



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

WESLEY AUGUSTO CAMPANHARO

ANÁLISE DO MODELO DE CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO VARIÁVEL (VIC)
PARA AS BACIAS DOS RIOS SANTA MARIA DA VITÓRIA E JUCU

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

AGOSTO – 2013

WESLEY AUGUSTO CAMPANHARO

ANÁLISE DO MODELO DE CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO VARIÁVEL (VIC)
PARA AS BACIAS DOS RIOS SANTA MARIA DA VITÓRIA E JUCU

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio
Co-orientador: Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti
Co-orientador: Prof. Dr. Jeffrey Edward Richey

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

AGOSTO – 2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

C186a Campanharo, Wesley Augusto, 1987-
Análise do modelo de capacidade de infiltração variável (VIC) para
as bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu / Wesley Augusto
Campanharo. - 2013.
78 f. : il.

Orientador: Roberto Avelino Cecílio.

Coorientador: Sidney Sára Zanetti.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Hidrologia. 2. Bacias hidrográficas - Manejo - Espírito Santo
(Estado). 3. Gestão territorial. 4. Modelagem - Aspectos ambientais. I.
Cecílio, Roberto Avelino. II. Zanetti, Sidney Sára. III. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDU: 630

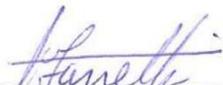
**ANÁLISE DO MODELO DE CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO VARIÁVEL
(VIC) PARA AS BACIAS DOS RIOS SANTA MARIA DA VITÓRIA E JUCU**

Wesley Augusto Campanharo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 30 de Agosto de 2013.


Prof. Dr. Alexandre Candido Xavier
UFES
Membro Externo


Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti
UFES
Coorientador


Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio
UFES
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha família, e em todas as suas ramificações e agregamentos existentes, por todo o apoio e encorajamento que me proporcionaram, principalmente aos meus pais, por mais uma vez acreditarem nos meus estudos.

Aos familiares existentes em Alegre pelos salvamentos de vida: Lidiane, Didio, Elziane, Jackson, Fernandinha, ao complexo Italo/Tia Dute/Zé Ricardo.

Agradeço aos meus grandes amigos de todos os períodos de universidade e pós-graduação: Brunela, Daniele e Huezer. Aos que foram agregados ao caminho: Fernando, Carlos, Felipe, Vitor, Gustavo, Marcos, Lucas, Igor.

A todos que passaram pelo Laboratório de Geoprocessamento, no qual me proporcionaram um estágio “voluntário” em modelagem hidrológica: Hugo Roldi, Leo Nazário (Hidrobacia); Danilo Fukunaga (SWAT); Maycon Patrício (TOPMODEL). Nem todos os “avisos” adiantaram, mas fizeram menos doloroso o processo de modelagem. E a todos os outros demais bolsistas que indiretamente tornaram menos difícil o processo de conclusão desta dissertação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, principalmente ao meu Orientador Roberto Avelino Cecílio, por mais uma vez me aturar, ao meu Coorientador Sidney Sára Zanetti por surgir com conselhos e direcionamentos em momentos estressantes.

As aulas de programação oferecidas em horários especiais pelos Professores, Alexandre Candido Xavier, Helder de Amorim Mendes e Clayton Vieira Fraga Filho. Sem os seus conceitos possivelmente eu estaria até hoje na esperança do modelo rodar, e copiando e colando tabelas.

A Capes pela bolsa concedida durante o programa de pós-graduação, e experiência em docência proporcionada. A FAPES pela oportunidade e apoio para estabelecer conexão com os membros da Universidade de Washington, principalmente na figura do prof. Jeffrey, Amanda e Harvey, ajudando-me em grandes e importantes partes desta dissertação, e as amizades realizadas em terras americanas (Chhimi, Deki, Joanna, Taylor e Alexandra)

RESUMO

CAMPANHARO, Wesley Augusto. **Análise do modelo de Capacidade de Infiltração Variável (VIC) para as bacias do rio Santa Maria da Vitória e Jucu.** 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES. Orientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio. Co-orientador: Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti.

A modelagem hidrológica é uma técnica que possibilita o melhor entendimento e representação do comportamento hidrológico de bacias. O modelo hidrológico de Capacidade de Infiltração Variável (VIC) é um modelo de macroescala, o qual simula os processos de transferência vertical de água e energia. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a aplicabilidade do VIC para duas bacias hidrográficas do estado do Espírito Santo, tomadas pelo Governo Estadual como prioritárias para estudos hidrológicos: Jucu e Santa Maria da Vitória. Para tanto, obteve-se informações de solo, vegetação e clima, que posteriormente foram agregadas a informações de relevo para obter os dados de vazão simulada. Inicialmente, separou-se 5 anos de dados climáticos (1992 a 1996) para o processo de calibração do VIC, que envolveu tanto a obtenção da melhor resolução, quanto a melhor combinação dos parâmetros calibráveis. Este processo se deu por meio da comparação entre as vazões simuladas e observadas de postos fluviométricos existentes nas duas bacias. De posse das melhores combinações entre os parâmetros de entrada encontrados para cada posto fluviométrico, realizou-se o processo de teste de desempenho do modelo, que consistiu em verificar a aderência das vazões simuladas pelo VIC com aquelas medidas, em uma nova série de 5 anos (1997 a 2001). Com o melhor conjunto resolução/combinação, foram realizadas simulações de alterações de uso do solo, considerando-se três cenários diferentes: CM1 – considera a aplicação do projeto corredores ecológicos na região; CM2 – considera o aumento de 20% na cobertura florestal; CM3 – considera o aumento de 50% na cobertura florestal. Para as 1024 combinações testadas, apenas para o posto da bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória, foram observados valores positivos do coeficiente de eficiência de Nash. O período do teste do desempenho do modelo apresentou o mesmo comportamento; porém, a simulação de vazões mínimas e médias teve comportamento melhor. Ao se

analisar as modificações nas vazões provenientes de cada cenário simulado, observou-se uma diminuição no escoamento superficial e no deflúvio, na medida em que se incrementou a cobertura florestal. O presente trabalho obteve resultados insatisfatórios para dois de três postos de controle, e para simulação de vazões mínimas e médias, podendo ser reflexo do tipo de calibração, juntamente com o conjunto de possíveis erros inerentes aos arquivos de entrada e/ou deficiência de parametrização do modelo hidrológico.

Palavras-chave: recursos hídricos; gestão territorial; modelagem hidrológica

ABSTRACT

CAMPANHARO, Wesley Augusto. **Analysis of the variable infiltration capacity model (VIC) for the basins of Santa Maria da Vitória and Jucu.** 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES. Adviser: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio. Co-adviser: Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti.

Hydrological modeling is a technique that enables a better understanding and representation of the hydrological behavior of watersheds. The Variable Infiltration Capacity (VIC) is a macroscale model, which simulates vertical transfer water and energy processes. The objective of this study was to evaluate the applicability of the VIC for two watersheds that the government of Espírito Santo made priority basins for hydrological study: Jucu and Santa Maria da Vitória. Therefore we obtained information of soil, vegetation and climatic, which were then aggregated to elevations data for obtain flow data simulated. Initially was separated 5 years of weather data (1992 a 1996) for the calibration process involving both obtaining the best resolution, as the best combination of parameters calibrated. This selection process was through the correspondence between the observed and simulated flows. Having the best combination found for each gaging station, began the validation process, which consisted of verifying the adherence of the model using a new series of 5 years (1997 a 2001). With the best resolution/combination was performed simulations of changes landscape, with three different scenarios of use and vegetation cover: CM1- considerer the application of ecological corridor's project; CM2 – considerer the increase of 20% of forestry; CM3 – considerer the increase of 50% of forestry. For the 1024 combinations tested, only for the Santa Maria station inside the Santa Maria da Vitória basin was observed positive values of Nash. The validation process showed the same behavior, but the simulation of low and medium flows had better results. When analyzing the changes in flux rates from each simulated scenario, observed a decrease in runoff while increase the forest cover. The present work was unsatisfactory for two of three checkpoints and for simulation of low and medium flows, and may be can be a reflection of the type

of calibration, together with the set of possible errors inherent in input files and/or deficiency of hydrological model parameterization.

Keywords: water resources, territorial management, hydrological modeling.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição da população urbana e rural nos municípios abrangidos pelas bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu.....	29
Tabela 2. Valor do Produto Interno Bruto em porcentagem, por setores econômicos e por município do ano de 2010.....	30
Tabela 3. Parâmetros necessários para criar o arquivo <i>solo.Bacia</i> como entrada no modelo VIC	35
Tabela 4. Estações pluviométricas e meteorológicas utilizadas no estudo	38
Tabela 5. Parâmetros necessários para criação do arquivo <i>veglibray</i> , como entrada no modelo VIC	40
Tabela 6. Parâmetros necessários para criação do arquivo <i>vegparam</i> , como entrada no modelo VIC	40
Tabela 7. Reclassificação dos tipos de uso e cobertura vegetal encontradas no estado do Espírito Santo, através do mapa do IJSN para a classe disponível pelo levantamento do LDAS	42
Tabela 8. Postos fluviométricos utilizados no estudo.....	46
Tabela 9. Valores utilizados no processo de calibração, para os cinco parâmetros passíveis de calibração.....	48
Tabela 10. Valores de referência para os coeficientes de Nash (R_{nash}) e de Nash para logaritmos das vazões (R_{log})	49
Tabela 11. Dez melhores combinações dos parâmetros encontrados no período de calibração para as três estações de controle	54
Tabela 12. Resultados das melhores combinações encontradas na calibração do modelo VIC, para o período do teste do desempenho do modelo, para o rio Santa Maria da Vitória (STAMA), nas diferentes resoluções.....	57
Tabela 13. Resultados das melhores combinações encontradas na calibração do modelo VIC, para o período do teste do desempenho do modelo, para o rio Jucu Braço Norte (JUCUM), nas diferentes resoluções.	58
Tabela 14. Resultados das melhores combinações encontradas na calibração do modelo VIC, para o período do teste do desempenho do modelo, para rio Jucu (JUCUE), para as diferentes resoluções.....	59

Tabela 15. Valores de deflúvio médio (\bar{Q}) e de variação da lâmina em relação a melhor combinação (ΔV) para os cenários projetados de uso e cobertura do solo	63
Tabela 16. Valores de escoamento superficial médio (\bar{E}_s) e de variação do volume de escoamento superficial em relação a melhor combinação(ΔV) para os cenários projetados de uso e cobertura do solo.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do modelo VIC, com detalhe das curvas de infiltração e de fluxo de base, e do mosaico da cobertura vegetal.	22
Figura 2. Representação esquemática do modelo de roteamento de vazões.	26
Figura 3. Mapa de localização das bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu, com os respectivos municípios de abrangência.	28
Figura 4. Limite da área de estudo: bacias hidrográficas dos rios Jucu e Santa Maria da Vitória.	31
Figura 5. Mapa de solos da EMBRAPA reclassificado segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América.	36
Figura 6. Estações pluviométricas e meteorológicas utilizadas no estudo.	39
Figura 7. Mapa de uso e cobertura vegetal da área em estudo.	41
Figura 8. Valores para a direção de escoamento do ArcGIS e de entrada no modelo Route.	46
Figura 9. Estações fluviométricas utilizadas no presente estudo.	47
Figura 10. Variação do tamanho da bacia em relação ao tipo de resolução utilizada.	51
Figura 11. Comparação entre a vazão simulada pelo modelo VIC, para o mesmo período quando: (a) se utiliza os tamanhos das bacias inseridas no modelo; (b) e quando se utiliza o tamanho real da bacia.	53
Figura 12. Hidrograma da melhor combinação (C348) com a melhor escala (1/12 ^o) para a sub-bacia do rio Santa Maria da Vitória.	61
Figura 13. Hidrograma da melhor combinação (C348) com a melhor escala (1/12 ^o) para a sub-bacia do rio Jucu Braço Norte.	61
Figura 14. Hidrograma da melhor combinação (C348) com a melhor escala (1/12 ^o) para a sub-bacia do rio Jucu.	62
Figura 15. Hidrograma da melhor combinação e dos cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Santa Maria da Vitória.	64
Figura 16. Detalhe para as vazões menores de 50 m ³ .s ⁻¹ do hidrograma da melhor combinação e dos cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Santa Maria da Vitória.	64

Figura 17. Hidrograma da melhor combinação e os cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Jucu Braço Norte.....	65
Figura 18. Detalhe para as vazões menores de $50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ do hidrograma da melhor combinação e os cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Jucu Braço Norte.	65
Figura 19. Hidrograma da melhor combinação e os cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Jucu.....	66
Figura 20. Detalhe para as vazões menores de $50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ do hidrograma da melhor combinação e os cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Jucu.	66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Gestão dos recursos hídricos	16
2.2. Modelos hidrológicos	17
2.3. Modelo hidrológico variable infiltration capacity (VIC)	19
2.3.1. Visão geral dos processos no modelo VIC.....	21
2.3.2. Visão geral do processo do modelo ROUTE	25
2.3.3. Aplicações do modelo VIC	26
2.4. Bacia hidrográfica dos rios Santa Maria da Vitoria e Jucu.....	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. Descrição da área de estudo	31
3.2. Programas computacionais utilizados	32
3.3. Bases e fontes de dados do vic	33
3.3.1. Informações de controle	33
3.3.2. Dados de solo	34
3.3.3. Dados climáticos	37
3.3.4. Dados de cobertura vegetal	40
3.4. Bases e fontes de dados do programa route	43
3.4.1. Informações de controle	43
3.4.2. Fração da área	43
3.4.3. Direção de escoamento.....	44
3.4.4. Localização dos postos fluviométricos	46
3.5. Calibração	47
3.6. Teste do desempenho do modelo	49
3.7. Modelagem de cenários	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5. CONCLUSÕES.....	68
6. RECOMENDAÇÕES	70
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso limitado, sendo utilizada por diferentes tipos de usuários em residências, indústrias e, principalmente, em atividades agrícolas. Nas últimas décadas, este recurso natural teve sua demanda de uso aumentada pelo rápido crescimento populacional e aceleração do desenvolvimento econômico, ao mesmo tempo em que sua qualidade diminuiu em função de diversas fontes de poluição que atingem os corpos hídricos. Desta forma a água tornou-se uma das maiores preocupações do poder público, dos comitês de bacias hidrográficas, dos usuários e da sociedade em geral.

De acordo com a Agência Nacional de Águas - ANA (2010), a Região Hidrográfica Atlântico Sudeste, na qual se insere o estado do Espírito Santo, é conhecida nacionalmente pelo elevado contingente populacional, pela importância econômica de sua indústria e pela agricultura. O desenvolvimento econômico da Região é motivo de problemas em relação à disponibilidade de água. Isto ocorre porque, ao mesmo tempo em que apresenta uma das maiores demandas hídricas do País, a região hidrográfica também possui uma das menores disponibilidades relativas.

No estado do Espírito Santo já foram encontrados registros de seca permanente de rios de interesse para o abastecimento por longos períodos, ocasionando o racionamento de água para a população urbana, e a geração de termos de ajustamento de conduta para os produtores rurais, impostos pelo Ministério Público, com a regulamentação dos dias de uso de água para a agricultura, em que o não cumprimento acarreta em multas e apreensão dos sistemas de irrigação.

Na natureza, a conservação dos recursos hídricos, no que diz respeito ao regime de vazão dos cursos d'água e da qualidade de água, decorre de mecanismos naturais de controle desenvolvidos ao longo de processos evolutivos da paisagem. Um destes mecanismos, de extrema importância, consiste na relação que existe entre a cobertura vegetal e a água, especialmente nas regiões de nascentes dos corpos hídricos. Esta condição natural de equilíbrio dinâmico vem sendo constantemente alterada pelo homem, pelo

desmatamento, expansão da agricultura, abertura de estradas, urbanização e vários outros processos de transformação antrópica da paisagem, que alteram os ciclos biogeoquímicos e o ciclo hidrológico. Levando em conta as projeções de crescimento da população mundial, os impactos ambientais destas transformações começam a ameaçar a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Tucci (2005) afirmou que os modelos hidrológicos são ferramentas extremamente úteis que permitem, por meio do equacionamento dos processos, físicos e químicos relacionados aos recursos hídricos, representar, entender e simular o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Entretanto, cabe ressaltar que é impossível ou inviável traduzir todas as relações existentes entre os diferentes componentes da bacia hidrográfica em termos matemáticos. Assim, na maioria dos casos, a modelagem hidrológica torna-se somente uma representação aproximada da realidade (RENNÓ; SOARES, 2000).

Mesmo com este viés da realidade, os modelos hidrológicos são as melhores alternativas de monitoramento e gestão dos recursos hídricos, pois assim como abordado por Tucci (2005), o modelo permite entender, representar e antecipar eventos extremos de forma a criar medidas preventivas a estas situações, contribuir no conhecimento das mudanças no uso da terra, e prever alterações futuras em ecossistemas, de forma a possibilitar uma melhor gestão dos recursos hídricos para a sociedade.

