plantada tende a se estabilizar após um crescimento linear de 10 anos, enquanto a cultura da Soja apresenta um crescimento exponencial após flutuações iniciais, pelo que ocupa seu próprio eixo do lado direito.

Pela limitação espacial de ocupação da soja, espera-se que o crescimento seja logístico, existindo um valor máximo de capacidade do sistema (RAMOS, 2013). Com os dados atuais e o comportamento da curva, não foi possível identificar um valor de saturação, pois ainda se encontra a sua fase exponencial inicial. Consequentemente, para formulação dos cenários adotou-se crescimento exponencial para a Soja e crescimento linear para Floresta plantada e Infraestrutura urbana.

Para a extrapolação da curva de Floresta plantada e Infraestrutura urbana foi considerada toda a série de dados para gerar a curva de tendência futura (Figura 9 e Figura 10), enquanto que para a Soja foram considerados dados a partir de 2011,

quando a curva passou a apresentar comportamento puramente exponencial (Figura 11).

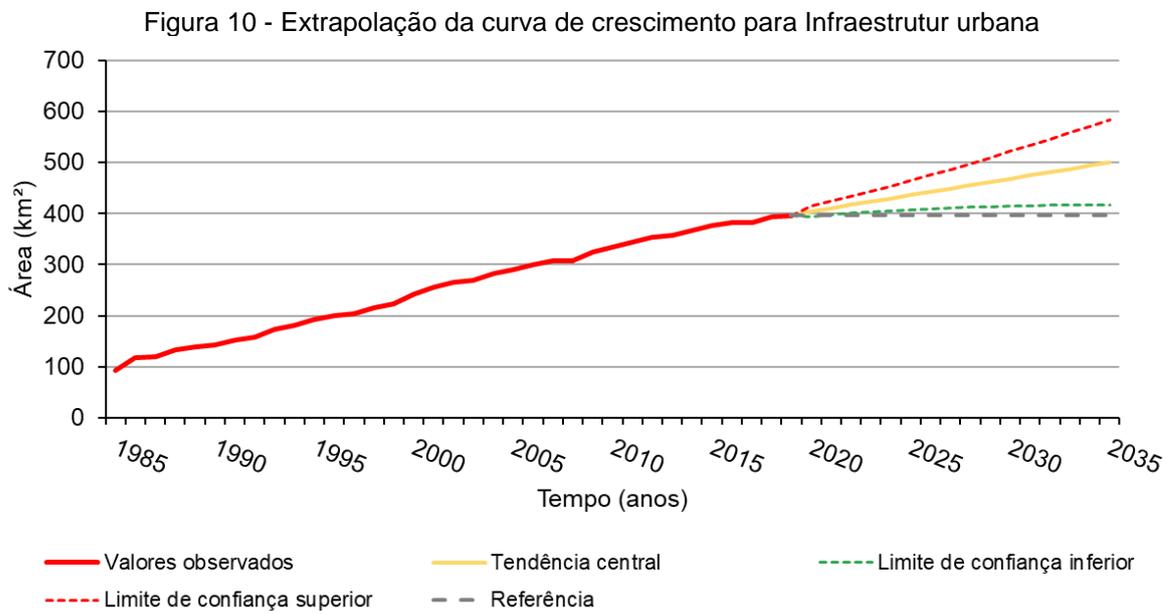
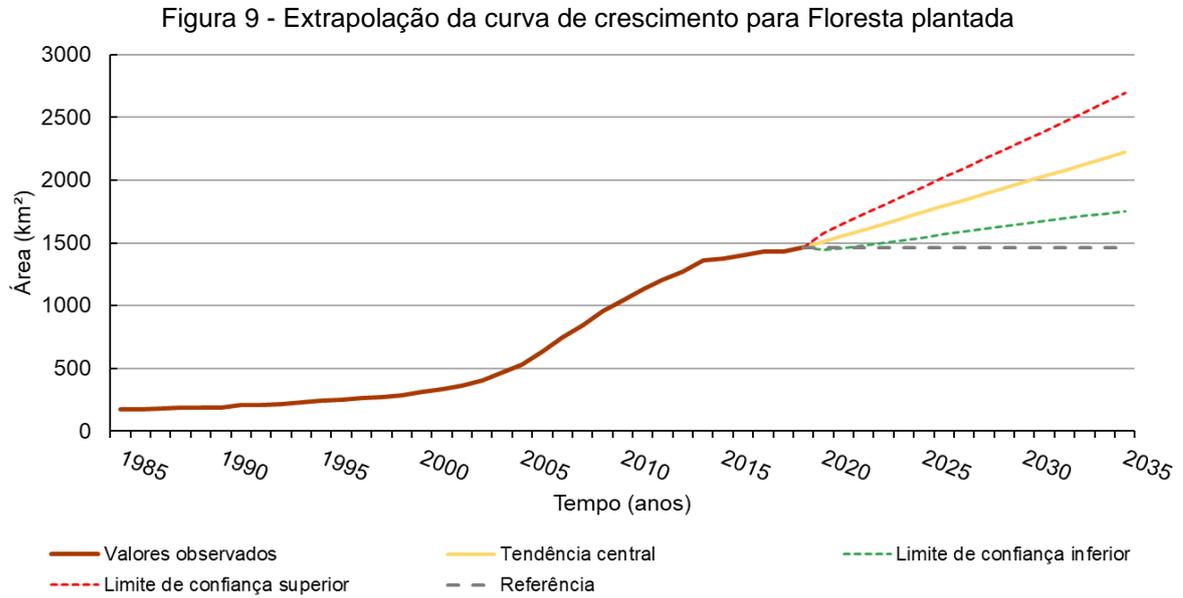
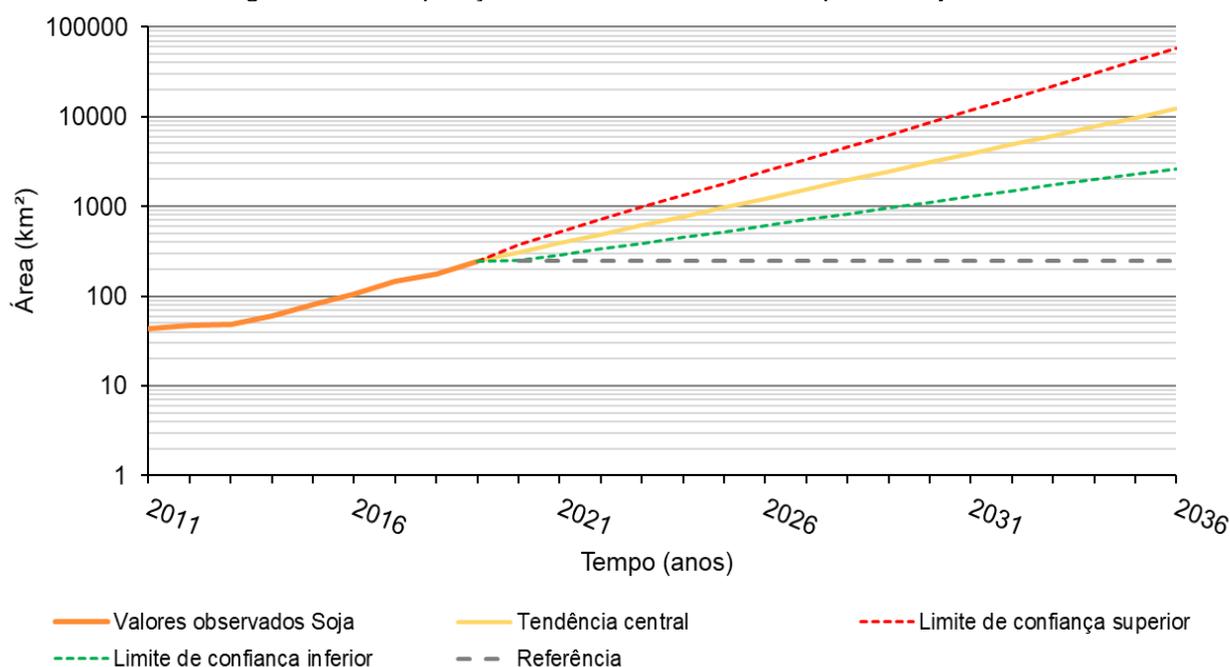


Figura 11 - Extrapolação da curva de crescimento para a Soja



A partir das curvas extrapoladas, foram obtidos os valores para os três usos do solo para o ano de 2030. A Tabela 6 apresenta os cenários Realista (A), Otimista (B) e Pessimista (C), formulados a partir da curva de tendência central, limite inferior do intervalo de confiança e limite superior, respectivamente. Ainda, o cenário de referência possui os valores para os três usos do solo para o ano de 2019.

Tabela 6 - Cenários de simulação formulados a partir da da extrapolação das curvas de Floresta plantada, Infraestrutura urbana e Soja

Uso do solo	Referência	Cenário A	Cenário B	Cenário C
Floresta plantada (km ²)	1462,22	1985,18	1653,74	2316,62
Infraestrutura urbana (km ²)	396,35	467,91	414,70	521,12
Soja (km ²)	245,10	3092,12	1117,42	8556,51

Originalmente, a ocupação do uso do solo pela Floresta plantada representava 9,75% da área total da bacia. Na formulação dos cenários, esse valor passou a ser, aproximadamente, 11,0%, 13,2% e 15,4% para os cenários Realista, Otimista e Pessimista, respectivamente. Para a categoria Infraestrutura urbana, a ocupação

representava 2,6% no Cenário Referência, passando a ser 2,8% para o Cenário Otimista, 3,1% para o Cenário Realista e 3,5% para o Cenário Pessimista.