Dentre os modelos hidrológicos existentes atualmente, destaca-se o modelo de Capacidade de Infiltração Variável (Variable Infiltration Capacity - VIC), caracterizado como complexo e de escala global, que soluciona balanços completos de água e energia com embasamento biofísico. Este modelo vem sendo utilizado e difundido pelo Banco Mundial, por causa dos excelentes resultados obtidos para grandes bacias, servindo de auxílio às tomadas de decisão da instituição na implementação de projetos vinculados a este modelo (informação verbal)¹.

Segundo o Instituto Jones dos Santos Neves – IJSN (2010), o estado do Espírito Santo possui sete bacias hidrográficas, e dentro delas se destacam as

¹ Notícia fornecida por Marcos Franklin Sossai, em reunião realizada no IEMA, Cariacica-ES, em março de 2012.

bacias dos rios Santa Maria da Vitória e do Jucu, como uma das mais significativas para o Estado, por abastecerem 50% da população estadual (Região Metropolitana da Grande Vitória), contribuírem para a produção de 11% da energia elétrica, além de servir ao abastecimento industrial, doméstico e rural, fonte da irrigação para a agricultura, recreação e ter fins paisagísticos.

A modelagem hidrológica é uma técnica que possibilita o melhor entendimento e representação do comportamento hidrológico de bacias, deste modo, este estudo possibilitará um melhor planejamento e manejo integrado dos recursos hídricos de forma a atender os diversos fins que lhe destina (abastecimento humano, lazer, dessedentação de animais, agricultura, abastecimento industrial), além da possibilidade de criação de cenários para predição do comportamento das vazões, tornando-se uma importante ferramenta de identificação e análise de problemas ambientais relacionados a bacias hidrográficas, manejo do solo e uso da terra.

Neste contexto, o objetivo principal do presente trabalho foi a avaliação da aplicabilidade do modelo hidrológico de Capacidade de Infiltração Variável (VIC) na estimação de vazões geradas a partir de uma série de eventos de precipitação, para as bacias hidrográficas dos rios Santa Maria da Vitória e do Jucu, ambas inseridas no estado do Espírito Santo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Várias experiências com base na gestão de bacias hidrográficas surgiram na década de 1980. Por exemplo, no estado do Espírito Santo, destaca-se a criação do primeiro Consórcio Intermunicipal Santa Maria/Jucu, de maneira a facilitar a negociação entre os usuários de água no Estado (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2010).

Porém a gestão de recursos hídricos embasada no recorte territorial das bacias hidrográficas ganhou força no início dos anos 1990, quando os Princípios de Dublin foram acordados na reunião preparatória da Rio-92 (PORTO; PORTO, 2008), no qual o Princípio nº 1 diz que:

“A água doce é um recurso finito e vulnerável, essencial para sustentar a vida, o desenvolvimento e para o meio ambiente. Visto que a água mantém a vida, a gestão eficaz dos recursos hídricos exige uma abordagem holística, ligando desenvolvimento social e econômico com a proteção dos ecossistemas naturais.” (WMO, 1992)

Para que essa integração tenha o foco adequado, sugere-se que a gestão seja direcionada às bacias hidrográficas (PORTO; PORTO, 2008).

A Lei Federal n. 9.433/1997 tem, entre os fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, a água como um bem de domínio público, dotado de valor econômico, cujos usos prioritários são o abastecimento humano e a dessedentação de animais, e cuja gestão deve tomar como unidade territorial a bacia hidrográfica. Prevê, ainda, como diretriz geral de ação, a gestão integrada; e como instrumentos, para viabilizar sua implantação, os planos de recursos hídricos, o enquadramento dos corpos de água em classes segundo os seus usos preponderantes, a outorga de direito de uso, a cobrança pelo uso da água e o sistema de informação sobre recursos hídricos.

Em termos práticos, os sistemas de gestão dependem de instrumentos que possam ser desenvolvidos e aplicados de forma a atender às expectativas

e aos interesses da comunidade, nos limites impostos pela aptidão natural das bacias hidrográficas, seja na perspectiva mais utilitária ou para o atendimento de objetivos de preservação ambiental, garantindo sustentabilidade, no médio e no longo prazo (PORTO; PORTO, 2008).

Mas, para que a gestão de recursos hídricos ocorra de forma adequada, há necessidade de investimentos em pesquisa e tecnologia, visando monitoramento hidrológico constante e sua integração com a gestão do uso da terra, sempre que possível apoiados por análises advindas do uso de modelos hidrológicos confiáveis.

O monitoramento de bacias hidrográficas pode fornecer indicações a respeito das alterações que estejam ocorrendo com os recursos hídricos, sejam estas benéficas ou não, como consequência de práticas de uso e manejo da terra (RENNÓ; SOARES, 2000).

2.2. MODELOS HIDROLÓGICOS

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que a envolvem. Os modelos hidrológicos tem sido cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a compreender o impacto das mudanças no uso do solo e prever alterações futuras nos ecossistemas (RENNÓ; SOARES, 2000).

Rennó e Soares (2000) mencionam que não existe um modelo único que seja o melhor, pois um mesmo processo pode ser representado de diferentes formas, sendo algumas mais apropriadas para determinados casos; assim, existe determinado modelo que melhor descreve um dado fenômeno. De maneira geral, um modelo é um sistema de equações matemáticas e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Os parâmetros mantêm seu valor inalterado durante todo o processo estudado; porém, não significa que ele não possa variar espacialmente. Já as variáveis, podem mudar no decorrer do tempo em que o modelo estiver sendo executado.

Os mesmos autores sugeriram que é possível distinguir três tipos de variáveis em um modelo. A primeira, chamada variável de estado, é o foco de estudo do modelo, em que sempre haverá uma equação diferencial relacionada a esta variável. O estado de um sistema pode ser descrito apenas verificando-se o valor de cada variável de estado. O segundo tipo de variável em um modelo é a variável processo ou simplesmente processo, também chamada de fluxo. Os fluxos serão as entradas e saídas das variáveis de estado. Tipicamente, os fluxos são calculados como função das variáveis de estado e das variáveis impulsionadoras ou forçantes. Também os parâmetros serão utilizados no cálculo dos fluxos. O terceiro e último tipo é a variável forçante que representa um fluxo (fluxo forçante) ou um estoque externo ao modelo (estoque forçante), alimentando-o, funcionando como um propulsor. A variável forçante pode atuar, ainda, como um modulador/controlador de fluxos no modelo.

Os modelos hidrológicos possuem uma representação matemática relacionada aos componentes do ciclo hidrológico. Envolvem, portanto, a simulação dos processos de precipitação, de evapotranspiração, de infiltração, de interceptação, de escoamento superficial e de deflúvio superficial dentro de uma unidade geográfica adequada, como por exemplo, de uma bacia hidrográfica. Como não existe um modelo adequado a todas as situações, mas sim uma representação diferente para cada processo, o que irá determinar a escolha de um determinado modelo é seu nível de confiabilidade e a adequabilidade. Geralmente, há uma inter-relação entre a capacidade do modelo e a disponibilidade do planejador, o que torna difícil encontrar modelos adequados que possam fazer previsões confiáveis considerando os dados e as limitações financeiras da maioria dos planejadores. Por exemplo, em uma bacia hidrográfica com indisponibilidade de alguns dados, o planejador será forçado a escolher um modelo de baixa complexidade e, ou, empírico. No entanto, quando os resultados precisam ser mais detalhados, modelos de maior complexidade e, ou, de bases físicas, são mais apropriados (BECKERS et al., 2009).

Diversos modelos hidrológicos foram e estão sendo desenvolvidos no exterior e no país, dentre eles estão: Método Racional; Método do Número da Curva; Soil and Water Assessment Tool – SWAT (ARNOLD, 1994); Topography Based Hydrological Model – TOPMODEL (BEVEN; KYRKBY, 1979); Water

Erosion Prediction Project – WEPP (FLANAGAN; NEARING, 1995); HidroBacia (SILVA, 2002); Distributed Hydrology Soil Vegetation Model – DHVSM (WIGMOSTA et al., 1994); e Variable Infiltration Capacity – VIC (LIANG et al., 1994).

2.3. MODELO HIDROLÓGICO VARIABLE INFILTRATION CAPACITY (VIC)

O modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity* (VIC) foi originalmente desenvolvido para simular os processos de transferência vertical de água e energia entre o solo, a vegetação e a atmosfera nos modelos globais de circulação geral (VICTORIA, 2010).

O VIC representa os processos hidrológicos na superfície e na sub-superfície em uma base espacialmente distribuída (por célula). Em aplicações típicas, o tamanho de cada célula varia de 7,5' a 2,0° de resolução; porém, alguns autores trabalharam com resolução igual a 3,75', podendo ser utilizadas variações de escalas de cada célula, para as características do solo e vegetação (BECKERS et al., 2009).

A representação do modelo inclui três camadas de solo e uma camada única de vegetação, podendo simular processos em uma etapa de tempo sub-diária, (BECKERS et al., 2009). A representação dos processos de infiltração e de escoamento superficial são empíricos, em razão de sua natureza macro. A infiltração é simulada pela curva de capacidade variável de infiltração, enquanto os escoamentos superficial, sub-superficial e o de base são incorporados para simular o total de cada célula (LIANG et al., 1994).

Por se basear em uma curva empírica que relaciona a área superficial saturada de uma célula em função da umidade do solo, o VIC necessita que alguns parâmetros sejam ajustados (processo de calibragem), de forma a melhorar o desempenho da simulação, pois diferentes solos são representados por diferentes parâmetros da curva de infiltração (VICTORIA, 2010).

Gao et al. (2010) informam que, usualmente, o processo de calibração envolve a modificação de seis parâmetros, a saber:

- Parâmetro de infiltração (*b_infilt*): controla o particionamento da precipitação entre infiltração e escoamento superficial, em que altos valores irão fornecer baixa infiltração, proporcionando maior escoamento superficial.
- *depth2* e *depth3*: são as profundidades da segunda e da terceira camada do solo, que afetam a transpiração e o escoamento subterrâneo, respectivamente. Camadas espessas de solo tem respostas mais lentas ao escoamento superficial (predominância de escoamento subterrâneo) com alta evapotranspiração; porém, resultam na grande retenção de umidade e altos fluxos de base em períodos secos.
- *Ds*, *Dsmax*, e *Ws*: são parâmetros de controle do escoamento subterrâneo, e são estimados via calibração. Esses três parâmetros determinam quão rápido a água armazenada na terceira camada do solo será percolada como escoamento subterrâneo.

Com relação à entrada de dados referentes às condições meteorológicas, o VIC requer, no mínimo, dados de precipitação, temperatura máxima e mínima, e velocidade do vento. As demais variáveis climáticas necessárias são estimadas por meio do algoritmo MTCLIM (KIMBALL et al., 1997). O modelo também pode considerar a heterogeneidade espacial da precipitação, decorrente de tempestades convectivas frontais/locais, ou heterogeneidade topográfica.

O processamento dos dados é realizado célula por célula, em que se calcula uma de cada vez durante um período de tempo desejado, para a produção de séries temporais de escoamento superficial, escoamento subterrâneo e evapotranspiração. Os escoamentos superficial e subterrâneo de cada célula são modelados de forma a serem transferidos para as células a jusante. Não há transferência horizontal de água de célula para célula; portanto, um modelo de roteamento (transporte lateral) deve ser usado como uma ferramenta de pós-processamento para calcular as vazões, como uma composição de ambos os escoamentos, o superficial e o de base (BECKERS et al. 2009).

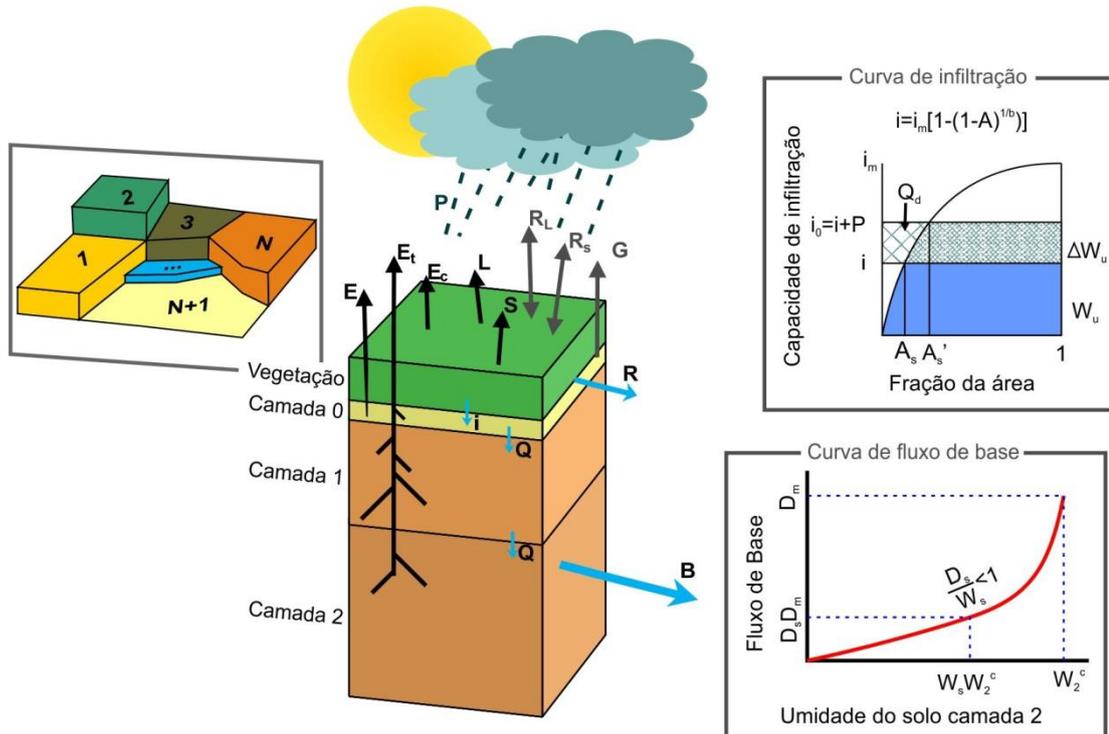
O modelo de roteamento mais utilizado em conjunto com o VIC, para o processamento de vazões, é o ROUTE, desenvolvido por Lohmann et al. (1996,1998). Dentro deste modelo, considera-se que a água pode fluir dos pixels para o canal, mas não pode fluir no caminho inverso, pois ao atingir o canal considera-se que a água não faz mais parte ciclo hidrológico dos pixels. O modelo assume que o escoamento superficial é linear, causal, estável, e o tempo é invariável.

No geral, o modelo é de alta complexidade, requerendo a coleta substancial de dados, pré-processamento e análises espaciais.

2.3.1. Visão geral dos processos no modelo VIC

Na Figura 1 estão representados o funcionamento e as bases teóricas do modelo VIC. A partir de uma entrada (Precipitação – P), a água pode ser interceptada por N tipos de vegetação, ou chegar diretamente ao solo ($N+1$). Em seguida, a água pode ser evaporada no solo (E) ou na vegetação (E_c). A vegetação ainda pode contribuir pela saída da água do sistema por meio da transpiração (E_t). Estas saídas de água são influenciadas pelo tipo de vegetação e solo, além do fluxo de calor latente e sensível (L e S , respectivamente), do fluxo de calor do solo (G) e, conseqüente, do saldo de radiação de ondas longas e curtas (R_L e R_S , respectivamente). Da água que chega na superfície do solo, parte é infiltrada (i) e parte escoar (R), processos estes regidos pela curva de infiltração variável, enquanto a parte que infiltra contribui para o fluxo de umidade entre as camadas do solo (Q) e, conseqüentemente, se torna escoamento subterrâneo (B), obedecendo a curva de fluxo de base.

Figura 1 - Representação esquemática do modelo VIC, com detalhe das curvas de infiltração e de fluxo de base, e do mosaico da cobertura vegetal.



Fonte: Adaptado de Gao et al. (2010).

O modelo VIC utiliza dois módulos de modelagem, o balanço de energia e o balanço de água. Para fins de descrição do processo, será descrito a seguir apenas o módulo de balanço de água, pois este foi o módulo utilizado neste trabalho. Todas estas informações foram obtidas de Liang et al. (1994), Liang et al. (1996) e Gao et al. (2010).

O balanço de água no modelo VIC é representado pela Equação 1, de forma contínua em cada passo de tempo definido.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = P - E - R \quad (1)$$

em que: dS/dt é a mudança no armazenamento de água (mm); P é a precipitação (mm); E é a evapotranspiração (mm); R é o escoamento superficial (mm).

O balanço de água na camada de vegetação (interceptação), nas áreas onde esta existe, é descrito pela Equação 2.

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = P - E_c - P_t \quad (2)$$

em que: W_i é a interceptação da água pela vegetação (mm); E_c é a evaporação da vegetação (mm); e P_t é a precipitação interceptada pela copa (mm).

O modelo considera três tipos de perda de água para a atmosfera: a evaporação de cada tipo de vegetação (E_c , mm); a transpiração (E_t , mm) de cada tipo de vegetação; e a evaporação do solo exposto (E_1 , mm). A evapotranspiração de cada *pixel* é proveniente do somatório destes três tipos de perdas ponderados pelas respectivas frações de áreas.

$$E = \sum_{n=1}^N [C_n \cdot (E_{c,n} + E_{t,n})] + (C_{N+1} \cdot E_1) \quad (3)$$

em que: C_n é a fração de cobertura de cada tipo de vegetação, C_{n+1} é a fração de solo exposto.

A máxima evaporação da vegetação (E_c^* , mm), para cada um de seus tipos, é calculada utilizando a Equação 4.

$$E_c^* = \left(\frac{W_i}{W_{im}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot E_p \cdot \frac{r_w}{r_w + r_0} \quad (4)$$

em que: W_{im} é a máxima quantidade de água que pode ser interceptada (mm), equivalente a 20% do IAF; r_0 é a resistência arquitetural promovida pela variação de umidade entre a vegetação e o ar ($s \cdot m^{-1}$); r_w representa a transferência de calor e água da evaporação no ar acima da vegetação; E_p é a evapotranspiração potencial (mm) calculada pela equação de Penman-Monteith.

A transpiração da vegetação (E_t , mm) é estimada utilizando a Equação 5.

$$E_t = \left[1 - \left(\frac{W_i}{W_{im}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot E_p \cdot \frac{r_w}{r_w + r_0 + r_c} \quad (5)$$

em que r_c é a resistência da vegetação ($s \cdot m^{-1}$).

A evaporação do solo exposto é calculada apenas para a camada inicial do solo. Quando a camada 1 está saturada, a água evapora a uma taxa potencial de $E_p[N+1]$, expressa pela Equação 6; e quando não está saturada, a água evapora a uma taxa de E_1 , podendo variar com a área do solo e a heterogeneidade da infiltração, topografia e características do solo. E_1 é calculada utilizando o modelo ARNO, formulado por Franchini e Pacciani (1991), em que se utiliza a estrutura do modelo de Xinanjiang (Zhao et al., 1980), no qual assume-se que a capacidade de infiltração varia de acordo com a área (Equação 7) e a capacidade máxima de infiltração é obtida pela Equação 8, obtendo-se, assim, a Equação 9.

$$E_1 = E_p[N+1] \quad (6)$$

$$i = i_m \left(1 - (1 - A)^{\frac{1}{b_i}} \right) \quad (7)$$

$$i_m = (1 + b_i) \cdot \theta_s \cdot |z| \quad (8)$$

$$E1 = Ep \left\{ \int_0^{A_s} dA + \int_{A_s}^1 \frac{i_0}{i_m \left[1 - (1 - A)^{\frac{1}{b_i}} \right]} dA \right\} \quad (9)$$

em que: i é a capacidade de infiltração (mm); i_m é a capacidade máxima de infiltração (mm); A é a fração da área em que a capacidade de infiltração é menor do que i ; b_i é o parâmetro de forma da curva de infiltração; θ_s é a porosidade do solo; z é a profundidade do solo (m); A_s representa a fração do solo exposto saturado; e i_0 representa o ponto correspondente da capacidade de infiltração.

O VIC usa a curva de infiltração variável (Zhao et al., 1980) para considerar a heterogeneidade espacial da geração do escoamento superficial. Ele assume que o escoamento superficial é gerado por aquelas áreas em que, ao se computar a precipitação no armazenamento de água no solo do período anterior, excede a capacidade de armazenamento do solo. O escoamento total (Q , mm) é descrito como na Equação 10.

$$Q = \sum_{n=1}^{N+1} C_n \cdot (Q_{d,n} + Q_{b,n}) \quad (10)$$

em que: Q_{dn} (mm) é o escoamento direto(superficial); e Q_{bn} (mm) é o escoamento subterrâneo, ambos para cada tipo de cobertura.

O escoamento direto é calculado aplicando-se a Equação 10 para toda a camada superior, e não somente para a camada inicial; assim, o escoamento direto pode ser expresso como:

$$Q_d \cdot \Delta t = P \cdot \Delta t - z_2 \cdot (\theta_s - \theta_2), \quad i_0 + P \cdot \Delta t \geq i_m \quad (11)$$

$$Q_d \cdot \Delta t = P \cdot \Delta t - z_2 \cdot (\theta_s - \theta_2) + z_2 \cdot \theta_s \cdot \left[1 - \frac{i_0 + P \Delta t}{i_m} \right]^{1+b_i} \quad i_0 + P \Delta t \leq i_m \quad (12)$$

em que: Δt é o passo de tempo.

Para o cálculo do escoamento subterrâneo, utiliza-se o algoritmo do modelo ARNO, equações 13 e 14.

$$Q_b = \frac{D_s D_m}{W_s \theta_s} \cdot \theta_3, 0 \leq \theta_3 \leq W_s \theta_s \quad (13)$$

$$Q_b = \frac{D_s D_m}{W_s \theta_s} \cdot \theta_3 + \left(D_m - \frac{D_s D_m}{W_s} \right) \cdot \left(\frac{\theta_3 - W_s \theta_s}{\theta_s - W_s \theta_s} \right)^2, \theta_3 \geq W_s \theta_s \quad (14)$$

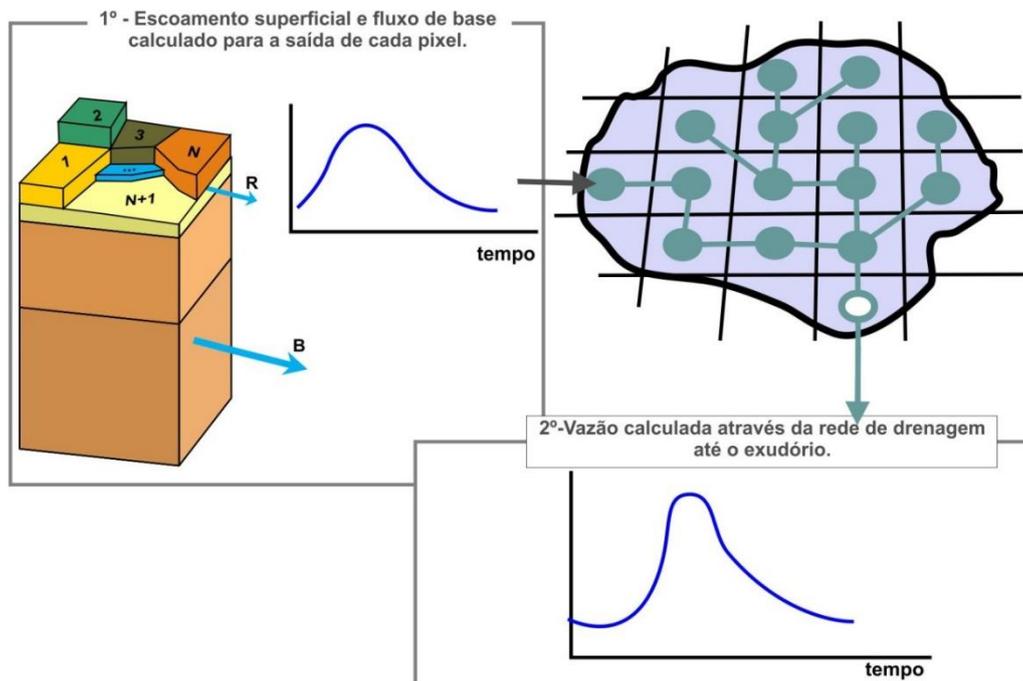
em que: D_m é o máximo fluxo subterrâneo ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); D_s é a fração de D_m ; W_s é a fração da umidade do solo máxima.

2.3.2. Visão geral do processo do modelo ROUTE

Na Figura 2 consta a representação esquemática do funcionamento do modelo de roteamento acoplado ao modelo VIC, o qual é indicado para se obter a vazão do rio em uma determinada saída ou ponto da bacia. O modelo permite calcular o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo para a saída de

cada pixel da bacia e, a partir da rede de drenagem e direção de escoamento, realiza a junção dessas hidrógrafas até o ponto de deságue da bacia.

Figura 2. Representação esquemática do modelo de roteamento de vazões.



Fonte: Adaptado de Gao et al. (2010).

A descrição detalhada dos processos que regem este modelo são encontradas no trabalho de Lohmann et al. (1996, 1998).

2.3.3. Aplicações do modelo VIC

Desde a sua criação, o VIC vem sendo utilizado em várias áreas de pesquisa, como meteorologia e ciências atmosféricas, recursos hídricos, geociências, ciências ambientais, sensoriamento remoto, dentre outras, tendo mais de 1700 citações bibliográficas (Gao et al., 2010).

Com o objetivo de modelagem hidrológica, nos últimos 20 anos o modelo foi aplicado em importantes bacias pelo mundo, como nas bacias dos rios

Missouri (1.370.000 km²), Delaware (33.100 km²), Red (637.000 km²), e Columbia (660.000 km²), nos Estados Unidos (NIJSSEN et al., 1997; WOOD et al.; 1997; ABDULLA, et al., 1999; MATHEUSSEN et al., 2000); nas bacias dos rios Amarelo (752.000 km²), Haihe (318.200 km²), Mekong (795.000 km²) e Chao Phraya (178.000 km²), na Ásia (JAYAWARDENA; MAHANAMA, 2002; YUAN et al., 2003; XIE et al., 2007); nas bacias do rios Weser (37.000 km²) e Elba (51.000 km²), na Alemanha (LOHMANN et al., 1998, LOBMEYR et al. 1999).

No Brasil, o primeiro trabalho em bacias hidrográficas utilizando o modelo VIC foi realizado por Mechoso et al.(2001), na bacia do rio da Prata, simulando seu comportamento hidrológico, além de análise de mudanças climáticas.

Santiago (2005) aplicou esse modelo na bacia do rio Ji-Paraná, em Rondônia, com área de drenagem de 75.400 km², com o objetivo de verificar a sua aplicabilidade e avaliar os impactos da substituição da floresta no ciclo hidrológico da região. O autor utilizou uma resolução espacial de 1/10⁰, e observou que a eficiência da simulação foi fortemente influenciada pelos erros nas vazões máximas simuladas durante o período de calibração, resultando em um coeficiente de Nash variado entre 0,76 e 0,95. Durante o período de validação, o coeficiente de Nash variou de -2,71, no primeiro ano, a 0,78, concluindo-se que o modelo simulou razoavelmente as vazões para a bacia.

Victoria (2010) aplicou o VIC em seis sub-bacias Amazônicas, dos rios Negro (706.000 km²), Madeira (1.224.500 km²), Purus (355.000 km²), Japurá (260.000 km²), Juruá (216.000 km²) e Santo Antônio do Iça (1.000.000 km²), testando a aplicabilidade do modelo as condições tropicais. O autor utilizou uma resolução espacial de 1/4⁰ e, em duas das seis sub-bacias estudadas, os valores de coeficiente de Nash apresentaram-se negativos, sendo associados à subestimativa da precipitação próxima aos Andes ocasionada pela tipo de interpolação utilizada e a carência de estações naquela região.

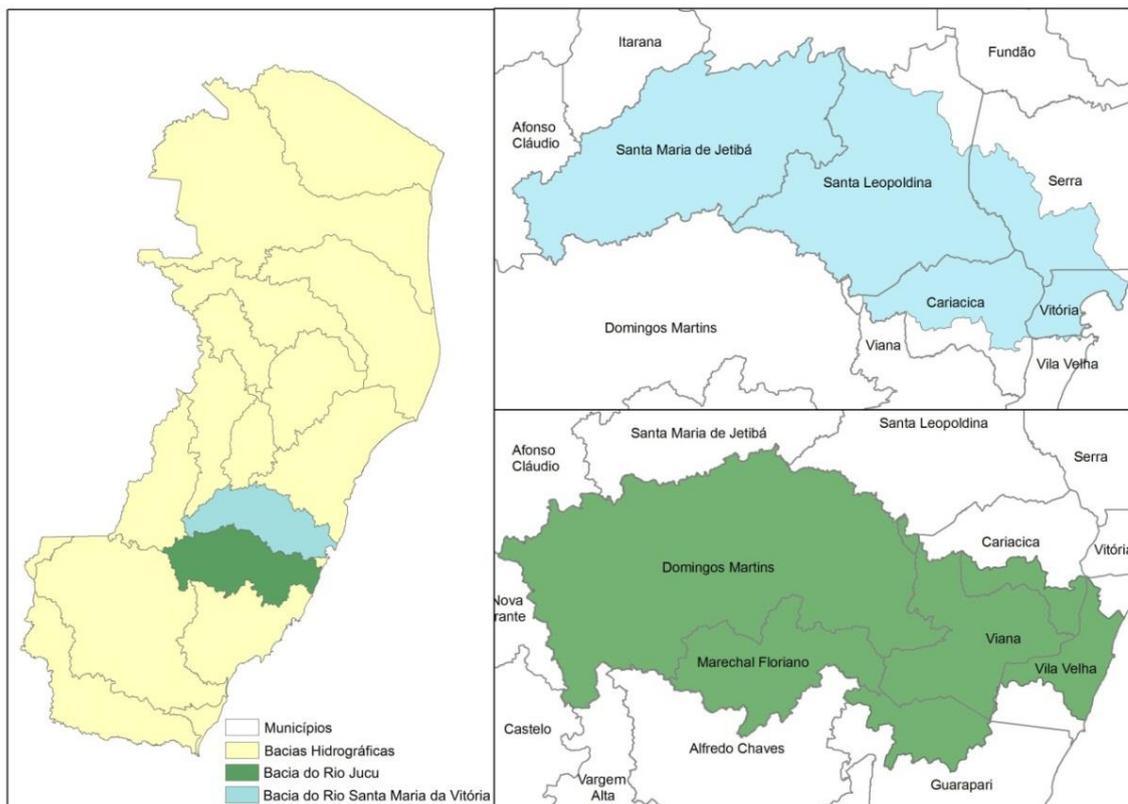
Por se tratar de um modelo gratuito e com código fonte aberto, muitos pesquisadores estão utilizando o conceito inerente ao modelo VIC, incorporando-o a outros modelos ou adaptando-o para determinados objetivos, como é o caso do modelo de grandes bacias MGB-IPH, (Collishon; Tucci, 2001)

desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

2.4. BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS SANTA MARIA DA VITÓRIA E JUCU

A bacia do rio Santa Maria da Vitória possui cerca de 1.799,60 km² (Figura 3), com altitudes que variam de 0 a 1.300 metros. O rio Santa Maria da Vitória percorre 122 km até desaguar na baía de Vitória. No seu trecho final, o rio sofre a influência da cunha salina e apresenta suas margens com vegetação remanescente de manguezais. Próximo à sua foz deságuam, também, na baía de Vitória, além do canal dos Escravos, os rios Bubu, Itanguá, Formate-Marinho e Aribiri (INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES, 2010).

Figura 3. Mapa de localização das bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu, com os respectivos municípios de abrangência.



Fonte: Base cartográfica do IEMA.

A bacia do rio Jucu compreende uma superfície de 2.148,56 km² (Figura 3), com cotas altimétricas variando entre 0 e 1.800 metros (INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES, 2010). Tradicionalmente, considera-se que o Jucu nasce da junção dos rios Jucu Braço Sul e Jucu Braço Norte; mas, para facilitar a descrição, julga-se procedente adotar o Braço Norte do Jucu como o prolongamento natural do rio principal. O rio Jucu (Braço Norte), nasce na serra do Castelo, perto da serra da Pedra Azul, ao sul do povoado de São Paulinho, no município de Domingos Martins. Seu curso se desenvolve numa extensão aproximada de 166 km até desaguar em Vila Velha, na Barra do Jucu. Do total de 166 km, 123 km correspondem ao trecho conhecido como Braço Norte, ou seja, da nascente, localizada na cota 1.200 m, até a confluência do Braço Sul do Jucu (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2010).

A população total dos municípios das duas bacias, segundo o Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010), era de 1.763.204 habitantes, o que corresponde a aproximadamente 50% da população do estado do Espírito Santo, além de abranger praticamente toda a Região Metropolitana da Grande Vitória. Na Tabela 1 apresenta-se a distribuição da população nos municípios abrangidos pelas bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Rio Jucu.

Tabela 1. Distribuição da população urbana e rural nos municípios abrangidos pelas bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu

Bacia	Municípios	Área (km ²)	População		Densidade Demográfica (hab/km ²)
			Urbana	Rural	
JC	Domingos Martins	1225,3	7.741	24.106	25,99
JC	Guarapari	595,5	100.528	4.758	176,81
JC	Marechal Floriano	286,1	7.421	6.841	49,85
JC	Viana	311,6	59.632	5.369	208,60
JC	Vila Velha	212,4	412.575	2.011	1.951,99
SM	Cariacica	280	337.643	11.095	1245,60
SM	Santa Leopoldina	716,4	2.615	9.625	17,08
SM	Santa Maria de Jetibá	735,6	11.797	22.379	46,46
SM	Serra	553,5	406.450	2.817	739,38
SM	Vitoria	98,5	327.801	0	3.327,73
TOTAL		5014,9	1.763.204	89.001	

JC: bacia hidrográfica do rio Jucu; SM: bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória. Fonte: IBGE, Censo 2010.