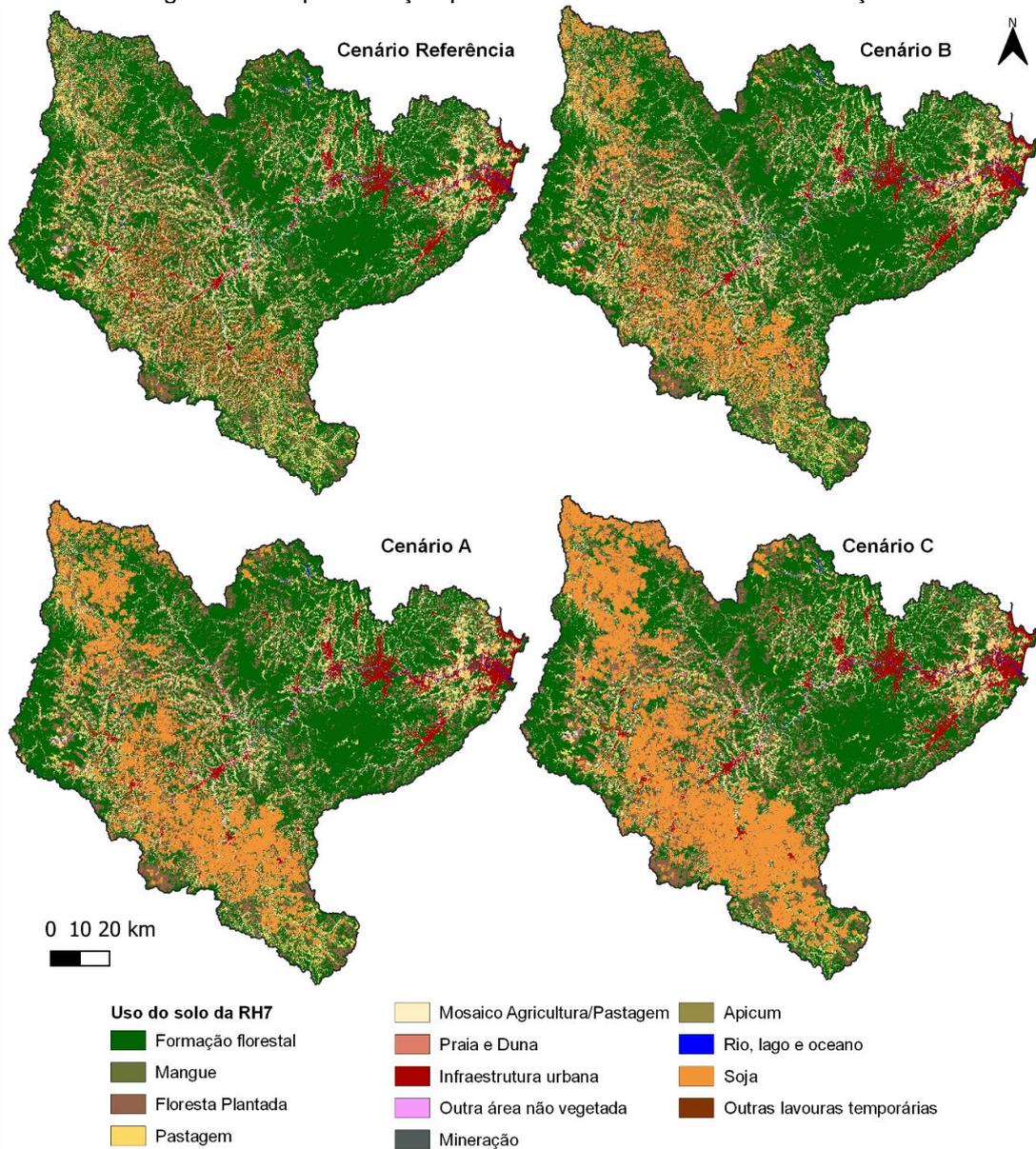
Já para a Soja, a ocupação inicial representava 1,6%, passou a representar 7,4%, 20,6% e 57,0% da área da bacia, para os cenários Realista, Otimista e Pessimista. Considerando que o valor do Cenário Pessimista está, provavelmente, acima do valor desconhecido de saturação, adotou-se uma metodologia diferente para formular os cenários da Soja, onde o valor para o Cenário Pessimista (C) foi tomado da curva de tendência central e o valor para o Cenário Realista (A) é a média aritmética entre os valores do Cenário Realista (A) e Cenário Otimista (B), este por sua vez se manteve igual. Desta maneira, a ocupação máxima da Soja na área da bacia passou a ser 20,6%, que ainda pode ser um valor exagerado, mas que corresponde ao crescimento exponencial adotado. Os valores atualizados para os cenários se encontram na Tabela 7.

Tabela 7 - Cenários de simulação atualizados

	Referência	Cenário A	Cenário B	Cenário C
Floresta plantada (km ²)	1462,22	1985,18	1653,74	2316,62
Infraestrutura urbana (km ²)	396,35	467,91	414,70	521,12
Soja (km ²)	245,10	1117,42	2104,76	3092,12

Enfim, a Figura 12 apresenta os mapas para os diferentes cenários de simulação que foram gerados a partir da aplicação do algoritmo de mudança do uso do solo, que foi configurado para alcançar os valores de área da Tabela 7.

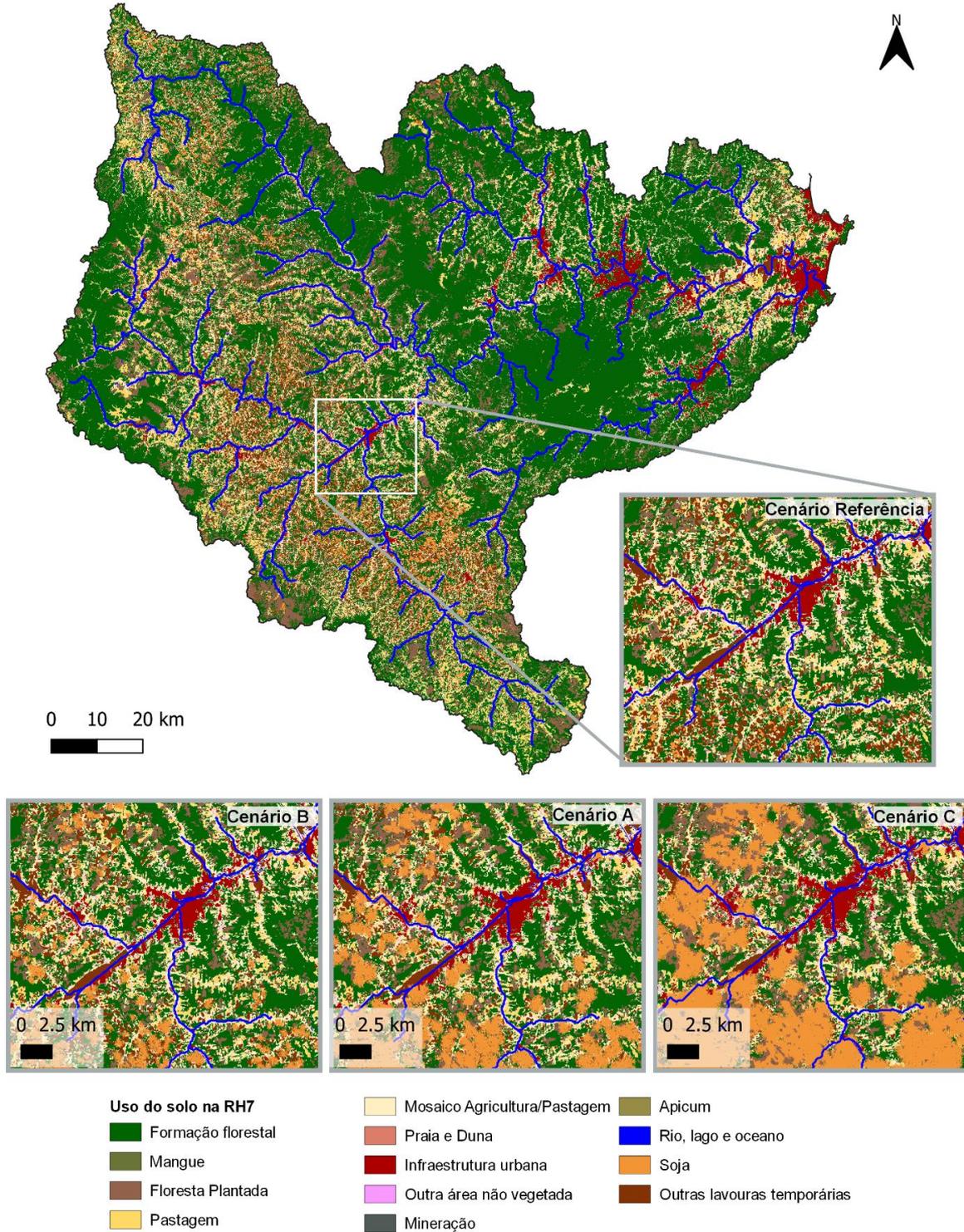
Figura 12 - Espacialização para os distintos cenários de simulação



Na Figura 12 fica evidente o elevado crescimento da Soja numa faixa na região oeste da bacia, enquanto a Infraestrutura urbana se estende ao redor dos centros urbanos na região nordeste e central. Pelo procedimento de geração de cenários de ocupação de solo descrito no item 3.5.1, não há surgimento de parcelas de soja desconectadas de outras parcelas do mesmo tipo, de forma que o crescimento apresenta um adensamento das parcelas nas regiões inicialmente rodeadas por estes cultivos e uma menor proporção de crescimento periférico. Por outro lado, dado que

a Infraestrutura urbana é densamente ocupada desde o início, o crescimento destas parcelas acontece principalmente na periferia.

Figura 13 - Detalhamento da espacialização para os distintos cenários de simulação, com destaque para uma região que apresenta crescimento dos usos de Soja, Infraestrutura urbana e Floresta plantada.



Na Figura 13 se apresenta o cenário de referência com o detalhamento de uma região contendo um curso d'água rodeado de Infraestrutura urbana crescente e diversos focos de expansão de Soja e Floresta plantada. Os cenários Realista (A), Otimista (B) e Pessimista (C) ilustram as possíveis situações projetadas para 2030, onde a cidade invade os mosaicos de outras agriculturas e formações florestais naturais, assim como um adensamento e expansão dos cultivos de Soja e Floresta plantada, substituindo as categorias “Outras lavouras temporárias” e “Mosaico Agricultura/Pastagem” que atualmente rodeiam os cultivos de soja. O interesse nesta região particular se dá pela proximidade destas alterações ao curso d'água, no qual se estudarão as modificações na vazão do rio em resposta às alterações nas componentes hidrológicas da região.

4.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NAS COMPONENTES HIDROLÓGICAS

Após realizar as simulações, foram analisados os volumes anuais das componentes hidrológicas para a Região Hidrográfica do Vale do Itajaí para verificar o balanço de massa na simulação. Os volumes anuais da precipitação, evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial e escoamento lateral são codensados na Tabela 8.

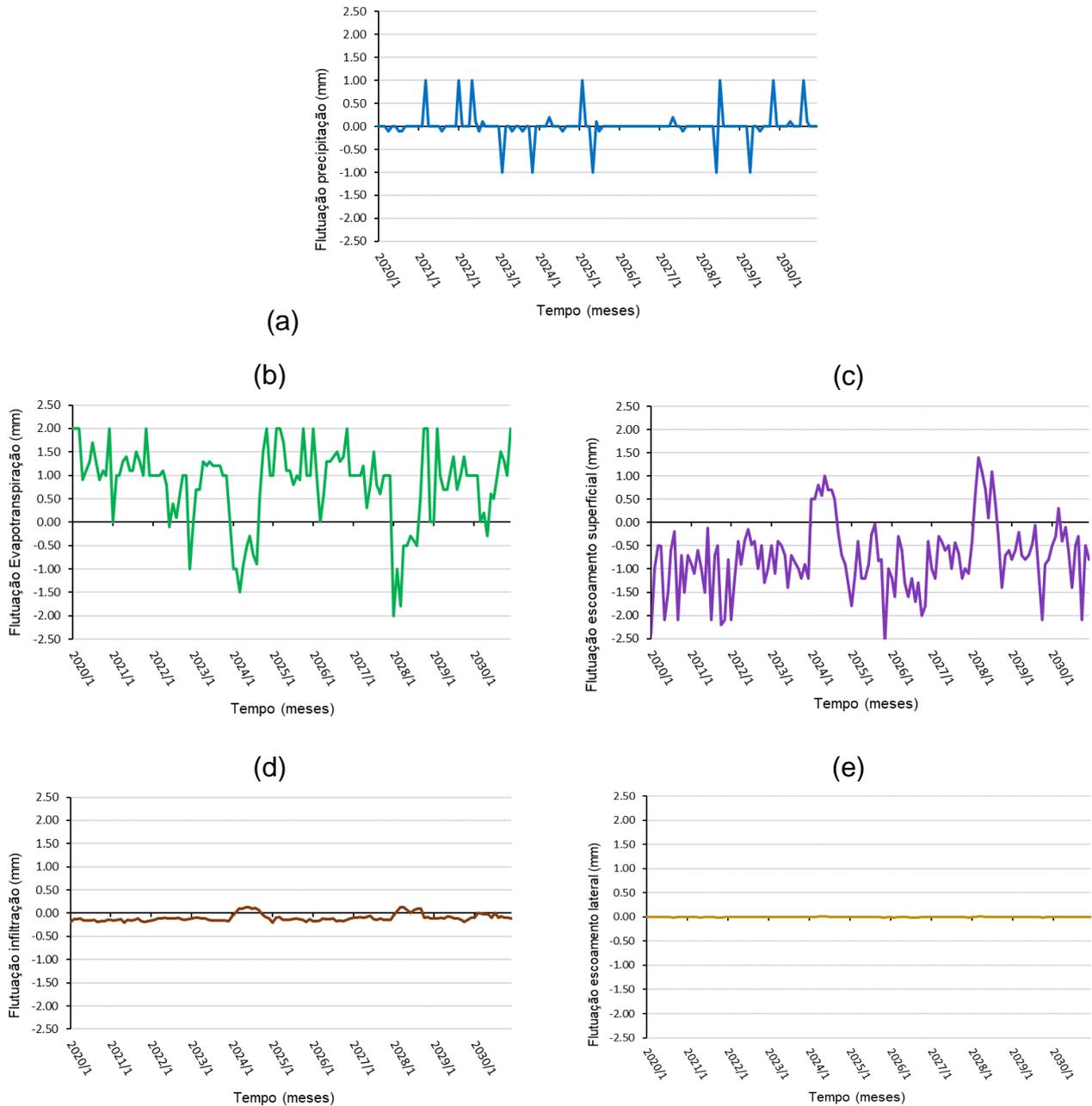
Tabela 8 - Balanço hídrico para os distintos cenários de simulação

Componente	Cenário Referência	Realista (A)	Otimista (B)	Pessimista (C)
Precipitação	1602	1602	1603	1603
Esc. Superficial	368	360	365	354
Evapotranspiração	1138	1147	1142	1154
Infiltração	93	92	93	91
Esc. lateral	3	3	3	3
Armazenamento	0	0	0	0

Nota-se que a evapotranspiração é a principal componente de saída de massa do sistema, seguida pelo escoamento superficial e a infiltração, respectivamente. Como mencionado no item 3.1, a RH7 possui a maior cobertura com vegetação nativa no Estado de Santa Catarina, o que torna a evapotranspiração uma componente importante no balanço hídrico.

Os valores absolutos dos volumes para os cenários A, B e C são próximos dos valores de referência, de modo que é mais conveniente fazer uma análise das flutuações das componentes com relação aos valores de referência. A análise mensal das flutuações das componentes hidrológicas realizada é apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Flutuações das componentes hidrológicas do Cenário Realista em relação ao Cenário Referência



Na Figura 14(a) a flutuação na precipitação para o cenário de tendência central (A) apresenta picos positivos e negativos em quantidades e proporções semelhantes, indicando uma simples flutuação estatística entre as chuvas do cenário de referência e o central, o que sugere que as mudanças na ocupação do solo não tem um efeito importante na ocorrência e distribuição das chuvas. A distribuição espacial será discutida mais detalhadamente numa próxima seção (4.3.1). Analogamente, a flutuação no escoamento lateral na Figura 14(e) apresenta uma variação insignificante que não contribuirá para mudanças no balanço de massa.

Por outro lado, na Figura 14(d) pode-se observar uma redução consistente na infiltração que pode indicar que o solo tornou-se menos permeável ou que recebeu menos água. Sendo que não houve uma mudança nos cenários de precipitação, uma diminuição no volume de água que permeia o solo pode indicar um aumento da interceptação, que é consistente com a substituição de pastagem e outros cultivos por cultivos de Soja e Floresta plantada.

Dado que não houve mudança significativa nos cenários de chuvas, escoamento lateral, e a diminuição da infiltração foi pequena, podemos esperar que haja um compromisso estreito entre a evapotranspiração e o escoamento superficial para atingir o balanço de massa. Isto quer dizer que um aumento de uma componente deve acarretar na diminuição da outra. Esta relação fica clara nas figuras Figura 14(b) e Figura 14(c), onde se observam flutuações amplas em contra-fase ao longo do tempo. Há um aumento claro na evapotranspiração, com variações de amplitude maior que 2mm e uma redução clara no escoamento superficial com variações semelhantes. Há também inversões esporádicas simultâneas de ambas componentes, onde se evidencia a sua correspondência no balanço de massa.