Os rios das bacias fornecem 100% da água consumida na Grande Vitória e são responsáveis pela produção de 11% da energia elétrica do Estado. Os principais usos da água nas bacias são: abastecimento urbano, industrial e doméstico rural; a geração de energia; dessedentação de animais; diluição de efluentes; irrigação; recreação; pesca; e manutenção da biodiversidade fluvial (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2010).

A agricultura na região é mais representativa para os municípios de Domingos Martins, Marechal Floriano, Santa Leopoldina e Santa Maria de Jetibá (Tabela 2), os quais estão localizados na cabeceira das bacias hidrográficas. Portanto, tais municípios merecem atenção especial, pois o uso e cobertura da terra nesses locais influenciam a qualidade e quantidade de água em todo o restante da bacia, podendo afetar o abastecimento da Região da Grande Vitória.

Tabela 2. Valor do Produto Interno Bruto em porcentagem, por setores econômicos e por município do ano de 2010

Município	Agropecuária	Indústria, Construção e SIUP*	Comercio e Serviços
Cariacica	0,27	25,70	74,03
Domingos Martins	32,78	12,62	54,60
Guarapari	3,74	18,05	78,21
Marechal Floriano	27,83	13,61	58,56
Santa Leopoldina	44,29	6,74	48,97
Santa Maria de Jetibá	55,57	6,20	38,23
Serra	0,21	42,27	57,52
Viana	2,43	31,28	66,29
Vila Velha	0,21	26,04	73,75
Vitoria	0,05	33,26	66,69

*SIUP: Serviços Industriais de Utilidade Pública (Eletricidade, Gás e Água). Fonte: Tresinari (2012).

A caracterização das bacias do estado do Espírito Santo, elaborado pela Agência Nacional das Águas (2010), indica que os principais fatores de degradação dos recursos hídricos para as bacias em questão são: as cargas elevadas de esgotos domésticos; o escoamento superficial de áreas urbanas; os efluentes industriais; os efluentes oleosos; o chorume; o lançamento de lixo; os efluentes e resíduos de atividades agropecuárias; os processos erosivos generalizados nos solos das bacias; a retificação, canalização e dragagem de cursos de água; a ocupação de margens de rios e lagoas; a retirada de matas marginais; e a extração de areia.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está compreendida nos limites das bacias hidrográficas dos rios Jucu e Santa Maria da Vitória (Figura 4), cujas coordenadas geográficas estão entre 41,20° e 40,20° O, e 19,90° e 20,65° S. Ambas bacias estão inseridas dentro do estado do Espírito Santo.

Figura 4. Limite da área de estudo: bacias hidrográficas dos rios Jucu e Santa Maria da Vitória.



Fonte: do autor.

O gradiente altitudinal aumenta de leste para oeste, variando de 0 a 1800 metros. O clima da região é classificado como tropical de monções (Am), pela

classificação de Köppen-geiger (PEEL et al., 2007). Segundo o IBGE (NIMER, 1979), existe 5 zonas climáticas nessa região, variando de quente super úmido (com média de temperatura maior que 18°C em todos os meses) na região costeira, a mesotérmico mediano super úmido (com média de temperatura menores que 10°C) na região mais alta.

3.2. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

O modelo VIC e o modelo de roteamento Route foram desenvolvidos para as plataformas Linux e Unix, sendo implementados em linguagem de programação C e Fortran, respectivamente, e não possuem uma interface padrão. Desta forma, para as suas execuções, foi necessário utilizar o programa Cygwin 1.7², o qual é um *software* gratuito, que permite a execução destes modelos via linha de comando.

O Cygwin consiste em um conjunto de ferramentas e *dll's* que permite disponibilizar um ambiente Linux dentro da plataforma Windows. Porém, ao instalá-lo, é necessário incluir os seguintes pacotes³ para o seu devido funcionamento: gcc-g77 (compilador de Fortran); gcc-g++ (compilador de C++); gcc4 (compilador de C e C++); make (versão para make); tcsh (arquivo Shell); scsh (arquivo Shell); e nano (editor de texto).

Os modelos VIC 4.1.2.g e Route 1.0 foram obtidos através da guia *download* do sitio do modelo VIC (<http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/SourceCode/Download.shtml>). Para tornar os modelos executáveis foi necessário seguir os seguintes passos:

- VIC⁴

² Utilizou-se o Cygwin pois o sistema operacional (SO) utilizado foi o Windows 7. Nos SO Linux, Unix ou o IOS não há necessidade de usar o Cygwin, pois ambos possuem um terminal GNU próprio que pode ser utilizado para a execução dos modelos VIC e Route.

³ Assim como no Cygwin, estes pacotes também devem ser instalados nos outros SO; porém, ressalta-se que alguns nomes dos pacotes podem variar de acordo com o SO.

⁴ Ao se utilizar o terminal do Linux é necessário alterar o *shell* de *csh* para *bash*, informação presente dentro do arquivo Makefile, do pacote de scripts do VIC.

- Descompactar o arquivo obtido; e
 - Abrir o Cygwin, ir até o diretório descompactado do modelo e digitar “*make all*”. Com isso, será gerado o arquivo executável *vicNI*.
- **Route⁵**
 - Descompactar o arquivo obtido;
 - Abrir o Cygwin, ir até o diretório descompactado do modelo e digitar “*make*”. Com isso, será gerado o arquivo executável *rout*.

Os dados espaciais, incluindo os módulos e funções de manipulação e criação foram realizados utilizando o programa computacional ArcGIS® 10.1.

3.3. BASES E FONTES DE DADOS DO VIC

O modelo VIC necessita, basicamente, de quatro tipos de arquivos de entrada: informações de controle (*global_param.file*); dados de solo (*solo.Bacia*); dados climáticos (*forcings.files*); e dados de cobertura vegetal (*veg_param* e *veg_library*).

3.3.1. Informações de controle

O arquivo de controle possui dois propósitos básicos: o primeiro é informar ao modelo VIC os nomes, a localização e o formato dos arquivos de entrada e saída; e o segundo é definir alguns dos parâmetros básicos da simulação, como por exemplo, quantas camadas do solo serão usadas no modelo; se irá considerar processos de congelamento e ocorrência de precipitação em forma de neve; qual o início e fim do período de aquecimento do modelo; entre outros parâmetros descritos detalhadamente no website

⁵ Em alguns casos, no Cygwin ou no terminal do Linux, é necessário trocar a informação de compilação do *g77* para *gfortran* para que o Makefile funcione.

<http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/Documentation/GlobalParam.shtml>.

Este arquivo de controle foi criado e modificado, adequando-o com informações para o presente estudo, utilizando o aplicativo *nano*, editor de texto do Cygwin.

3.3.2. Dados de solo

Para a criação do arquivo de solo (solo.Bacia) foi montado um banco de dados com as 29 informações necessárias para a entrada no modelo (Tabela 3) e, posteriormente, este banco de dados foi agrupado aos dados espacializados de solo para a região.

O tipo de solo da região foi obtido por meio do mapa de solos da EMBRAPA Solos (<http://mapoteca.cnps.embrapa.br/geoacervo>), e as informações de textura e profundidade foram retiradas dos volumes 32 e 34 do Projeto RADAM BRASIL.

Foram definidas três camadas de solo, com as seguintes profundidades: 0,30 m; 1,00 m; e a profundidade máxima encontrada nos relatórios do RADAM Brasil.

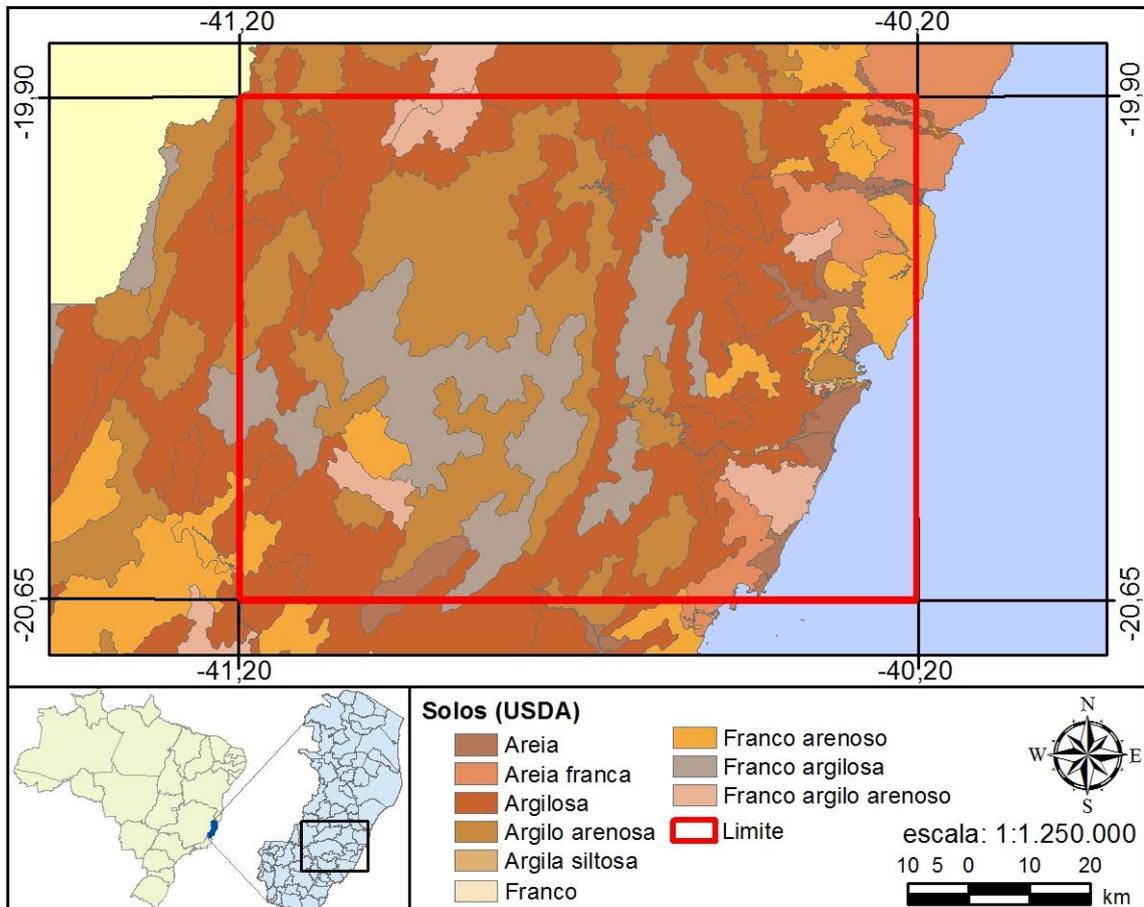
Devido à carência de informações do solo da região, foi necessário reclassificar o solo para a classificação americana (USDA), a partir dos dados de textura obtidos do Projeto RADAM Brasil (Figura 5). Com isso extraiu-se as 29 informações necessárias com auxílio das tabelas disponíveis no website do modelo (<http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/Documentation/soiltext.shtml>).

Tabela 3. Parâmetros necessários para criar o arquivo *solo.Bacia* como entrada no modelo VIC

Parâmetro	Unidade	Descrição
run_cell	1 ou 0	Indicação de execução do pixel.
gricel	-	Número de identificação de cada pixel.
lat	graus	Latitude central do pixel.
long	graus	Longitude central do pixel.
infiltr	-	Parâmetro da curva de infiltração variável.
Ds	-	Fração de D _{max} onde inicia o escoamento subterrâneo.
D _{max}	mm/dia	Máxima velocidade do escoamento subterrâneo.
Ws	fração	Fração de máxima umidade no solo onde ocorre o escoamento subterrâneo.
C	-	Expoente usado na curva do escoamento subterrâneo.
expt	-	Expoente <i>n</i> da equação de Campbell para a condutividade hidráulica de cada camada.
Ksat	mm/dia	Condutividade hidráulica saturada de cada camada.
phi_s	mm/mm	Parâmetro de difusão da umidade no solo em cada camada.
init_moist	mm	Umidade inicial de cada camada
elev	m	Altitude média do <i>pixel</i> .
depth	m	Espessura de cada camada.
avg_T	°C	Temperatura média do solo.
dp	m	Profundidade em que a temperatura do solo fica constante.
bubble	cm	Pressão de borbulhamento de cada camada.
quartz	fração	Conteúdo de quartzo em cada camada.
bulk_density	kg/m ³	Densidade do solo em cada camada.
soil_density	kg/m ³	Densidade de partículas em cada camada.
off_gmt	horas	Deslocamento do fuso horário (GMT).
wcr_fract	fração	Fração do solo contendo umidade na capacidade de campo para cada camada.
wpwp_fract	fração	Fração do solo contendo umidade no ponto de murcha permanente para cada camada.
rough	m	Rugosidade do terreno.
snow_rough	m	Rugosidade do terreno com neve.
anual_prec	mm	Precipitação média anual no pixel.
resid_moist	fração	Umidade residual de cada camada.
fs_active	1 ou 0	Indicação de execução de algoritmo para solo congelado.

Fonte: adaptado de <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/Documentation/SoilParam.shtml>

Figura 5. Mapa de solos da EMBRAPA reclassificado segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América.



Fonte: do autor.

A partir do mapa de solos, utilizou-se a função *Extract by rectangle* do módulo *Spatial Analyst Tools/Extraction* para se obter o mapa de solos para a região de estudo. Posteriormente, converteu-se o mapa de solos para *raster* utilizando a função *Feature to raster*, do módulo *Conversion Tools/to Raster*, respeitando cada resolução testada. Após esta etapa, converteu-se a imagem *raster* para pontos utilizando a função *Raster to point*, do módulo *Conversion Tools/from Raster*.

Com o arquivo de pontos criado, adicionaram-se as informações de latitude e longitude por meio da adição de novas colunas à tabela de atributos do arquivo, e usando a função *Calculate geometry*. Além dessas informações, é necessário informar os valores de altitude média e de precipitação média anual para cada ponto. Para tanto, utilizou-se a função *Extract multi values to points*, do módulo *Spatial Analyst Tools/Extraction*, a partir dos mapa de altitude média,

referente ao SRTM da EMBRAPA Monitoramento por Satélite (MIRANDA, 2005), e do mapa de precipitação, proveniente do trabalho de Castro (2010).

Posteriormente, exportou-se o arquivo de pontos para uma planilha eletrônica do *Excel*, para juntar com as informações do banco de dados de solo e, em seguida, salvar em um arquivo de texto separado por tabulação, gerando-se, assim, o arquivo solo.Bacia.

3.3.3. Dados climáticos

A forma de entrada de dados climáticos no VIC constitui-se de um arquivo para cada *pixel* da bacia, cujo nome deve conter as coordenadas centrais, compatível com o valor descrito no arquivo de solos. O modelo necessita de, no mínimo, quatro informações climáticas: precipitação (mm); temperatura máxima (graus Celsius); temperatura mínima (graus Celsius); e velocidade do vento ($m.s^{-1}$). Essas informações devem ser dispostas em quatro colunas, sendo que cada linha refere-se ao período de tempo (Δt) utilizado pelo modelo (diárias ou horário).

Os dados climáticos foram obtidos a partir das vinte e oito estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) e uma estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), cujos períodos variaram de 1992 a 2001 (Tabela 4 e Figura 6), com período de tempo diário.

Tabela 4. Estações pluviométricas e meteorológicas utilizadas no estudo

ID	Código	Município	Latitude	Longitude
1	1940000	Itarana	-19,874 ^o	-40,874 ^o
2	1940001	Santa Teresa	-19,805 ^o	-40,679 ^o
3	1940002	Aracruz	-19,958 ^o	-40,154 ^o
4	1940007	Fundão	-19,937 ^o	-40,083 ^o
5	1940010	Santa Teresa	-19,953 ^o	-40,553 ^o
6	1940020	Santa Teresa	-19,955 ^o	-40,742 ^o
7	1941008	Afonso Cláudio	-19,901 ^o	-41,058 ^o
8	2040000	Domingos Martins	-20,364 ^o	-40,662 ^o
9	2040001	Viana	-20,415 ^o	-40,485 ^o
10	2040003	Serra	-20,19 ^o	-40,319 ^o
11	2040004	Guarapari	-20,652 ^o	-40,509 ^o
12	2040007	Iconha	-20,028 ^o	-40,743 ^o
13	2040008	Santa Leopoldina	-20,143 ^o	-40,975 ^o
14	2040010	Santa Leopoldina	-20,100 ^o	-40,528 ^o
15	2040011	Alfredo Chaves	-20,557 ^o	-40,811 ^o
16	2040012	Domingos Martins	-20,412 ^o	-40,682 ^o
17	2040014	Cariacica	-20,261 ^o	-40,479 ^o
18	2040015	Domingos Martins	-20,284 ^o	-40,783 ^o
19	2040017	Vila Velha	-20,728 ^o	-40,883 ^o
20	2040018	Santa Leopoldina	-20,079 ^o	-40,607 ^o
21	2040022	Vila Velha	-20,516 ^o	-40,364 ^o
22	2040023	Domingos Martins	-20,296 ^o	-40,934 ^o
23	2040035	Vitória	-20,317 ^o	-40,333 ^o
24	2041002	Castelo	-20,606 ^o	-41,200 ^o
25	2041010	Cachoeiro do Itapemirim	-20,702 ^o	-41,016 ^o
26	2041011	Conceição do Castelo	-20,352 ^o	-41,239 ^o
27	2041020	Domingos Martins	-20,367 ^o	-41,061 ^o
28	2041023	Afonso Cláudio	-20,079 ^o	-41,121 ^o
29*	83648	Vitória	-20,310 ^o	-40,310 ^o

* Estação meteorológica convencional.

Figura 6. Estações pluviométricas e meteorológicas utilizadas no estudo.



Fonte: do autor.

Para gerar os arquivos com os dados climáticos de entrada do modelo (forcings files), foi necessário criar uma rotina no MATLAB R2011b, de forma a espacializar os dados climáticos nas duas bacias, gerando, posteriormente um arquivo individualizado com os parâmetros climáticos para cada *pixel*, com o nome específico. Tal rotina necessitou dos seguintes arquivos de entrada: um arquivo em *Excel* com os dados climáticos de cada estação; o arquivo de solos (solo.Bacia); o mapa de solos em formato ASCII; e um arquivo criado no próprio MATLAB com as informações de localização dos postos pluviométricos.

3.3.4. Dados de cobertura vegetal

A entrada de dados de vegetação foi efetuada a partir de dois tipos de arquivos distintos, um com os 14 parâmetros referentes a cada tipo de vegetação (Tabela 5), denominado *veglibrary*, e outro contendo as informações de proporção de cada tipo de vegetação encontrada em cada *pixel* de solo (Tabela 6), denominado *vegparam*.

Tabela 5. Parâmetros necessários para criação do arquivo *veglibrary*, como entrada no modelo VIC

Parâmetro	Unidade	Descrição
veg_class	-	Número de identificação da classe de uso e cobertura do solo.
overstory	1 ou 0	Indicação da presença ou ausência de dossel.
rarc	s/m	Resistência arquitetônica da vegetação.
rmin	s/m	Mínima resistência estomática da vegetação
LAI	-	Índice de área foliar para cada mês.
albedo	fração	Albedo para cada mês.
rough	m	Comprimento da rugosidade para cada mês.
displacement	m	Altura do deslocamento do plano zero para cada mês.
wind_h	m	Altura em que foi medida a velocidade do vento.
RGL	W/m ²	Radiação mínima para ocorrer transpiração.
rad_atten	fração	Fator de atenuação da radiação.
wind_atten	fração	Fator de atenuação do vento pelo dossel.
trunk_ratio	fração	Fração do comprimento considerado tronco.
comment	-	Nome do tipo de vegetação.

Fonte: adaptado de <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/Documentation/VegLib.shtml>.

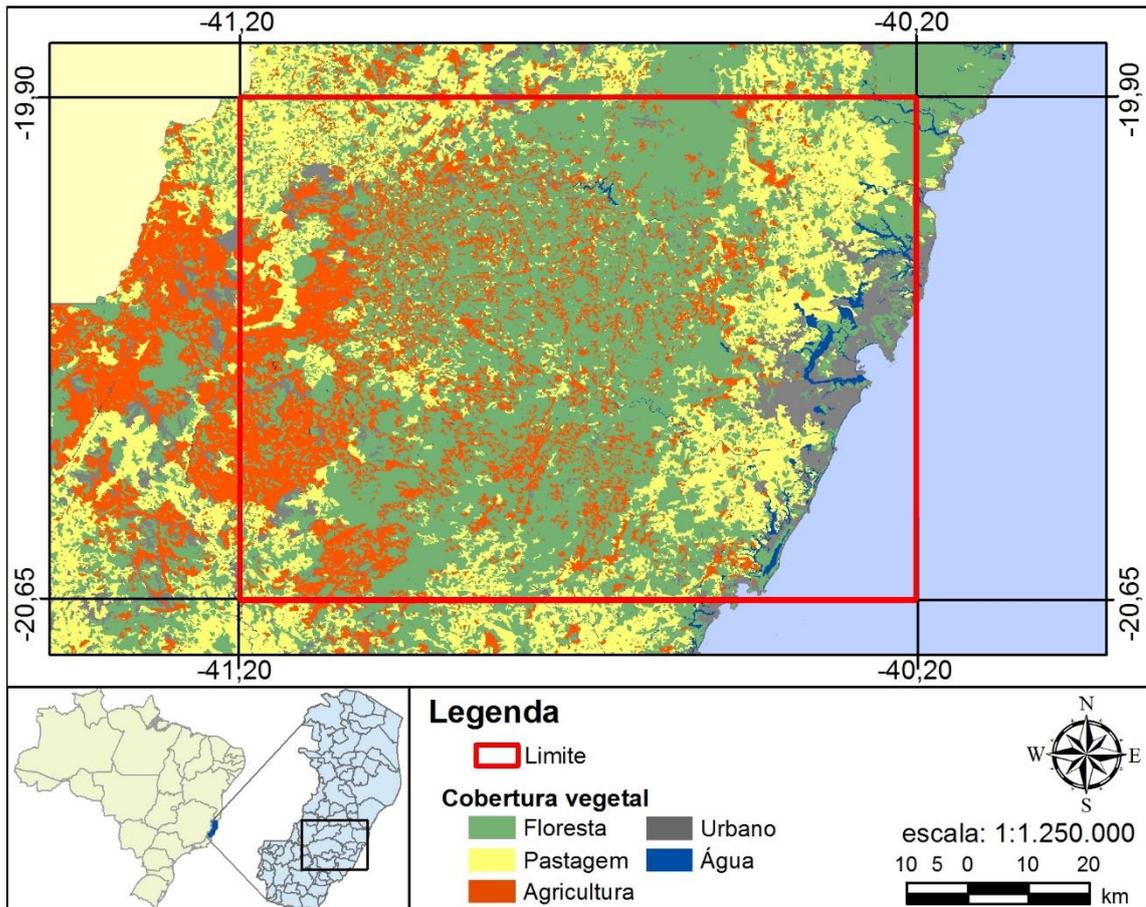
Tabela 6. Parâmetros necessários para criação do arquivo *vegparam*, como entrada no modelo VIC

Parâmetro	Unidade	Descrição
gridcel	-	Número do pixel.
Nveg	-	Número de classes de vegetação existentes no pixel.
vegclass	-	Número de identificação da classe de uso e cobertura do solo.
cv	fração	Fração do pixel coberta pela respectiva classe de uso e cobertura do solo.
root_depth	m	Comprimento da raiz em cada camada do solo.
root_fract	fração	Porcentagem de raiz existente em cada camada do solo.
LAI	-	Índice de área foliar para cada mês.

Fonte: adaptado de: <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/Documentation/VegParam.shtml>.

A identificação dos tipos de uso do solo e cobertura vegetal existentes na área de estudo foi realizada por meio do mapa de uso e cobertura vegetal do estado do Espírito Santo, referente ao ano de 2007/2008, oriundo do IJSN, no qual se identificou cinco tipos de uso diferentes (Figura 7).

Figura 7. Mapa de uso e cobertura vegetal da área em estudo.



Fonte: do autor.

Por não existir informações suficientes sobre todos os parâmetros necessários para a entrada no modelo, para as cinco coberturas existentes, foi necessário comparar as feições da área de estudo com as feições do levantamento do Land Data Assimilation Systems (LDAS), apresentadas na Tabela 7, de forma a se obter todos os parâmetros necessários.

Tabela 7. Reclassificação dos tipos de uso e cobertura vegetal encontradas no estado do Espírito Santo, através do mapa do IJSN para a classe disponível pelo levantamento do LDAS

ClassVeg	Classe IJSN	Classe LDAS
1	Floresta	Evergreen Needleleaf Forest
2	Pastagem	Grassland
3	Agricultura	Cropland
4	Urbano	Urban and Built-up
5	Água	Water

A partir desta reclassificação, obteve-se os parâmetros necessários para a criação do arquivo *veglibrary*, o qual foi criado no *Excel* e exportado para o formato texto separado por tabulações.

Para se criar o arquivo *vegparam*, necessitou-se seguir os seguintes passos:

- Inicialmente, converteu-se o mapa de uso e cobertura vegetal para o formato *raster*, utilizando a função *Feature to raster*, módulo *Conversion Tools/to Raster*, utilizando uma resolução de 3".
- Converteu-se o mapa em formato *raster* para pontos utilizando a função *Raster to point*, módulo *Conversion Tools/from Raster*.
- Utilizou-se a função *Extract multi values to points*, do módulo *Spatial Analyst Tools/Extraction*, para se obter a informação dos tipos de vegetação existente em cada pixel.
- Exportou-se o arquivo de pontos para o formato *dbf*.
- Criou-se uma rotina no MATLAB para ler o arquivo de vegetação (*dbf*) e contar os tipos de vegetação existentes em cada pixel e calcular suas respectivas porcentagens, além de adicionar as informações de índice de área foliar (IAF) para cada tipo de vegetação, e exportar o arquivo em formato texto separado por tabulação.

3.4. BASES E FONTES DE DADOS DO PROGRAMA ROUTE

O modelo computacional de roteamento ROUTE utiliza, no mínimo, cinco arquivos de entrada: arquivos de saída do VIC (fluxes_files); informações de controle (rout_param); fração da área (fraction.file); direção de escoamento (flowdir); arquivo de localização das estações fluviométricas (stnloc.file).

3.4.1. Informações de controle

Assim como funciona o arquivo de controle para o modelo VIC, o arquivo de controle do modelo Route serve apenas para informar as localizações e os formatos dos arquivos de entrada e saída. Desta forma, o arquivo foi criado e modificado utilizando-se, também, o aplicativo *nano*.

Além da localização dos arquivos de entrada, necessita-se inserir informações dos seguintes parâmetros: difusão de fluxo (DIFF); velocidade do escoamento do rio (VELOCITY); tamanho de cada pixel (XMASK); e o período da série de dados utilizada.

Foram utilizados os padrões encontrados no website do VIC, de $800 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ e $1,5 \text{ m}.\text{s}^{-1}$ para as informações de DIFF e VELOCITY, respectivamente. Para XMASK, adotou-se a resolução espacial do modelo digital de elevação.

3.4.2. Fração da área

É um arquivo com a proporção que cada pixel está dentro da área de estudo. Para criação do arquivo *fraction.file*, seguiu-se os seguintes passos:

- Inicialmente, gerou um arquivo *raster* de alta resolução com valor constante. Para tanto, utilizou-se a equação “con (srtm>0,1)” contida na ferramenta

Raster calculator, em que o arquivo de entrada é o modelo digital de elevação da EMBRAPA Satélites (SRTM), cuja resolução é de três segundos.

- Posteriormente, converteu-se o arquivo para a resolução em que se está trabalhando (item 3.5). Para isso, utilizou-se a função *Aggregate*, do módulo *Spatial Analyst/Generalization*, configurando-se como entrada o arquivo de valor constante, criado no passo anterior, e atribuindo-se como fator de escala (*cell factor*) o valor da divisão da escala de interesse pela escala do arquivo de entrada. A técnica de agregação foi atribuída como sendo a soma.
- Em seguida, dividiu-se o mapa dos valores agregados pela raiz quadrada do fator de escala⁶, obtendo-se o mapa da fração de cada pixel cujo escoamento é convertido para a bacia.
- Por fim, exportou-se o arquivo *fraction.file* para o formato ASCII, utilizando a função *Raster to ASCII*, do módulo *Conversion Tools/From Raster*.

3.4.3. Direção de escoamento

Antes de gerar a direção de escoamento da área, necessita-se gerar o arquivo de elevação condizente com a resolução que se está trabalhando (item 3.5), mantendo-se as propriedades hidrológicas da região. Para isso, seguiu os seguintes passos:

- Inicialmente, retirou-se as depressões espúrias do *srtm* através da função *Fill*, do módulo *Spatial Analyst Tools/Hidrology*, obtendo-se o arquivo *srtm-fill*.
- Em seguida, derivou-se as direções de escoamento e o escoamento acumulado do *srtm-fill*, através das funções *Flow direction* e *Flow accumulation*, respectivamente, do módulo *Spatial Analyst Tools/Hidrology*.
- Após, criou-se os valores máximos agregados para o escoamento acumulado, os valores mínimos agregados para a altitude, e os valores

⁶ O valor do fator de escala (*cell factor*) deve ser um número real. Por isso deve-se colocar um ponto ao final do valor (inteiro) quando introduzi-lo na fórmula "fraction = Aggregate/sqr(fsc.)" dentro da *raster calculator*.

médios para a altitude, todos por meio da função *Aggregate*, respeitando o fator de escala e o tipo de técnica de agregação.

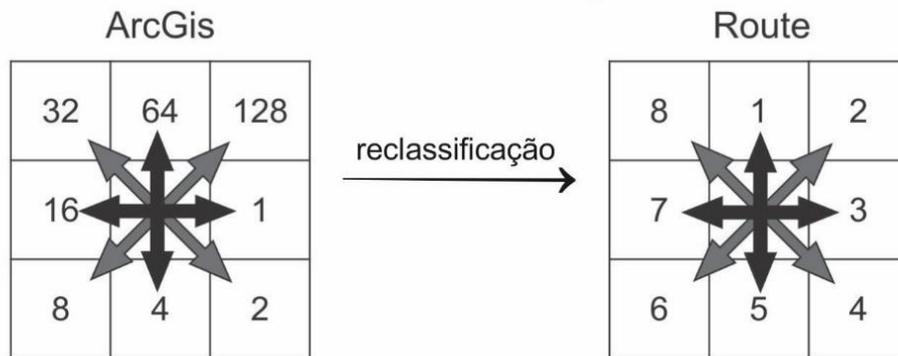
- Calculou-se o logaritmo natural do mapa de valores máximos agregados de escoamento acumulado, gerado anteriormente, utilizando a ferramenta *Raster calculator*.
- Posteriormente, utilizando-se a ferramenta *Raster calculator*, efetuou-se a operação matemática apresentada na Equação 15, atribuindo-se aos *pixels* com os maiores fluxos os valores mínimos de elevação, e aos *pixels* com os menores fluxos os valores médios de elevação. Assim, obteve-se um modelo digital de elevação de baixa resolução, com as condições de escoamento acumulado condizentes com um modelo de alta resolução.

$$MDE = \text{MinElev} + \left((\text{MdElev} - \text{MinElev}) \cdot \left(\frac{1}{\text{LnAgg} - \text{Ln}(m\text{Val})} \right) \right) \quad (15)$$

em que, *MDE*: modelo digital de elevação; *MinElev*: mapa de valores mínimos agregados de altitude; *MdElev*: mapa de valores médios agregados de altitude; *LnAgg*: mapa do logaritmo natural para o fluxo máximo agregado; *mVal*: valor mínimo encontrado no mapa do logaritmo natural para o escoamento máximo agregado

De posse do MDE de baixa resolução, derivou-se o arquivo de direção de escoamento utilizando a função *Flow direction*. Porém, o modelo necessita que os valores de direção variem de 1 a 8 e não de 1 a 128. Desta forma, foi necessário reclassificar os valores do mapa de direção de escoamento, utilizando a função *Reclassify*, do módulo *Spatial Analyst/Reclass*, em que os novos valores foram obtidos de acordo com a Figura 8.

Figura 8. Valores para a direção de escoamento do ArcGIS e de entrada no modelo Route.



Fonte: do autor.

Após a reclassificação, exportou-se o mapa de direção de escoamento para o formato ASCII, utilizando a função *Raster to ASCII*, do módulo *Conversion Tools/From Raster*.