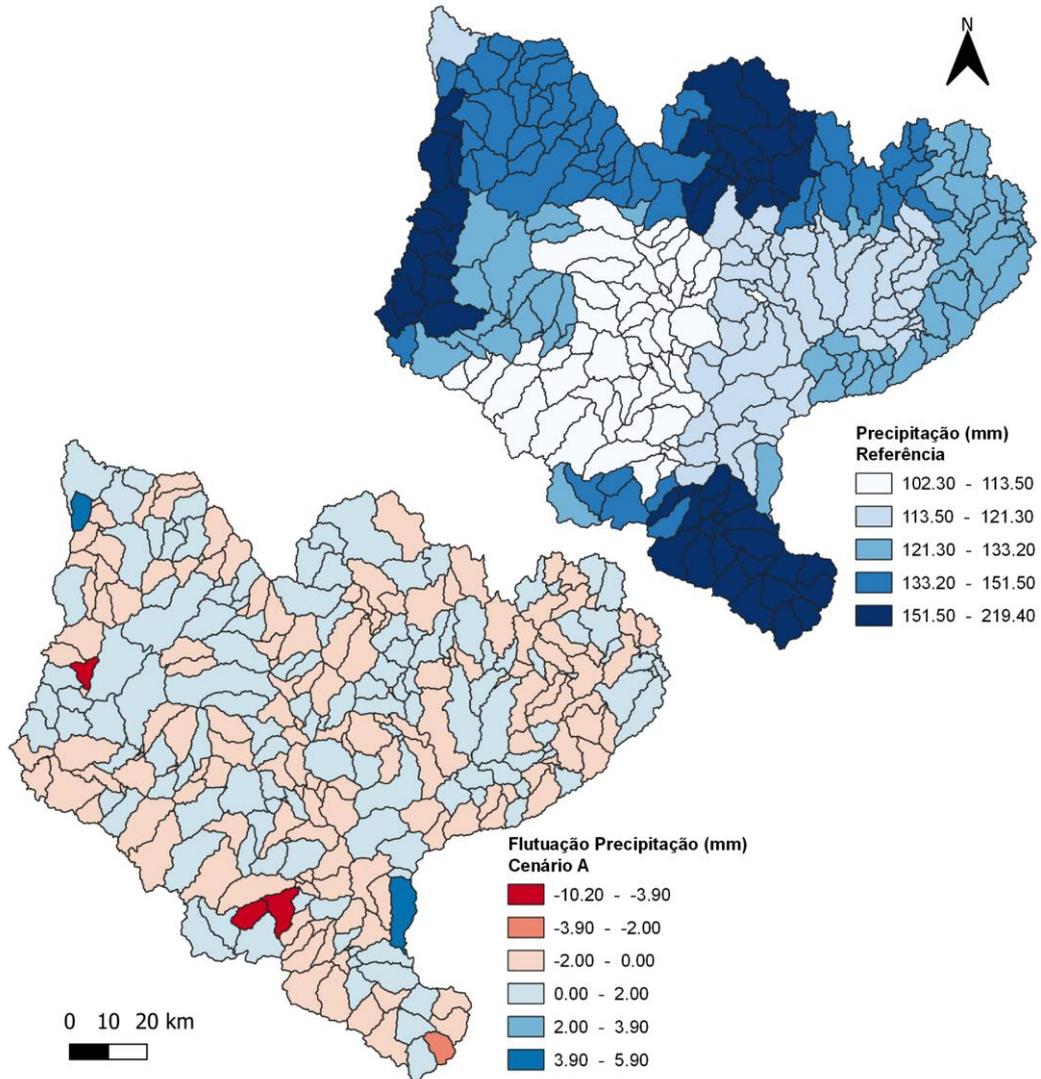
O aumento na evapotranspiração é consistente com um incremento da interceptação de chuvas causada pelo plantio industrial de soja e florestas, causando uma redução no volume de água que atinge o solo e levando a uma redução consistente do escoamento lateral e da infiltração. Por outro lado, o aumento da infraestrutura urbana torna o solo menos permeável, contribuindo à redução da infiltração e aumentando o escoamento superficial. No entanto, o crescimento urbano

é pequeno comparado com o de soja e da Floresta plantada, de modo que os efeitos dos últimos dominam o balanço hídrico.

4.3.1 PRECIPITAÇÃO

A Figura 15 apresenta a flutuação dos valores simulados do Cenário Realista (A) em relação ao Cenário Referência.

Figura 15 - Flutuação dos valores simulados para o Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para a componente precipitação

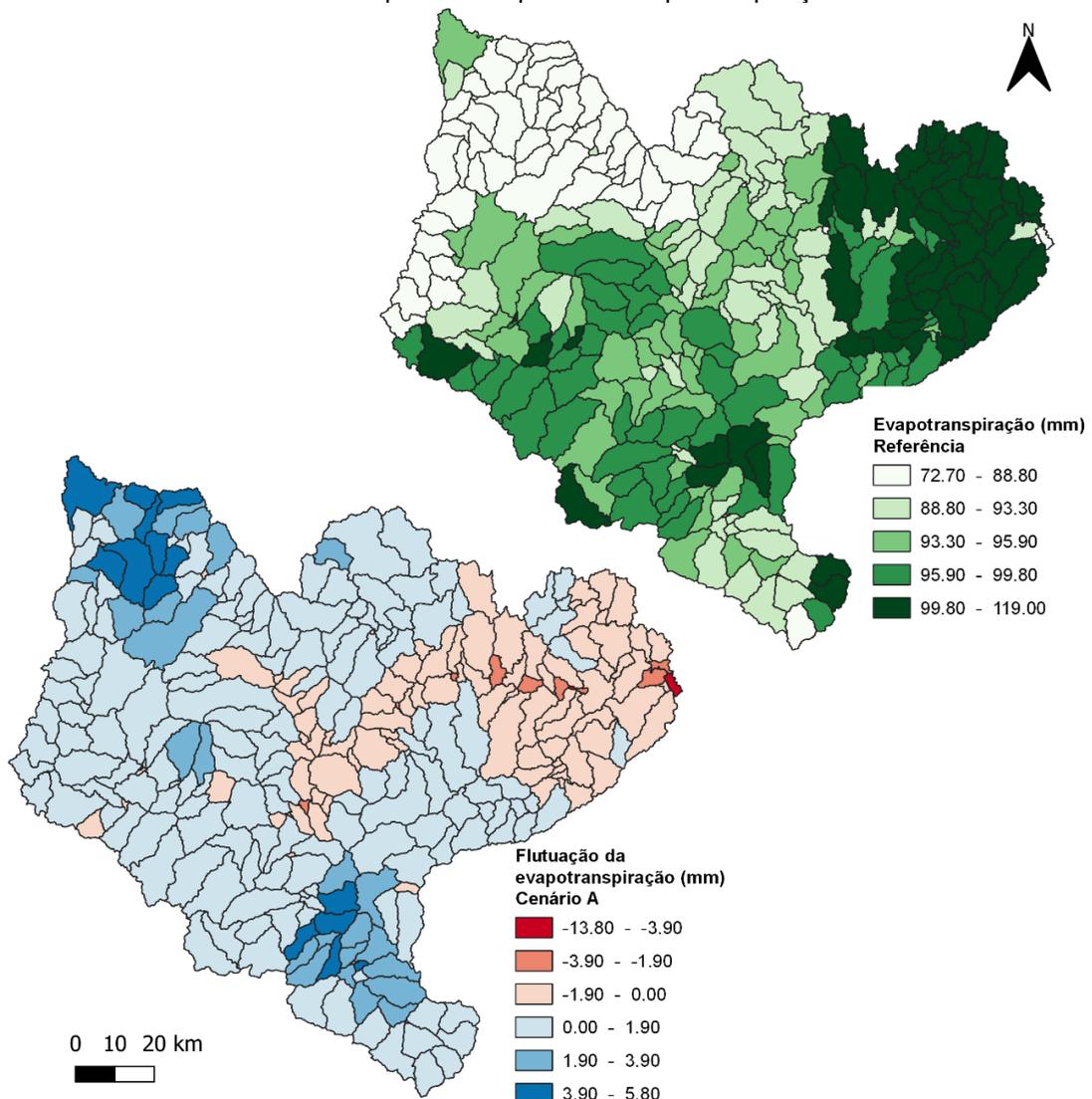


A partir da análise da Figura 15, é possível identificar que existe uma distribuição espacial natural das chuvas, porém, a forma em que se distribuem as variações nas sub-bacias, sem concentrações espaciais claras, demonstra que não há relação da distribuição das chuvas com o uso e ocupação do solo.

4.3.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A Figura 16 apresenta a flutuação dos valores simulados no Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para a componente hidrológica evapotranspiração, que variou de 72 a 119 mm.

Figura 16 - Flutuação dos valores simulados para o Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para a componente evapotranspiração

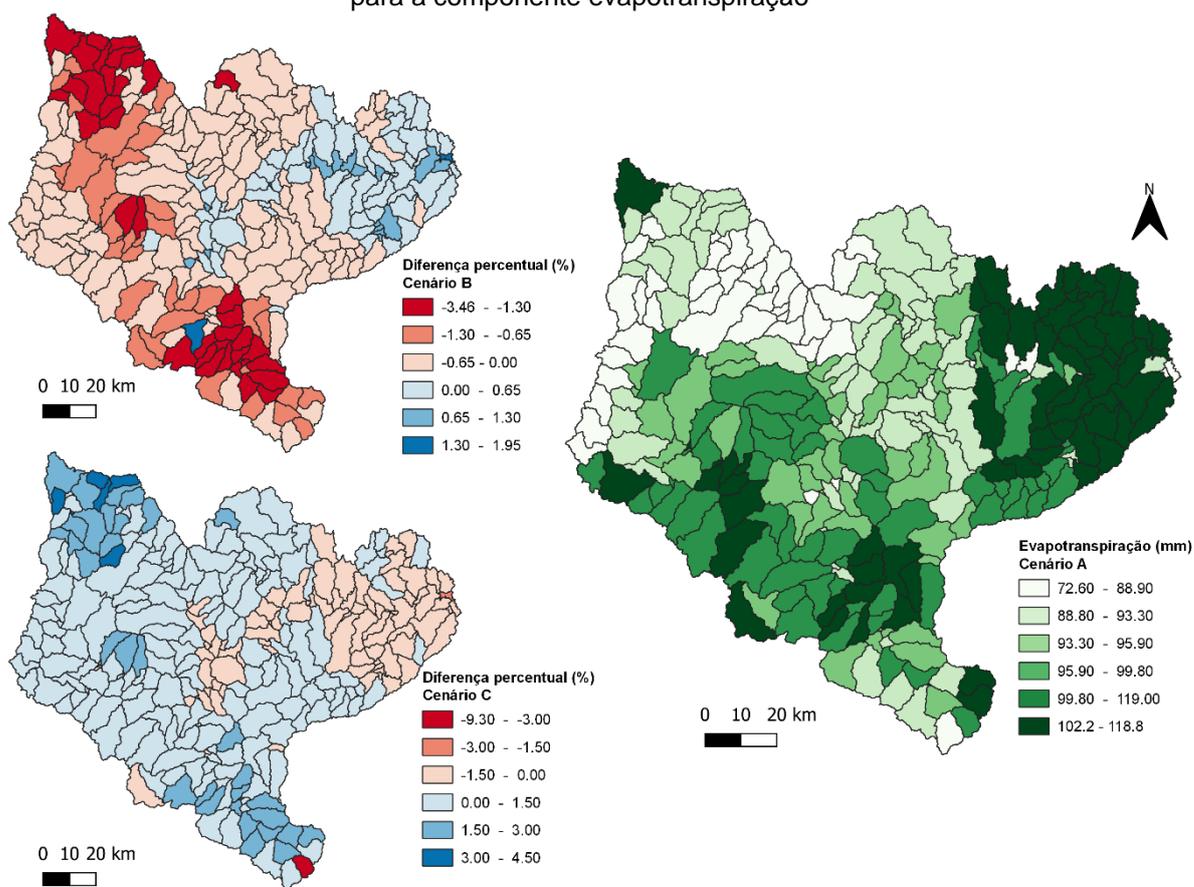


Conforme a Figura 16, a evapotranspiração tem tendência geral de aumento, principalmente nas regiões noroeste e sudeste da RH7. As flutuações negativas se concentram no extremo leste da bacia e nas sub-bacias que acompanham o curso do rio principal.

As regiões que apresentaram aumento da evapotranspiração são aquelas que contém, no geral, mais vegetação, incluindo os cultivos da soja e floresta plantada, enquanto que as regiões com diminuição da componente se correlacionam com as regiões mais urbanizadas. Os aumentos mais pronunciados na região sul e noroeste coincidem com adensamentos de soja no cordão de crescimento desta categoria.

As variações percentuais dos Cenário Otimista (B) e Pessimista (C) com relação ao Cenário Realista (A) são representadas na forma de diferença percentual na Figura 17.

Figura 17 - Diferença percentual dos cenários Otimista e Pessimista em relação ao Cenário Realista para a componente evapotranspiração



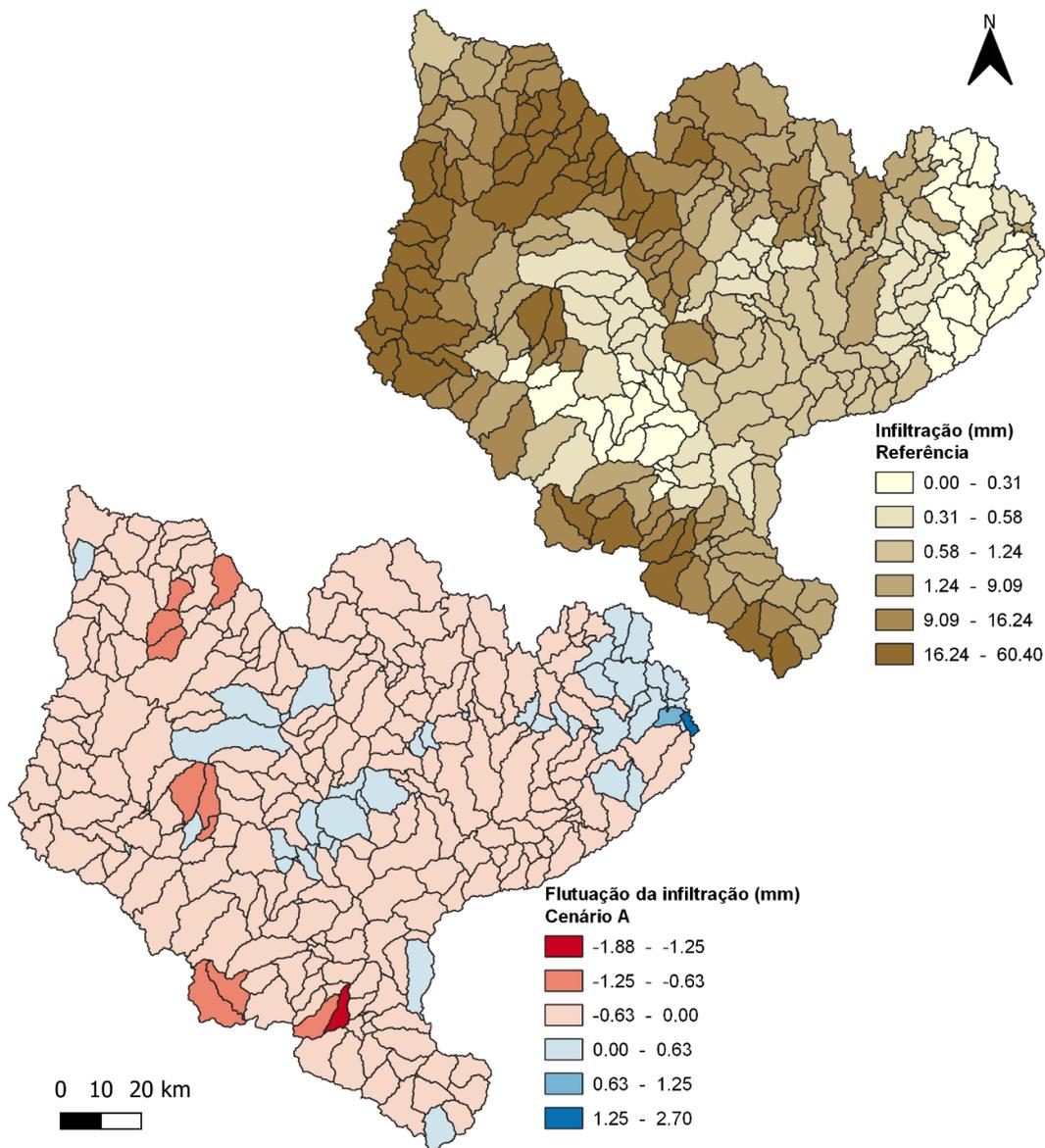
Em comparação com o Cenário Realista (A), o Cenário Otimista (B) apresenta um aumento da evapotranspiração na porção leste da bacia, enquanto a porção oeste apresenta uma diminuição. O oposto ocorre com o Cenário Pessimista (C), quando comparado ao Cenário Realista (A): houve aumento da evapotranspiração na região oeste e diminuição na região leste. Existe, então, uma complementaridade entre os mapas dos Cenários B e C.

As diferenças mais significativas se encontram nas áreas onde houve substituição de outros cultivos e pastagens por cultivos industriais de Soja, que apresentam maior evapotranspiração do que os cultivos pré-existentes. Como foi mencionado na análise temporal no item 4.3, a interceptação facilita a evapotranspiração e evita que a chuva chegue ao solo e infiltre ou escoe superficialmente.

4.3.3 INFILTRAÇÃO

A flutuação dos valores de infiltração encontrados para o Cenário Realista (A) em relação ao Cenário Referência se encontra na Figura 18. Para o Cenário Referência, a infiltração varia entre 0 e 60 mm. Percebe-se que houve uma diminuição generalizada dos volumes infiltrados na área da bacia, com alguns aumentos localizados e um aumento notável no extremo leste da RH7. Essa diminuição generalizada na infiltração se deve ao aumento também geral da evapotranspiração, que como discutido antes, está associado ao aumento da interceptação.