3.4.4. Localização dos postos fluviométricos

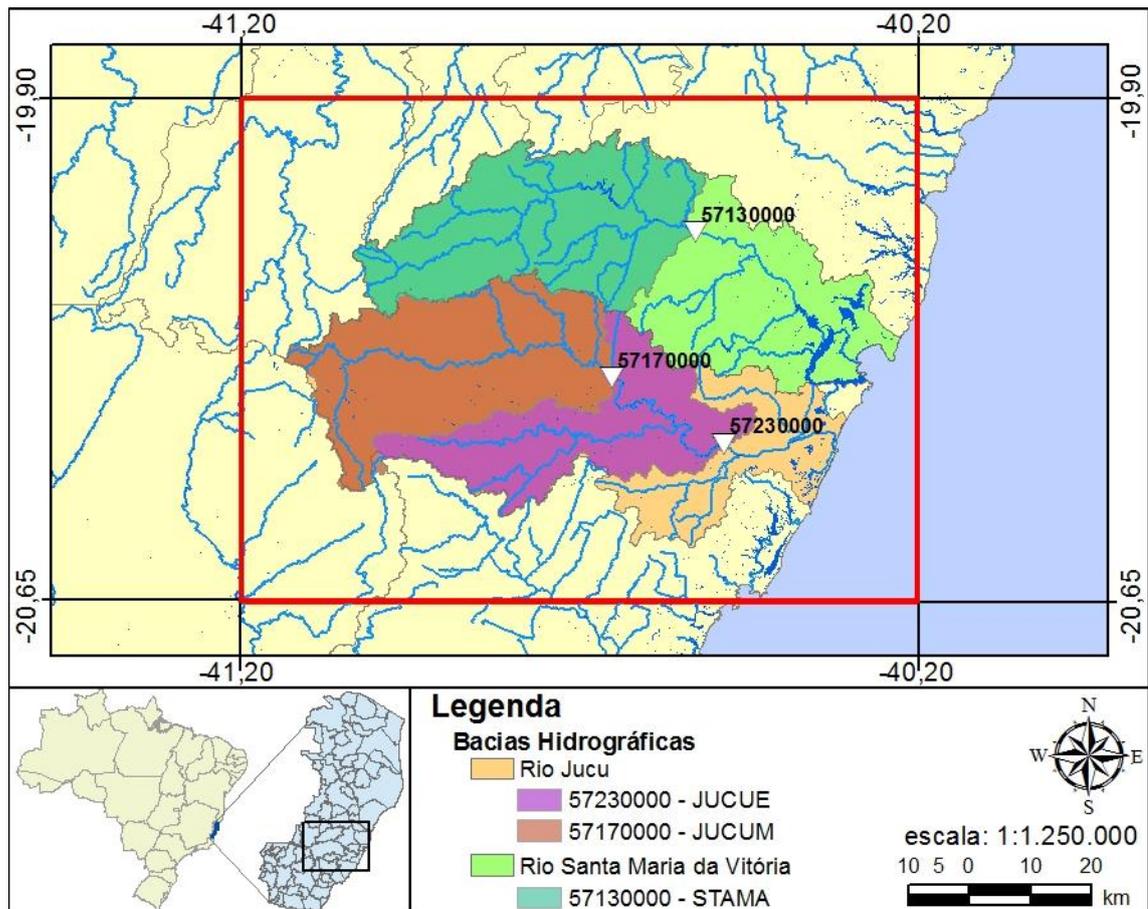
Os dados dos postos fluviométricos utilizados estão descritos na Tabela 8 e espacializados na Figura 9. Tais dados foram obtidos no website do SNIRH (Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos) gerenciado pela ANA.

Tabela 8. Postos fluviométricos utilizados no estudo

Código	Rio	Período	Latitude	Longitude	Área* (km ²)
57130000	Santa Maria da Vitória	10/1949 a 07/2012	-20,100°	-40,528°	929
57170000	Jucu-Braço Norte	10/1949 a 07/2012	-20,316°	-40,652°	980
57230000	Jucu	01/1968 a 07/2012	-20,415°	-40,485°	1690

* área da subbacia referente ao posto fluviométrico.

Figura 9. Estações fluviométricas utilizadas no presente estudo.



Fonte: do autor.

O modelo de roteamento utiliza linhas e colunas como forma de localização, iniciando-se no canto inferior esquerdo da imagem. Desta forma, foi necessário espacializar as coordenadas dos postos fluviométricos e, com auxílio do mapa de pontos proveniente do mapa de solos, quantificou-se manualmente as linhas e colunas para cada estação.

3.5. CALIBRAÇÃO

O período de calibração utilizado foi de 1992 a 1996, porém, inicialmente foi realizado o aquecimento do modelo utilizando os 3 primeiros anos da série histórica (1992 a 1994). Posteriormente, testou-se dez resoluções espaciais

distintas visando identificar qual a resolução em que o modelo apresenta maior eficiência, considerando o maior número de características da região representadas em cada pixel.

As resoluções espaciais testadas foram: 1/12°, 1/16°, 1/20°, 1/30°, 1/40°, 1/50°, 1/60°, 1/75°, 1/80° e 1/120°, o que corresponde a 9,2 km, 6,9 km, 5,5 km, 3,7 km, 2,8 km, 2,2 km, 1,8 km, 1,5 km, 1,4 km e 0,9 km, respectivamente. Valores inferiores a estes apresentaram problemas de não execução pelo modelo de roteamento, e valores maiores do que estes tornaram-se inviáveis na representação das características da região, por representá-las de forma grosseira. A escolha destes valores foi realizada observando o fator de escala a ser utilizada durante o processo de criação dos arquivos de entrada.

Os cinco parâmetros do solo passíveis de calibração (*Ds*, *Dsmax*, *Ws*, *b_inf*, e *depth*) foram variados em quatro classes (Tabela 9), obedecendo a amplitude de cada parâmetro, conforme sugerido por Gao et al. (2010), obtendo-se 1024 combinações.

Tabela 9. Valores utilizados no processo de calibração, para os cinco parâmetros passíveis de calibração.

Parâmetro	Valores			
<i>Ds</i>	0,001	0,134	0,267	0,4
<i>Dsmax</i>	0,001	0,334	0,667	1
<i>Ws</i>	0,001	10	20	30
<i>b_inf</i>	0,001	0,334	0,667	1
<i>depth</i>	0,001	0,667	1,34	2

A análise das combinações foi realizada por meio da correspondência entre as vazões simuladas e observadas, empregando-se três índices de ajuste: Coeficiente de Nash (R_{nash} – Equação 16); Coeficiente de Nash para o logaritmo das vazões (R_{log} – Equação 17) e relação entre a lâmina medida e calculada (ΔV – Equação 18).

$$R_{nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (16)$$

$$R_{\log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln Y_i - \ln X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\ln Y_i - \ln \bar{Y})^2} \quad (17)$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i) - \sum_{i=1}^n (Y_i)}{\sum_{i=1}^n (Y_i)} \cdot 100 \quad (18)$$

em que: X_i – valores simulados; Y_i – valores observados; \bar{Y} - média dos valores observados.

O desempenho de cada combinação foi classificado de acordo com Collischonn (2001), conforme consta na Tabela 10.

Tabela 10. Valores de referência para os coeficientes de Nash (R_{nash}) e de Nash para logaritmos das vazões (R_{log})

Desempenho	Valor do coeficiente (R_{nash} ou R_{log})
Adequado	> 0,75
Aceitável	0,36 a 0,75
Não aceitável	< 0,36

Fonte: COLLISCHONN, 2001.

3.6. TESTE DO DESEMPENHO DO MODELO

O período adotado para o teste do desempenho do modelo consistiu nos cinco últimos anos da série histórica utilizada (1997 a 2001), utilizando-se as melhores combinações dos parâmetros do solo encontrados no processo de calibração.

Utilizou-se os seguintes índices de ajustes para verificar a aderência do modelo aos valores observados: coeficiente de Nash (R_{nash} - Equação 16); coeficiente de Nash para logaritmos das vazões (R_{log} - Equação 17); e relação entre lâminas (ΔV - Equação 18).

3.7. MODELAGEM DE CENÁRIOS

A modelagem de diferentes cenários de uso e cobertura vegetal foi empregada apenas para a melhor combinação e melhor resolução encontrada.

Foram testados três tipos de cenários:

- O primeiro considerando a aplicação do projeto corredores ecológicos na região;
- O segundo considerando um acréscimo de 20% na área florestal de cada pixel;
- O terceiro considerando um acréscimo de 50% na área florestal de cada pixel.

Ressalta-se que o incremento da cobertura florestal foi efetuado em detrimento das feições Pastagem e Agricultura, sendo que as feições Urbano e Água não sofreram alterações, quando presentes.

Comparou-se os resultados destas modificações com os resultados obtidos durante o processo do teste do desempenho do modelo. As variáveis comparadas foram, o deflúvio (escoamento superficial e subterrâneo) e o escoamento superficial. Utilizou-se o programa sepHidro (MIRANDA, 2012) para a separação dos escoamentos subterrâneo e superficial, tanto da série histórica observada como da série simulada de vazões.

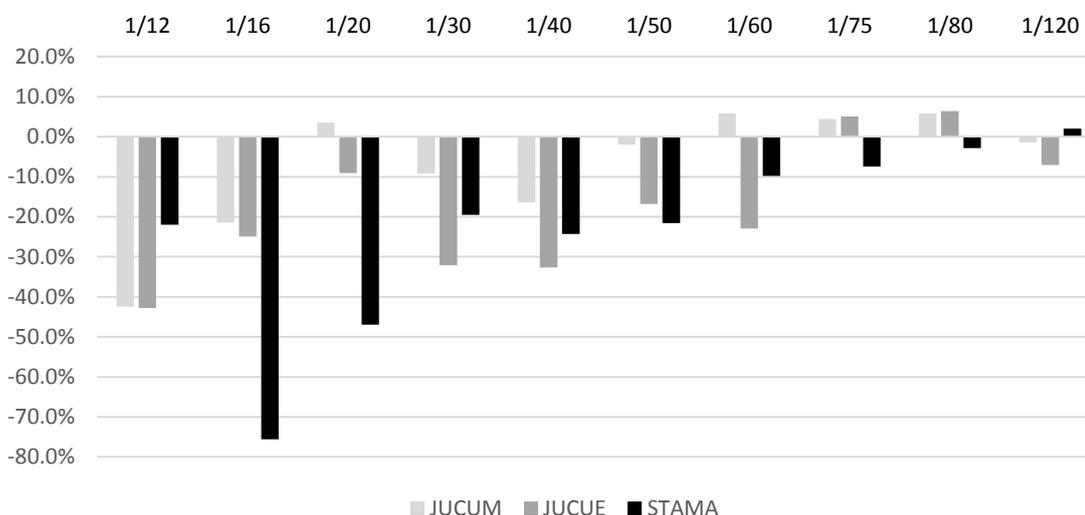
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo VIC normalmente vem sendo utilizado com escalas variando de 2° a 1/8°, embora novas aplicações utilizam uma resolução espacial maior, de 1/16°. Neste nível de resolução espacial, o modelo apenas pode ser utilizado para bacias na ordem de 500 km² com, no mínimo, 15 pixels (BECKERS et al. 2009).

A fim de possibilitar a utilização do VIC na gestão dos recursos hídricos no estado do Espírito Santo, avaliando as modificações de uso e cobertura do solo, foi necessário verificar escalas com maiores detalhes de informações, que venham a contribuir com esta premissa.

Desta maneira, a Figura 10 apresenta a variação da área de drenagem ocorrida nas bacias do rio Jucu braço norte (JUCUM), do rio Jucu (JUCUE) e do rio Santa Maria da Vitória (STAMA), durante o processo de criação dos arquivos de entrada.

Figura 10. Variação do tamanho da bacia em relação ao tipo de resolução utilizada.



Fonte: do autor.

Observa-se 23 casos de subestimativa de área em 30 ocorrências, isso ocorre por grande parte do pixel gerado durante o processo estar compreendido fora da área real da bacia, ou a direção de escoamento predominante obtida no

processo não ser direcionada a incluir um determinado pixel como área da bacia. Este processo aumentou à medida em que se diminuiu a resolução.

A bacia que apresentou maiores modificações de seu tamanho em relação à resolução foi a STAMA, onde a maior variação encontrada dentre todas as bacias foi na resolução de 1/16^o, resultando numa subestimação de 75%. Isto indica a necessidade de um cuidado maior durante a escolha da escala a ser trabalhada, pois os arquivos de entrada do modelo são derivados de um modelo digital de elevação com uma resolução espacial maior, tornando difícil o controle sobre a delimitação da bacia de estudo.

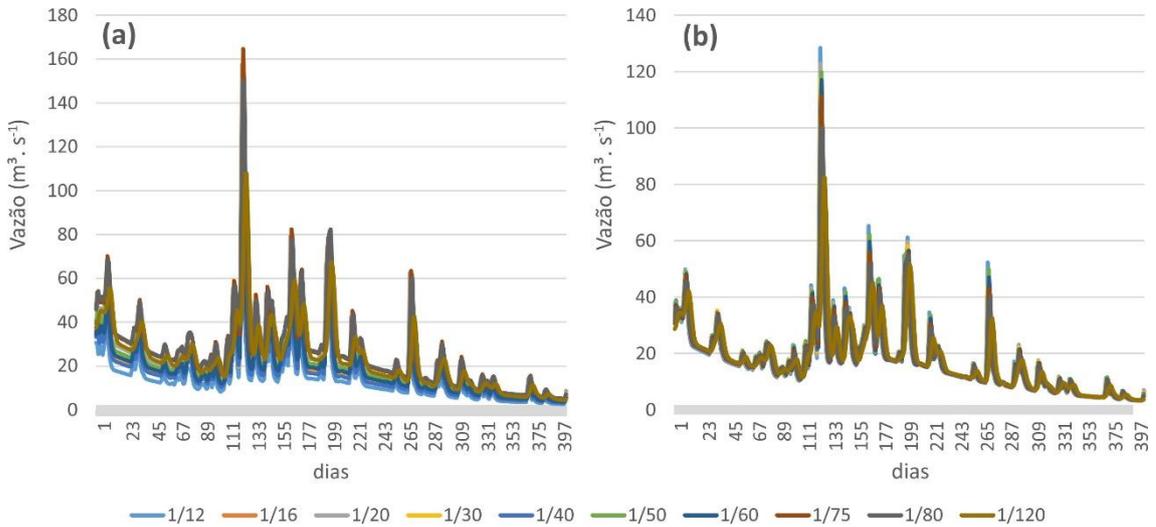
Cabe ressaltar que ao se trabalhar com a comparação entre diferentes resoluções espaciais, deve-se considerar o fenômeno aleatório causado pelo início da grade para o processo de modificação dessa resolução. A dispersão dos dados será maior à medida que o tamanho dessa grade aumente, e com isso a possibilidade de subestimativa da área de drenagem da bacia, neste caso, será maior do que em grades menores.

A superestimação da área de drenagem das bacias foi observada em 7 casos, dentre 30 possibilidades, sendo que estas ocorrências não ultrapassaram o patamar de 10% de incremento. Portanto, considera-se que esta alteração não irá apresentar risco expressivo às simulações nestes níveis de resolução, mesmo que o objetivo seja avaliar a mudança de uso e cobertura vegetal, uma vez que uma área maior que a da bacia estará sendo representada.

Quando se compara a vazão simulada para um mesmo período usando as diferentes resoluções (Figura 11), observa-se que o deflúvio para as diferentes resoluções, com o mesmo tamanho de bacia, não sofreram grandes alterações, apenas nas simulações das vazões máximas. Porém, ao se incorporar o tamanho de cada bacia, referente a cada resolução, estas diferenças no deflúvio são mais expressivas, assim como as diferenças entre as vazões máximas.

Desta forma, o que torna uma escala melhor do que outra para uma determinada bacia, além do seu objetivo principal, é o tamanho da área reconhecida pelo modelo, pois este fator afeta diretamente o volume de água que uma bacia pode contribuir.

Figura 11. Comparação entre a vazão simulada pelo modelo VIC, para o mesmo período quando: (a) se utiliza os tamanhos das bacias inseridas no modelo; (b) e quando se utiliza o tamanho real da bacia.



Fonte: do autor.

Utilizando o mesmo preceito de Beckers et al.(2009), em todo o processo de calibração realizado no presente estudo, utilizou-se como padrão a escala de 1/16^o. Posteriormente, as combinações com os melhores resultados foram aplicada para as demais resoluções.

Dentre as 1024 combinações testadas, as 10 melhores para cada posto fluviométrico de controle estão apresentadas na Tabela 11.

As quatro melhores combinação encontradas para o posto STAMA foram: 607, 603, 606 e 671. Já para os postos JUCUM e JUCUE foram: 351, 348, 347 e 352. Para todas as combinações testadas, nenhuma foi capaz de representar com grande exatidão os valores mínimos e médios das vazões observadas para cada estação, fato este comprovado pelos baixos valores de Rlog.

Tabela 11. Dez melhores combinações dos parâmetros encontrados no período de calibração para as três estações de controle

Estação	Comb	b_inf	ds	ds_max	ws	D3	Rnash	Rlog	ΔV
STAMA	607	0,267	0,334	10	1	1,34	0,24	-2,68	-42%
	603	0,267	0,334	10	0,667	1,34	0,23	-3,23	-41%
	606	0,267	0,334	10	1	0,667	0,23	-3,80	-41%
	671	0,267	0,667	10	1	1,34	0,23	-3,77	-41%
	623	0,267	0,334	20	1	1,34	0,23	-3,78	-41%
	602	0,267	0,334	10	0,667	0,667	0,23	-4,81	-41%
	604	0,267	0,334	10	0,667	2	0,23	-2,81	-42%
	624	0,267	0,334	20	1	2	0,23	-3,16	-42%
	672	0,267	0,667	10	1	2	0,23	-3,16	-42%
	608	0,267	0,334	10	1	2	0,23	-2,51	-44%
JUCUM	351	0,134	0,334	10	1	2	-0,45	-5,59	-48%
	348	0,134	0,334	10	0,667	2	-0,44	-5,87	-46%
	347	0,134	0,334	10	1	1,34	-0,43	-5,51	-45%
	352	0,134	0,667	10	1	2	-0,46	-6,46	-44%
	416	0,134	0,334	20	1	2	-0,46	-6,46	-44%
	368	0,134	0,334	10	0,667	1,34	-0,45	-6,46	-44%
	350	0,134	0,334	10	1	0,667	-0,48	-7,69	-44%
	415	0,134	0,667	10	1	1,34	-0,49	-7,58	-43%
	367	0,134	0,334	20	1	1,34	-0,49	-7,58	-43%
	276	0,134	0,001	10	0,001	2	-0,51	-7,89	-43%
JUCUE	351	0,134	0,334	10	1	1,34	-0,28	-4,30	-57%
	347	0,134	0,334	10	0,667	1,34	-0,28	-4,50	-56%
	348	0,134	0,334	10	0,667	2	-0,27	-4,18	-56%
	352	0,134	0,334	10	1	2	-0,29	-4,89	-56%
	368	0,134	0,334	20	1	2	-0,29	-4,89	-56%
	350	0,134	0,334	10	1	0,667	-0,28	-4,82	-55%
	367	0,134	0,334	20	1	1,34	-0,29	-5,61	-56%
	276	0,134	0,001	10	0,001	2	-0,31	-5,85	-55%
	344	0,134	0,334	10	0,334	2	-0,30	-5,57	-55%
	412	0,134	0,667	10	0,667	2	-0,30	-5,57	-55%

Comb – número da combinação; Rnash – Coeficiente de Nash; Rlog – Coeficiente de Nash para logaritmo das vazões; ΔV – relação entre a lâmina medida e calculada.

Para o período de calibração, apenas para a estação do rio Santa Maria da Vitória (STAMA) foi encontrado valores positivos de Rnash, nos quais, segundo a classificação de Collischonn (2001), são considerados como desempenho insatisfatório. Ao se analisar a diferença da lâmina existente entre os valores observados e os valores simulados, nota-se que as melhores simulações apresentaram, em média, subestimativa de 50%.

Valores negativos, durante o período de calibração, também foram encontrados por Victoria (2010), para as sub-bacias do rio Japurá ($R_{nash} = -2$; $R_{log} = -2,8$; e $\Delta V = -0,48$) e do rio Santo Antônio do Içá ($R_{nash} = -7$; $R_{log} = -33$; e $\Delta V = -0,83$), ambas inseridas na bacia do rio Amazonas. Estes resultados foram atribuídos a subestimativa do total de chuvas ao se interpolar os dados de precipitação e gerar os dados de entrada do modelo.

Victoria (2010) ainda conclui que, apesar dos problemas encontrados, as descargas das bacias foram simuladas corretamente, demonstrando que por um lado o modelo é capaz de representar a vazão dos rios; entretanto, por outro lado, deve se estar atento a outras variáveis simuladas, pois erros internos no modelo podem ser compensados, gerando um resultado final satisfatório, porém incoerente.

Zhu e Lettenmaier (2007), trabalhando com 14 bacias no território do México, encontraram valores de coeficiente de Nash abaixo de 0,1 para as bacias do semiárido (Casas Grandes, Villalba), em que o maior problema foi a subestimação e superestimação dos picos de vazão em alguns anos. Os autores não encontraram uma razão específica para o ocorrido, tendo-se suspeitado da existência de erros na entrada da precipitação e/ou da deficiência na parametrização do modelo.

Os valores negativos encontrados durante o processo de calibração para as bacias dos rios Jucu e Santa Maria da Vitória podem ser atribuídos a alguns fatores como:

- As bacias possuem grandes peculiaridades, sendo que um modelo de caráter global não consegue considerar muitos detalhes. Por exemplo, a influência da declividade, a localização espacial da vegetação e, até mesmo, o fato do modelo assumir uma única taxa de infiltração para todo o perfil do solo dentro de uma grande área;
- O modelo simula apenas as vazões naturais do rio, não considerando as barragens, a menos que seja introduzidas as informações necessárias. Neste estudo não foi possível fornecer informações sobre barragens, devido ao tamanho pouco representativo destas em relação ao tamanho do pixel;

- Erros inerentes aos dados de solo e vegetação, uma vez que as informações da área tiveram que ser convertidas em informações dos bancos de dados americanos, para que se pudesse obter os dados necessários de entrada no modelo. Tais erros são principalmente oriundos do solo, visto que este é o principal modulador dos processos hidrológicos no modelo, em que ao ser caracterizado com as informações do USDA, provavelmente resultaram em características totalmente distintas das encontradas na região estudada;
- A metodologia abordada durante o processo de calibração não ter encontrado o ponto ótimo entre os parâmetros que sofreram as variações.

Collischonn e Tucci (2003) revelam que a calibração manual, dependendo do grau de experiência do usuário, pode aumentar as incertezas e estabelecer resultados absurdos, sendo que uma solução viável seria o uso de técnicas de calibração automática. Uma das técnicas mais indicadas para avaliar os aspectos da qualidade do ajuste entre hidrogramas calculados e observados são as calibrações automáticas multi-objeto.

Um dos métodos de calibração mais utilizados quando se trabalha com o modelo VIC é o MOCON-UA, desenvolvido por Yapo (1998), baseado na teoria do ótimo de Pareto, que consiste em encontrar um ponto comum entre duas funções objetivos, no qual não exista interferência negativa em ambas.

Nas Tabelas 12, 13 e 14 são apresentados os resultados obtidos para o período do teste de desempenho, referente à simulação das quatro melhores combinações para os posto do rio Santa Maria da Vitória (STAMA), rio Jucubraço norte (JUCUM) e rio Jucu (JUCUE), respectivamente.

Independente da combinação para o posto STAMA, a resolução de 1/16^o apresentou os piores resultados no teste do desempenho para todos os índices avaliados, valores estes muito abaixo dos encontrados no processo de calibração. As combinações 348 e 351 foram as melhores encontradas para todos os níveis de escala, sendo que em todos os testes os resultados do coeficiente de Nash foi positivo.

Tais combinações não se destacaram entre as melhores durante a calibração para este posto de controle, mostrando que muitas das vezes os melhores resultados encontrados durante este processo, não são os melhores

resultados durante o processo de teste de desempenho, fazendo necessário trabalhar com uma gama dos melhores resultados de calibração como entrada para o processo de teste de desempenho.

Tabela 12. Resultados das melhores combinações encontradas na calibração do modelo VIC, para o período do teste do desempenho do modelo, para o rio Santa Maria da Vitória (STAMA), nas diferentes resoluções.

Comb.	Estat.	Escalas									
		1/12	1/16	1/20	1/30	1/40	1/50	1/60	1/75	1/80	1/120
347	Rnash	0,41	0,05	0,40	0,39	0,40	0,36	0,24	0,17	0,08	-0,06
	Rlog	-0,10	-3,14	-0,76	-0,18	-0,20	-0,12	-0,05	-0,03	-0,02	0,02
	ΔV	-8%	-72%	-38%	-7%	-12%	-8%	5%	8%	13%	20%
	REs	0,28	0,22	0,36	0,25	0,27	0,21	0,06	-0,02	-0,11	-0,24
348	Rnash	0,43	0,03	0,26	0,41	0,37	0,37	0,28	0,22	0,14	0,02
	Rlog	0,17	-2,47	-1,25	0,12	-0,45	-0,33	0,20	0,21	0,20	0,21
	ΔV	-10%	-72%	-53%	-8%	-32%	-29%	4%	6%	12%	14%
	REs	0,28	0,22	0,32	0,26	0,35	0,33	0,06	-0,01	-0,10	-0,23
351	Rnash	0,42	0,03	0,37	0,40	0,41	0,37	0,27	0,21	0,14	0,02
	Rlog	0,14	-2,67	-0,43	0,08	0,07	0,12	0,19	0,19	0,20	0,21
	ΔV	-12%	-73%	-41%	-11%	-16%	-12%	1%	4%	9%	14%
	REs	0,27	0,22	0,35	0,25	0,26	0,20	0,05	-0,03	-0,12	-0,23
352	Rnash	0,33	0,10	0,41	0,30	0,34	0,29	0,10	0,01	-0,10	-0,23
	Rlog	-0,21	-3,41	-0,92	-0,29	-0,31	-0,24	-0,14	-0,12	-0,10	-0,04
	ΔV	-6%	-71%	-37%	-5%	-10%	-6%	8%	11%	16%	22%
	REs	0,27	0,29	0,32	0,25	0,35	0,33	0,05	-0,02	-0,11	-0,60
603	Rnash	0,32	0,11	0,43	0,29	0,33	0,27	0,06	-0,02	-0,15	-0,29
	Rlog	-0,51	-4,00	-1,34	-0,64	-0,65	-0,57	-0,47	-0,43	-0,40	-0,31
	ΔV	-4%	-70%	-35%	-2%	-7%	-3%	11%	14%	19%	26%
	REs	0,02	0,29	0,34	-0,02	0,07	-0,02	-0,02	-0,42	-0,56	-0,59
606	Rnash	0,29	0,12	0,43	0,26	0,31	0,25	0,02	-0,07	-0,21	-0,35
	Rlog	-0,86	-4,78	-1,83	-1,02	-1,03	-0,92	-0,79	-0,74	-0,69	-0,55
	ΔV	-4%	-70%	-35%	-2%	-8%	-4%	10%	13%	19%	25%
	REs	0,01	0,29	0,34	-0,03	0,06	-0,03	-0,33	-0,43	-0,58	-0,61
607	Rnash	0,33	0,10	0,41	0,30	0,34	0,29	0,10	0,01	-0,10	-0,23
	Rlog	-0,21	-3,41	-0,92	-0,29	-0,31	-0,24	-0,14	-0,12	-0,10	-0,04
	ΔV	-0,06	-0,71	-0,37	-0,05	-0,10	-0,06	0,08	0,11	0,16	0,22
	REs	0,01	0,29	0,34	-0,02	0,06	-0,03	-0,33	-0,44	-0,58	-0,60
671	Rnash	0,30	0,13	0,43	0,27	0,32	0,26	0,03	-0,06	-0,20	-0,35
	Rlog	-0,79	-4,54	-1,70	-0,94	-0,95	-0,85	-0,74	-0,69	-0,65	-0,52
	ΔV	-6%	-71%	-37%	-5%	-10%	-6%	8%	11%	16%	22%
	REs	0,02	0,29	0,34	-0,01	0,07	-0,02	-0,31	-0,41	-0,55	-0,59

Comb – número da combinação; Rnash – Coeficiente de Nash; Rlog – Coeficiente de Nash para logaritmo das vazões; ΔV – relação entre a lâmina medida e calculada; REs – Coeficiente de Nash para os valores de escoamento superficial.

Com exceção da resolução de 1/16^o, todas as combinações apresentaram-se melhores na simulação das vazões médias e mínimas durante o período do teste de desempenho. Estas melhoras, provavelmente, é devido ao maior número de eventos intensos de precipitação encontrados no período do

teste de desempenho, os quais proporcionaram que o escoamento subterrâneo não diminuísse drasticamente, como observado no período de calibração. Entretanto a resolução de 1/16^o não se mostrou sensível à este aumento de eventos de precipitação.

Tabela 13. Resultados das melhores combinações encontradas na calibração do modelo VIC, para o período do teste do desempenho do modelo, para o rio Jucu Braço Norte (JUCUM), nas diferentes resoluções.

Comb.	Estat.	Escala									
		1/12	1/16	1/20	1/30	1/40	1/50	1/60	1/75	1/80	1/120
347	Rnash	-0,56	-1,54	-3,88	-2,51	-1,89	-3,37	-4,28	-4,08	-4,18	-3,26
	Rlog	-4,94	-2,75	-2,19	-2,18	-2,37	-1,95	-1,87	-1,87	-1,84	-1,86
	ΔV	-30%	-3%	27%	13%	4%	23%	33%	31%	33%	25%
	REs	-0,64	-2,08	-4,70	-3,18	-2,45	-4,00	-4,81	-4,52	-4,43	-3,26
348	Rnash	-0,43	-1,20	-1,59	-2,02	-0,74	-1,39	-3,53	-3,35	-3,42	-2,64
	Rlog	-3,42	-1,63	-2,31	-1,22	-2,70	-2,03	-1,06	-1,06	-1,05	-1,11
	ΔV	-32%	-5%	1%	11%	-16%	0%	31%	29%	31%	20%
	REs	-0,63	-2,07	-1,59	-3,17	-0,63	-1,30	-4,80	-4,49	-4,40	-3,24
351	Rnash	-0,48	-1,24	-3,23	-2,06	-1,52	-2,78	-3,55	-3,37	-3,44	-2,64
	Rlog	-3,74	-1,79	-1,31	-1,31	-1,47	-1,15	-1,10	-1,10	-1,08	-1,11
	ΔV	-33%	-7%	22%	8%	0%	19%	28%	26%	28%	20%
	REs	-0,67	-2,13	-4,79	-3,25	-2,50	-4,10	-4,93	-4,61	-4,51	-3,24
352	Rnash	-0,94	-2,43	-5,68	-3,78	-2,89	-4,86	-6,07	-5,76	-5,82	-4,41
	Rlog	-5,37	-3,03	-2,37	-2,39	-2,61	-2,13	-2,01	-2,00	-1,96	-1,97
	ΔV	-29%	-1%	29%	15%	6%	26%	35%	33%	35%	27%
	REs	-0,66	-4,74	-1,62	-3,24	-0,65	-1,33	-4,91	-4,59	-4,46	-5,85
603	Rnash	-1,01	-2,65	-6,16	-4,12	-3,16	-5,29	-6,60	-6,27	-6,35	-4,87
	Rlog	-6,80	-4,18	-3,43	-3,43	-3,70	-3,10	-2,94	-2,93	-2,87	-2,86
	ΔV	-27%	1%	33%	18%	9%	29%	39%	37%	39%	30%
	REs	-1,85	-4,68	-9,69	-6,77	-5,32	-8,14	-9,67	-9,03	-8,70	-5,87
606	Rnash	-1,13	-2,91	-6,65	-4,48	-3,46	-5,74	-7,13	-6,79	-6,88	-5,31
	Rlog	-8,46	-5,41	-4,48	-4,50	-4,83	-4,08	-3,85	-3,84	-3,75	-3,74
	ΔV	-27%	1%	32%	17%	8%	28%	38%	36%	38%	29%
	REs	-1,88	-4,74	-9,81	-6,85	-5,39	-8,25	-9,79	-9,14	-8,83	-6,02
607	Rnash	-0,94	-2,43	-5,68	-3,78	-2,89	-4,86	-6,07	-5,76	-5,82	-4,41
	Rlog	-5,37	-3,03	-2,37	-2,39	-2,61	-2,13	-2,01	-2,00	-1,96	-1,97
	ΔV	-29%	-1%	29%	15%	6%	26%	35%	33%	35%	27%
	REs	-1,88	-4,74	-9,80	-6,85	-5,39	-8,24	-9,79	-9,16	-8,83	-5,85
671	Rnash	-1,08	-2,85	-6,58	-4,42	-3,40	-5,66	-7,05	-6,71	-6,81	-5,26
	Rlog	-8,05	-5,17	-4,32	-4,32	-4,63	-3,94	-3,73	-3,72	-3,64	-3,62
	ΔV	-26%	3%	34%	19%	10%	30%	40%	38%	40%	32%
	REs	-1,83	-4,63	-9,61	-6,70	-5,27	-8,06	-9,57	-8,93	-8,64	-5,90

Comb – número da combinação; Rnash – Coeficiente de Nash; Rlog – Coeficiente de Nash para logaritmo das vazões; ΔV – relação entre a lâmina medida e calculada; REs – Coeficiente de Nash para os valores de escoamento superficial.

Tabela 14. Resultados das melhores combinações encontradas na calibração do modelo VIC, para o período do teste do desempenho do modelo, para rio Jucu (JUCUE), para as diferentes resoluções.