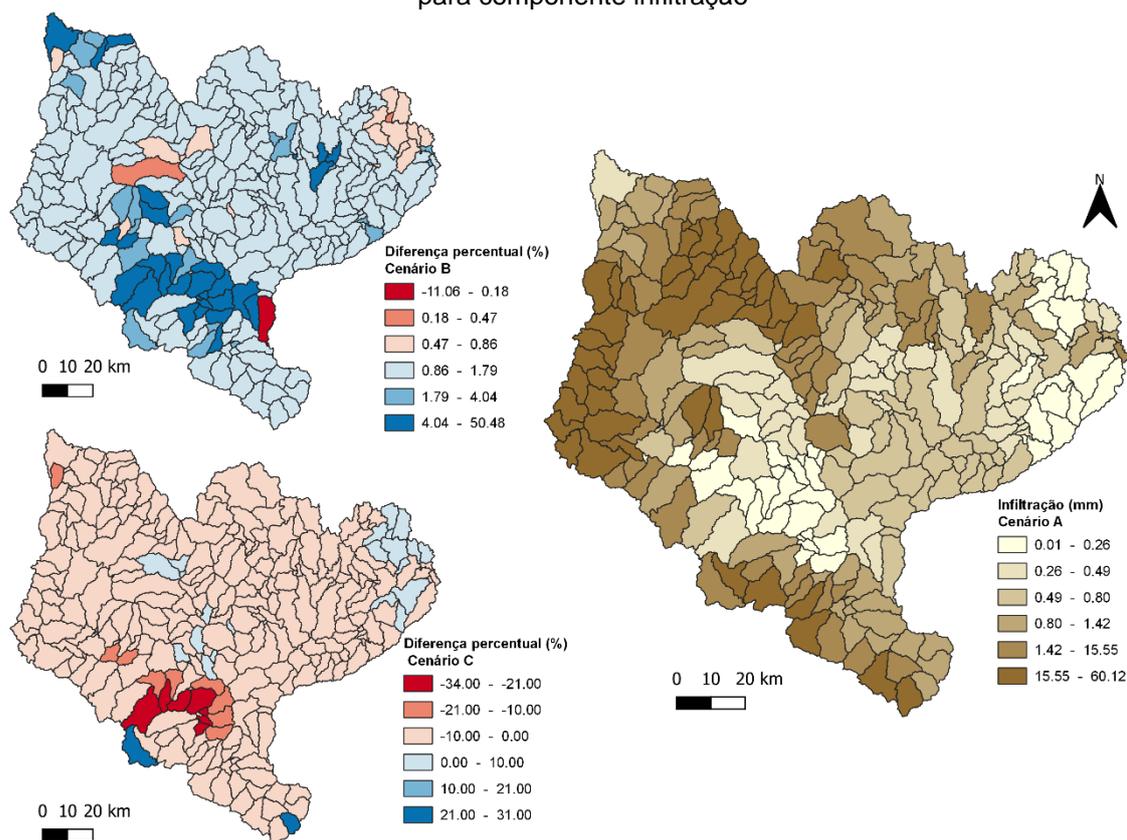
Figura 18 - Flutuação dos valores simulados para o Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para a componente infiltração



Chama a atenção que a sub-bacia que apresentou aumento mais expressivo de infiltração seja a mesma que abriga o centro urbano do município de Itajaí, que possui grande parte da sua área classificada como Infraestrutura urbana. Provavelmente isso ocorreu porque os solos da sub-bacia em questão são solos arenosos, que possuem maior capacidade de infiltração (Tabela 3), aliado ao aumento de até 2 mm de chuva em relação ao Cenário Referência, conforme Figura 15.

A Figura 19 apresenta a diferença percentual dos cenários Otimista (B) e Pessimista (C) em relação ao Cenário Realista (A) para a componente de infiltração. Os mapas apresentam a complementaridade quanto à diminuição e ao aumento percentual da infiltração na bacia.

Figura 19 - Diferença percentual dos cenários Otimista e Pessimista em relação ao Cenário Realista para componente infiltração

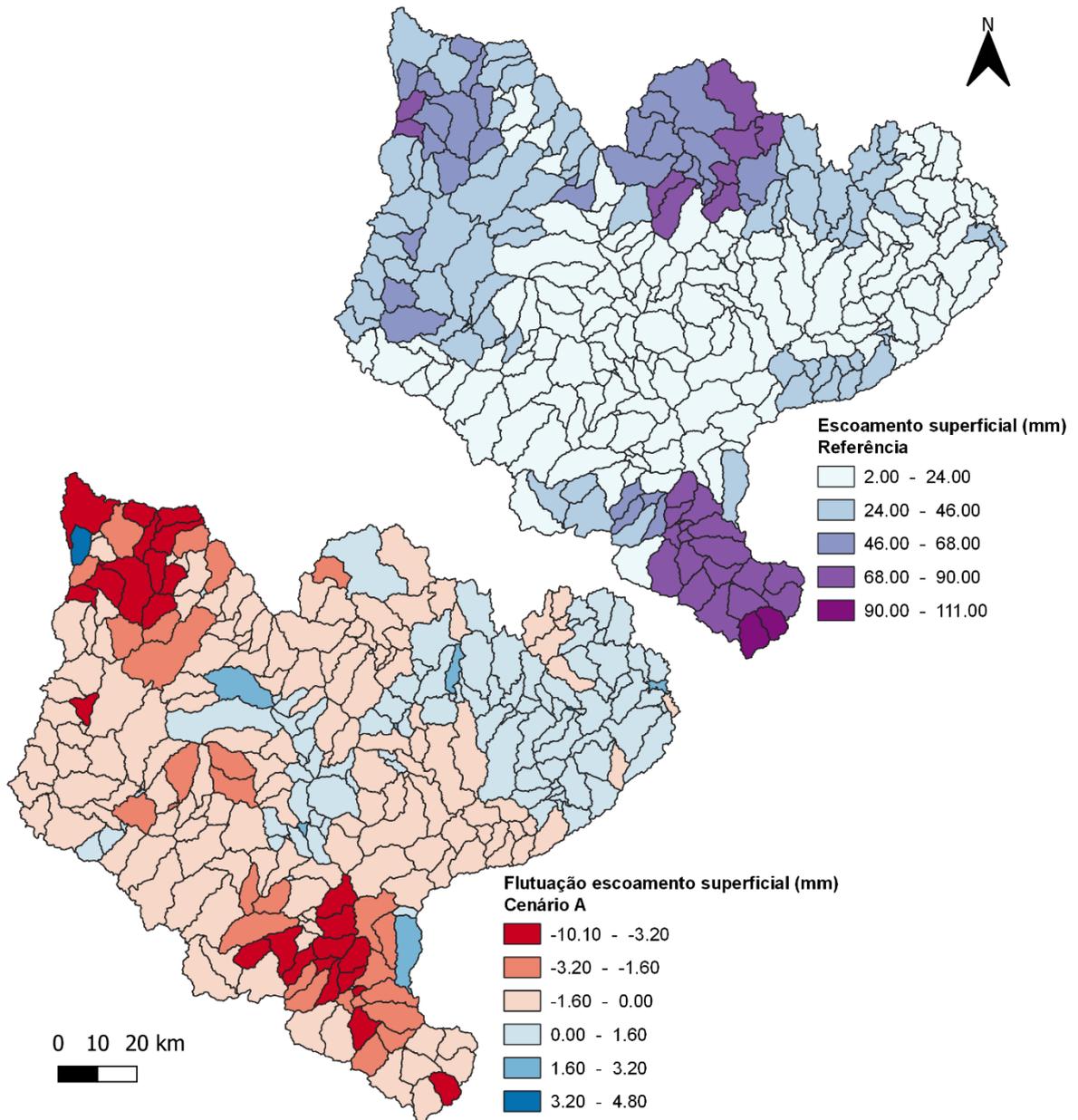


Da mesma forma que a componente de evapotranspiração, as diferenças percentuais mais proeminentes na infiltração ocorrem onde há o plantio de soja. Na região sudoeste da bacia, onde existe predomínio da soja e os valores da infiltração já são mais baixos (0,01 - 0,26 mm), a diferença percentual no Cenário Pessimista pode chegar a -34%, podendo afetar a recarga do aquífero. Já no Cenário Otimista (B), o aumento na infiltração pode chegar a 50% com a redução do cultivo de soja em relação ao Cenário Realista (A).

4.3.4 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Os valores do escoamento superficial para a RH7 variaram de 2 a 111 mm. As flutuações dos volumes de escoamento superficial do Cenário Realista (A) quando comparado ao Cenário Referência se encontram na Figura 20. Os maiores valores de escoamento superficial acontece em regiões mais chuvosas e que possuem declividades mais acentuadas.

Figura 20 - Flutuação dos valores simulados para o Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para a componente escoamento superficial

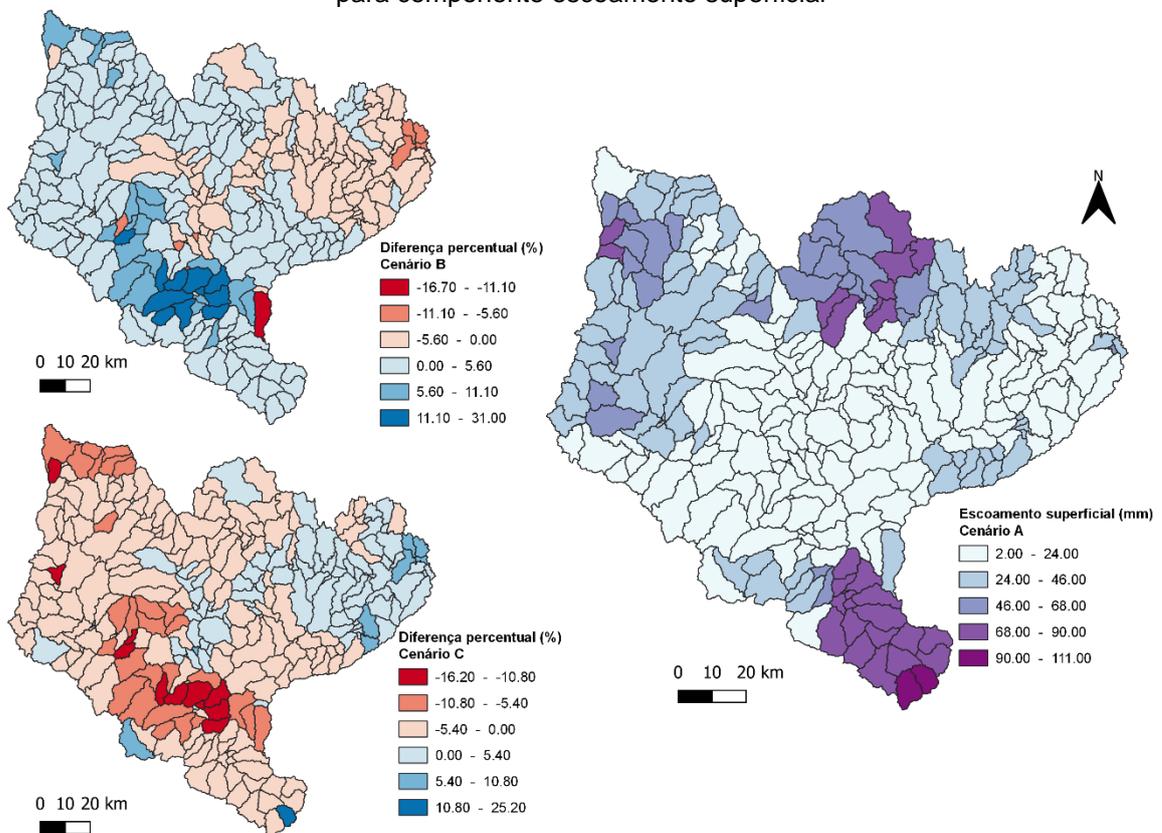


Nota-se que houve um leve aumento na região leste e nas sub-bacias que acompanham o curso do rio principal, enquanto que nas demais sub-bacias houve diminuição do escoamento superficial, principalmente nas regiões noroeste e sudoeste.

Como era esperado, a distribuição das flutuações do escoamento superficial se complementam com as flutuações encontradas para a evapotranspiração (Figura 16). De forma geral, nas áreas onde houve aumento de escoamento superficial houve diminuição da evapotranspiração e vice-versa. Nota-se ainda que o aumento no escoamento superficial ocorre nas regiões de crescimento da mancha urbana, o que é consistente com uma redução na permeabilidade do solo e a redução da vegetação, reduzindo a evapotranspiração.

As diferenças percentuais dos valores simulados para os cenários Otimista (B) e Pessimista (C) para o escoamento superficial nos permitem avaliar as variações destes cenários em relação ao Cenário Realista (A) (Figura 21).

Figura 21 - Diferença percentual dos cenários Otimista e Pessimista em relação ao Cenário Realista para componente escoamento superficial

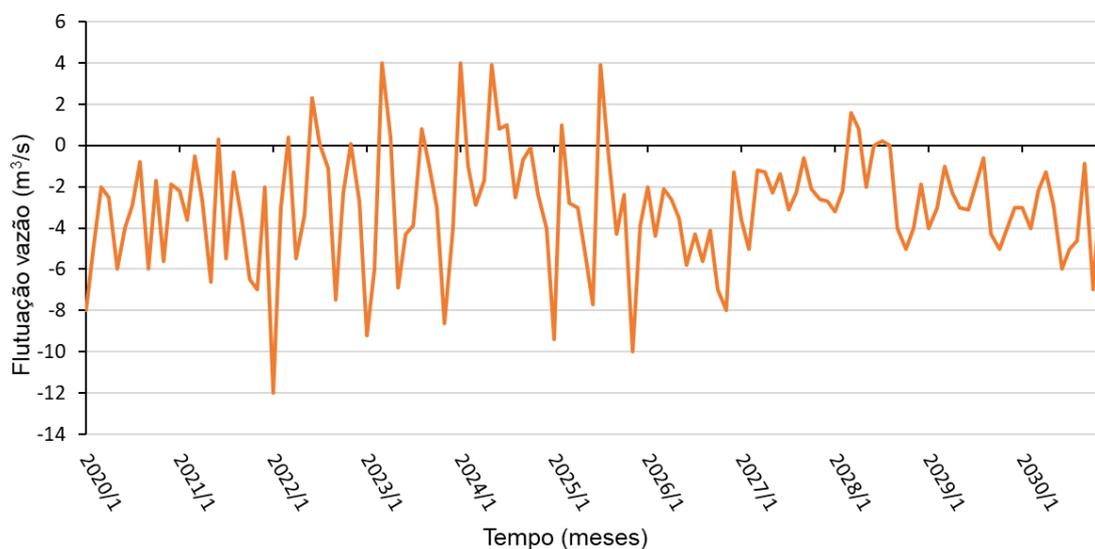


As sub-bacias que apresentam maior variação no escoamento superficial são aquelas em que houve aumento do cultivo de soja e de floresta plantada. Quanto maior e mais densa a ocupação por estes usos do solo, menor é o escoamento superficial nas áreas em questão.

Uma vez que o escoamento superficial e a infiltração diminuem, espera-se que haja uma diminuição também para a vazão nos canais. Por isso realizou-se a análise da vazão em um canal imediatamente a jusante de mudanças significativas no uso do solo, na região sudoeste da bacia, detalhada na Figura 13. O canal foi escolhido numa região que apresenta uma mancha urbana próxima de cultivos de soja.

A Figura 22 apresenta os valores da flutuação de vazão mensal do Cenário Realista (A) em relação ao Cenário Referência para o canal em questão. Pode-se notar que a média da variação se encontra em valores negativos, representando uma tendência geral de diminuição da vazão, com poucas ocorrências com valores positivos.

Figura 22 - Flutuação dos valores simulados para o Cenário Realista em relação ao Cenário Referência para vazão, do canal em estudo

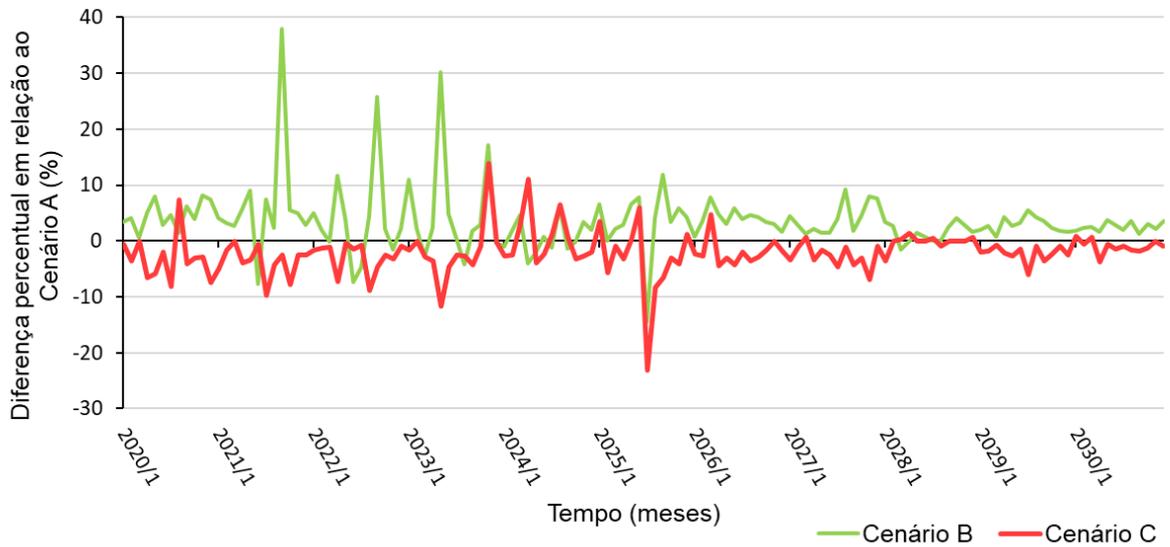


Nesta configuração de uso do solo, o crescimento da mancha urbana causa um aumento no escoamento superficial local, no entanto, ele não compensa a diminuição do escoamento superficial causado nos cultivos vizinhos. Desta maneira há uma simultânea redução do escoamento superficial e um aumento na

evapotranspiração, causando uma diminuição no volume de água que flui para o canal.

A Figura 23, que apresenta a diferença percentual dos cenários Otimista (B) e Pessimista (C) em relação ao Cenário Realista (A) para a vazão do canal, nos permite concluir que um aumento relevante do cultivo da soja e floresta plantada próximos aos centros urbanos podem causar a diminuição da vazão do canal.

Figura 23 - Diferença percentual dos cenários Otimista e Pessimista em relação ao Cenário Realista para vazão, do canal em estudo



5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve o objetivo de identificar as variáveis mais sensíveis frente às projeções de mudança de uso e ocupação do solo para a Região Hidrográfica do Vale do Itajaí, através da aplicação do modelo SWAT+. Para isso, identificou-se as tendências de mudança de uso do solo para a área de estudo e, com base na série histórica de 1985 a 2019, foram formulados diferentes cenários com valores projetados até o ano de 2035, com intervalo de confiança de 95%. Os cenários formulados consistem de um Cenário Referência, cujo valores de uso do solo adotado foi referente ao ano de 2019, um Cenário Realista, obtido a partir da curva de tendência central, um Cenário Otimista, obtido da curva de limite inferior do intervalo de confiança, e um Cenário Pessimista, obtido através da curva de limite superior. Estes cenários foram utilizados para simular a evolução das componentes hidrológicas entre os anos de 2020 a 2030.

Os usos do solo com maior tendência de crescimento para a Região Hidrográfica do Vale do Itajaí foram Floresta plantada, com tendência a estabilidade, Infraestrutura urbana, com crescimento linear, e Soja, com crescimento exponencial. No Cenário Pessimista, a ocupação dos usos Floresta plantada, Infraestrutura urbana e Soja passaram a representar, aproximadamente, 15%, 3,5% e 20,6% da área total da bacia hidrográfica.

Em todos os cenários simulados, a evapotranspiração foi a componente principal de saída de massa de água da fase terrestre do ciclo hidrológico, seguida do escoamento superficial, infiltração e escoamento lateral. As componentes mais sensíveis às mudanças de uso do solo na Região Hidrográfica do Vale do Itajaí foram evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração.

O aumento da Soja e da Floresta plantada causa um aumento geral da evapotranspiração e uma diminuição da infiltração e do escoamento superficial. Em contrapartida, o avanço da mancha urbana aumenta o escoamento superficial. Porém, como o crescimento da Infraestrutura urbana foi menos expressivo em comparação a Soja e a Floresta plantada, a produção de escoamento superficial não é suficiente para compensar a evapotranspiração, quando estes três usos do solo coexistem em uma sub-bacia.

Uma vez que a variação do escoamento lateral foi praticamente nula, a diminuição dos volumes de infiltração e escoamento superficial foram compensadas pelo aumento da evapotranspiração, para que se mantenha o balanço hídrico.

Dado que a infiltração e escoamento superficial diminuem simultaneamente, podemos sugerir que não há uma diminuição significativa na permeabilidade do solo por causa dos cultivos. Se fosse esse o caso, o escoamento superficial aumentaria enquanto a infiltração diminuiria. Como ambas as componentes sofrem redução quando aumentam os cultivos, podemos concluir que o aumento na interceptação de chuvas diminui a parcela de água que atinge o solo, causando ambos efeitos.

5.1.1 RECOMENDAÇÕES E LIMITAÇÕES

- Para a formulação de cenários com o uso do solo mais realista, deve-se levar em conta as dinâmicas de uso e ocupação do solo ao longo da série histórica.
- Uma vez que as variações das componentes hidrológicas causadas pela mudança do uso do solo foram identificadas para a região, é possível adicionar a análise de mudanças climáticas aos cenários de simulação.
- Sugere-se a aplicação do SWAT+ para a Região Hidrográfica do Vale do Itajaí para obtenção de resultados para a qualidade da água.
- Levando em consideração a influência da declividade nos processos hidrológicos, sobretudo na geração de escoamento superficial, sugere-se que sejam definidas um número maior de classes de declividade na entrada do modelo.
- Na conversão das classificações encontradas no MapBiomas para códigos do SWAT, a vegetação nativa foi convertida para Floresta Decídua, quando a conversão mais acurada seria para Floresta Perene por conta da presença de Floresta Ombrófila Mista na região, podendo ter causado alterações nos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHI, K.; BAZARGAN, A.; MCKAY, G. Water Balance Models in Environmental Modelling. In: HUSSAIN, Chaudhery Mustansar (ed.). **Handbook of Environmental Materials Management**. Cham: Springer Nature, 2019. p. 1-16.
- ARNOLD, J. G. et al. **SWAT**: Model use, calibration and validation. 2012. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/90102/azdezasp.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2021.
- BARBOSA, L. N., et al. **Planejamento urbano de bacias hidrográficas**. UERN: 2018.
- BRIGHENTI, T. M. **Modelagem hidrológica e avaliação de diferentes métodos de calibração para o modelo SWAT**. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- BRIGHENTI, T. M. **Uso do Modelo SWAT e Modelos de Clima na análise da disponibilidade hídrica**: um estudo com bacias de Santa Catarina. 2019. 103 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- CARNEIRO, P. R. F.; CARDOSO, A. L.; AZEVEDO, J. P. S. O planejamento do uso do solo urbano e a gestão de bacias hidrográficas: o caso da bacia dos rio iguaçu/sarapuí na baixada fluminense. **Cadernos Metr pole**. São Paulo, p. 165-190. jun. 2008.
- CGIAR. **SRTM 90m DEM Digital Elevation Database**. Disponível em: <https://srtm.csi.cgiar.org/>. Acesso em: 07 mar. 2021.
- CHAWANDA, C. J. **SWAT+ Toolbox: User Manual**. 2021. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/software/plus/>. Acesso em 25 mar 2021.
- CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W.. **Applied Hydrology**. Austin: McGraw-Hill, 1987.
- DAVIE, T. **Fundamentals of Hydrology**, 2 ed. 2008.
- DEVIA, G. K.; GANASRI, B.P.; DWARAKISH, G.s.. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, [S.L.], v. 4, p. 1001-1007, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214241X15001273>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- EMBRAPA. **Mapa de solos de Santa Catarina**. 2004. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Alev_sc_estado_solos_lat_long_wgs84#category-more. Acesso em: 07 mar. 2021.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classifica o de Solos**. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em: 07 mar. 2021.
- EMBRAPA. **SRTM**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/srtm>. Acesso em: 07 mar. 2021.

EASTON, Zachary M.; BOCK, Emily. **Hydrology Basics and the Hydrologic Cycle**. 2015. Disponível em: https://ext.vt.edu/content/dam/ext_vt_edu/topics/agriculture/water/documents/Hydrology-Basics-and-the-Hydrologic-Cycle.pdf. Acesso em: 25 mar. 2021.

FUNDAÇÃO AGÊNCIA DE ÁGUA DO VALE DO ITAJAÍ. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Itajaí**: Caderno síntese. 2010. Disponível em: 0. Acesso em: 28 abr. 2021.

HUNTINGTON, T. G. **Climate Warming-Induced Intensification of the Hydrologic Cycle**: an assessment of the published record and potential impacts on agriculture. An Assessment of the Published Record and Potential Impacts on Agriculture. 2010. United States Geological Survey. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258046230_Climate_Warming-Induced_Intensification_of_the_Hydrologic_Cycle_An_Assessment_of_the_Published_Record_and_Potential_Impacts_on_Agriculture. Acesso em: 25 mar. 2021.

IVEZIC, V.; BEKIC, D.; ZUGAJ, R.. A Review of Procedures for Water Balance Modelling. **Journal Of Environmental Hydrology**. Nao Sei, p. 1-20. fev. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319204170_A_Review_of_Procedures_for_Water_Balance_Modelling. Acesso em: 28 abr. 2021.

KUWAJIMA, Julio Issao *et al.* **Proposta da aplicação do modelo SWAT como ferramenta complementar de gerenciamento de recursos hídricos e estimativa de assoreamento em reservatórios**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/51998289_Proposta_da_aplicacao_do_modelo_SWAT_como_ferramenta_complementar_de_gerenciamento_de_recursos_hidricos_e_estimativa_de_assoreamento_em_reservatorios. Acesso em: 25 mar. 2021.

MAPBIOMAS. **Conheça o MapBiomas**: o projeto. O projeto. 2020. Disponível em: <https://mapbiomas.org/o-projeto>. Acesso em: 14 mar. 2021.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**. São Paulo, p. 83-96. ago. 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200006. Acesso em: 15 abr. 2021.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F.. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos. **Brazilian Journal Of Aquatic Science And Technology**. Itajaí, p. 53-64. jul. 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/49616606>. Acesso em: 31 mar. 2021.

Mishra S.K., Singh V.P. **SCS-CN Method**. In: Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. Water Science and Technology Library, vol 42. Springer, Dordrecht: 2003. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1_2

MOREIRA, L. L.; SCHWAMBACK, D.; RIGO, D.. Sensitivity analysis of the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model in streamflow modeling in a rural river basin. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 13, n. 6, p. 1-12, nov. 2018.

MORIASI, D. N. *et al.* Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions Of The Asabe**. St. Joseph, p. 885-900. mar. 2007.

NCAR. National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). 2017. "**The Climate Data Guide: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)**". Disponível em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>. Acesso em: 14 mar 2021.

NCDC. NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER. **Climate Forecast Systems (CFS)**. 2011. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2>. Acesso em: 14 mar. 2021.

NEITSCH, S. L. *et al.* **Soil & Water Assessment Tool**: theoretical documentation. Version 2009. 2011. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/docs/>. Acesso em: 07 mar. 2021.

RAMOS, R. A. Logistic function as a forecasting model: it's application to business and economics. **International Journal of Engineering and Applied Sciences**. Islamabad, p. 29-36. mar. 2013.

RENNÓ, Camilo Dalles; SOARES, João Viane. **Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. INPE. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf. Acesso em: 07 dez. 2020.

SDS. Secretaria do desenvolvimento Econômico Sustentável. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina**. 2018. Disponível em: <https://www.sds.sc.gov.br/>. Acesso em: 28 abr. 2021.

TEXAS A&M AGRILIFE RESEARCH. **Global Weather Data for SWAT**. Disponível em: <https://globalweather.tamu.edu/>. Acesso em: 14 mar. 2021.

USDA. **About SWAT+**. Disponível em: <https://swatplus.gitbook.io/docs/>. Acesso em: 07 mar 2021.

USGS. United States Geological Survey. **Climate change**: evaluating your local and regional water resources. 2015. Evaluating your local and regional water resources. Disponível em: <https://www.usgs.gov/>. Acesso em: 28 abr. 2021

WANG, Xiujie et al. **Effects of Human Activities on Hydrological Components in the Yiluo River Basin in Middle Yellow River**. *Water*, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 689-704, 3 abr. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11040689>