Comb.	Estat.	Escala									
		1/12	1/16	1/20	1/30	1/40	1/50	1/60	1/75	1/80	1/120
347	Rnash	-0,21	-0,53	-1,18	-0,33	-0,35	-0,90	-0,63	-2,04	-2,05	-1,29
	Rlog	-3,19	-2,03	-1,26	-2,38	-2,61	-1,65	-1,86	-1,07	-0,93	-1,46
	ΔV	-37%	-18%	1%	-26%	-27%	-8%	-15%	16%	19%	1%
	REs	-0,18	-0,84	-1,76	-0,50	-0,50	-1,39	-0,95	-2,65	-2,50	-1,43
348	Rnash	-0,15	-0,36	-0,45	-0,22	-0,25	-0,37	-0,44	-1,59	-1,58	-0,98
	Rlog	-2,23	-1,21	-1,61	-1,50	-3,44	-2,14	-1,07	-0,49	-0,40	-0,85
	ΔV	-38%	-19%	-18%	-27%	-41%	-26%	-16%	15%	17%	-2%
	REs	-0,18	-0,84	-0,31	-0,50	0,14	-0,17	-0,96	-2,67	-2,52	-1,47
351	Rnash	-0,18	-0,40	-0,92	-0,25	-0,27	-0,70	-0,47	-1,62	-1,60	-0,98
	Rlog	-2,43	-1,35	-0,68	-1,67	-1,85	-1,00	-1,19	-0,53	-0,43	-0,85
	ΔV	-39%	-21%	-3%	-28%	-30%	-12%	-18%	12%	15%	-2%
	REs	-0,21	-0,88	-1,85	-0,54	-0,53	-1,46	-1,01	-2,75	-2,61	-1,47
352	Rnash	-0,40	-0,90	-1,86	-0,58	-0,59	-1,38	-0,99	-2,90	-2,83	-1,72
	Rlog	-5,04	-2,25	-1,38	-2,63	-2,86	-1,83	-2,04	-1,16	-0,99	-1,53
	ΔV	-39%	-16%	3%	-24%	-26%	-7%	-14%	18%	21%	3%
	REs	-0,20	-2,32	-0,33	-0,33	0,13	-0,19	-1,00	-2,74	-2,60	-2,88
603	Rnash	-0,38	-1,00	-2,06	-0,65	-0,66	-1,53	-1,11	-3,21	-3,16	-1,95
	Rlog	-4,33	-3,04	-2,05	-3,46	-3,76	-2,60	-2,82	-1,81	-1,58	-2,26
	ΔV	-34%	-14%	5%	-22%	-24%	-4%	-11%	21%	24%	6%
	REs	-0,85	-2,29	-4,16	-1,56	-1,54	-3,22	-2,40	-5,68	-5,33	-2,84
606	Rnash	-0,44	-1,14	-2,29	-0,76	-0,76	-1,71	-1,27	-3,52	-3,48	-2,17
	Rlog	-5,44	-3,98	-2,83	-4,47	-4,81	-3,47	-5,94	-2,50	-2,21	-3,02
	ΔV	-34%	-14%	5%	-23%	-24%	-4%	-16%	21%	24%	6%
	REs	-0,89	-2,34	-4,28	-1,60	-1,57	-3,28	-2,45	-5,75	-5,39	-2,87
607	Rnash	-0,40	-0,90	-1,86	-0,58	-0,59	-1,38	-0,99	-2,90	-2,83	-1,72
	Rlog	-5,04	-2,25	-1,38	-2,63	-2,86	-1,83	-2,04	-1,16	-0,99	-1,53
	ΔV	-39%	-16%	3%	-24%	-26%	-7%	-14%	18%	21%	3%
	REs	-0,85	-2,32	-4,22	-1,59	-1,56	-3,27	-2,44	-5,76	-5,41	-2,88
671	Rnash	-0,41	-1,10	-2,23	-0,72	-0,73	-1,67	-1,22	-3,47	-3,44	-2,14
	Rlog	-5,16	-3,77	-2,68	-4,24	-4,57	-3,30	-3,54	-2,40	-2,12	-2,88
	ΔV	-33%	-13%	7%	-21%	-23%	-3%	-10%	23%	26%	7%
	REs	-0,84	-2,26	-4,12	-1,54	-1,51	-3,18	-2,37	-5,61	-5,26	-2,81

Comb – número da combinação; Rnash – Coeficiente de Nash; Rlog – Coeficiente de Nash para logaritmo das vazões; ΔV – relação entre a lâmina medida e calculada; REs – Coeficiente de Nash para os valores de escoamento superficial.

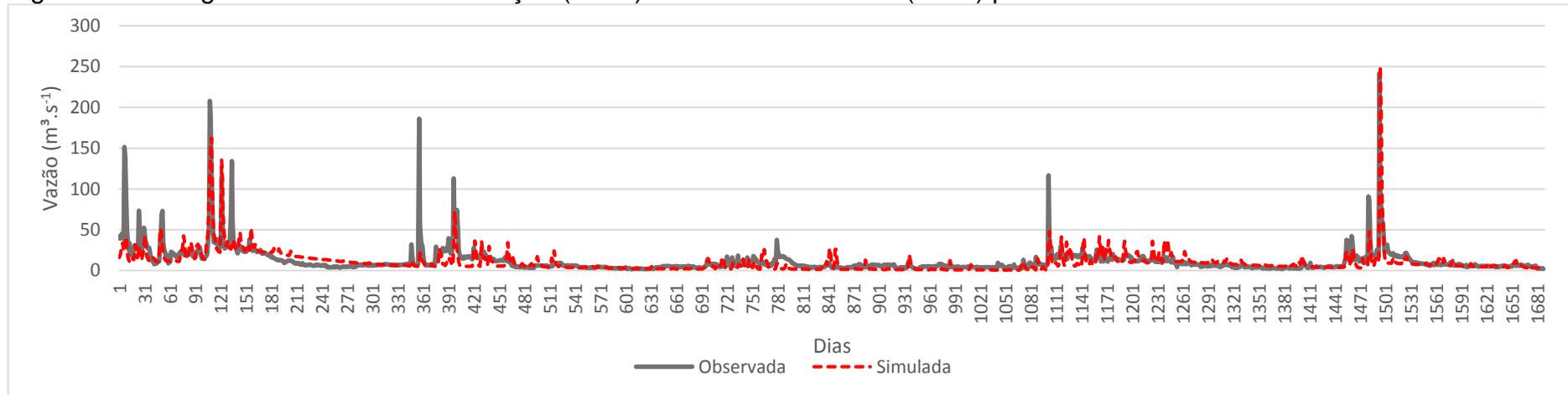
Os resultados para os dois postos existentes na bacia do rio Jucu (JUCUM e JUCUE) apresentaram o mesmo comportamento, não tendo sido encontrados valores positivos de Rnash para nenhuma combinação, em nenhuma das escala testadas. Porém, os resultados da relação entre as lâminas foram melhores que durante o processo de calibração.

Assim como observado para o posto de controle no rio Santa Maria da Vitória, as combinações 348 e 351 foram as que proporcionaram os melhores resultados, independente da escala adotada.

No geral, quanto mais próximo da área de drenagem real da bacia as simulações se aproximaram, piores foram os resultados encontrados. Ao se aumentar a resolução, insere-se no modelo novos tipos de solo e/ou novas localizações e proporções de cada um. Com isso, o modelo não consegue capturar todas as especificidades da região, ao mesmo tempo em que necessita de uma nova calibração específica a este nível de resolução, para que estes novos solos sejam incorporados na dinâmica hidrológica do modelo.

O melhor conjunto “Resolução x Combinação” encontrado foi o “1/12° x C348”. Onde os hidrogramas resultantes de cada posto fluviométrico de controle, estão representados nas Figuras 12, 13 e 14.

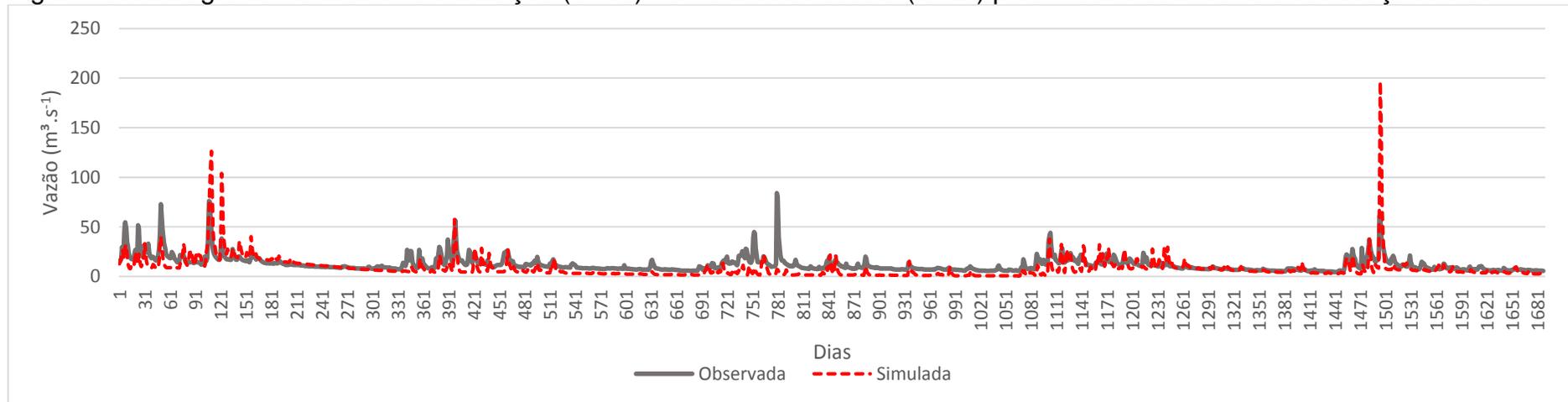
Figura 12. Hidrograma da melhor combinação (C348) com a melhor escala (1/12⁰) para a sub-bacia do rio Santa Maria da Vitória.



Fonte: do autor.

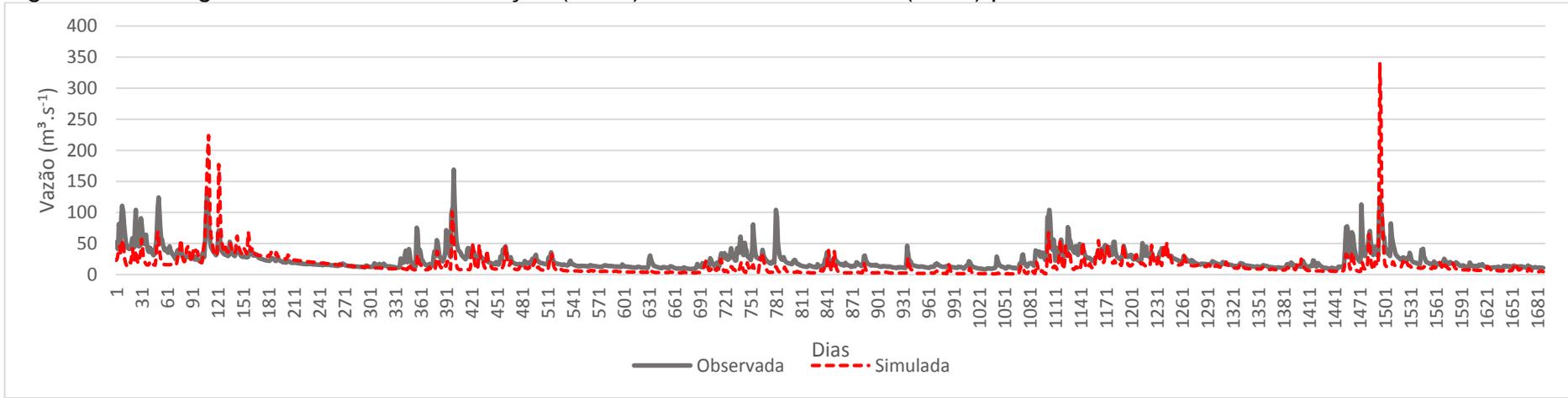
69

Figura 13. Hidrograma da melhor combinação (C348) com a melhor escala (1/12⁰) para a sub-bacia do rio Jucu Braço Norte.



Fonte: do autor.

Figura 14. Hidrograma da melhor combinação (C348) com a melhor escala (1/12^o) para a sub-bacia do rio Jucu.



Fonte: do autor.

Os hidrogramas resultantes da simulação de cenários estão representados nas Figuras 15, 17 e 19, em que foram comparados com os resultados do conjunto C348x1/12. As diferenças são mais visíveis na escala cuja vazão é inferior a 30 m³.s⁻¹ (Figuras 16, 18 e 20).

Ao se analisar a variação da lâmina simulada (Tabela 15), observa-se que houve uma diminuição da vazão média bem como da lâmina à medida em que se aumenta a porcentagem de cobertura florestal. O aumento da cobertura florestal aumenta a evapotranspiração, a interceptação da precipitação na bacia e a capacidade de infiltração. Assim, segundo Tucci (2007), ocorre a tendência de reduzir a variação da vazão ao longo do ano, retardando e reduzindo o pico das cheias.

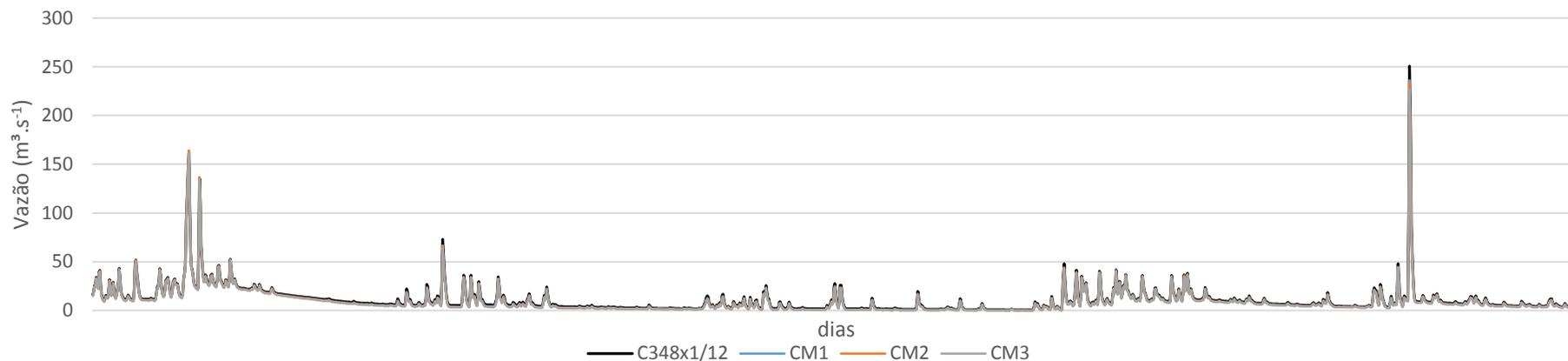
Tabela 15. Valores de deflúvio médio (\bar{Q}) e de variação da lâmina em relação a melhor combinação (ΔV) para os cenários projetados de uso e cobertura do solo

Cenários	STAMA		JUCUM		JUCUE	
	\bar{Q}	ΔV	\bar{Q}	ΔV	\bar{Q}	ΔV
C348	10.5	-	8.3	-	14.9	-
Mod1	9.6	-8.5%	8.3	-0.1%	14.9	-0.2%
Mod2	9.4	-10.4%	7.5	-9.0%	13.7	-8.2%
Mod3	9.1	-12.8%	7.1	-13.8%	13.0	-12.9%

CM1 – aplicação do projeto corredores ecológicos; CM2 – incremento de 20% da cobertura florestal; CM3 – incremento de 50% da cobertura florestal.

No entanto, Santiago (2005) analisando o efeito da substituição total da cobertura atual para floresta na bacia do rio Ji-Paraná (Rondônia), encontrou redução de 9% nas vazões na época chuvosa e 20% no mês seco. Ao se comparar com os outros cenários testados (atual, totalidade de pastagem, totalidade de soja) constatou que o cenário com floresta apresentou os maiores índices de evapotranspiração, onde a taxa encontrada foi o dobro da pastagem e o triplo da soja.

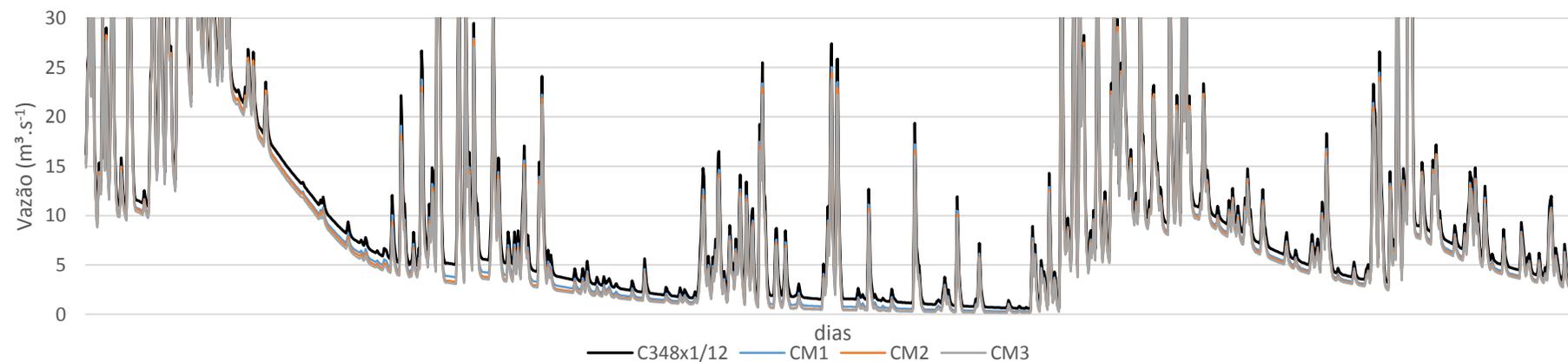
Figura 15. Hidrograma da melhor combinação e dos cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Santa Maria da Vitória.



Fonte: do autor.

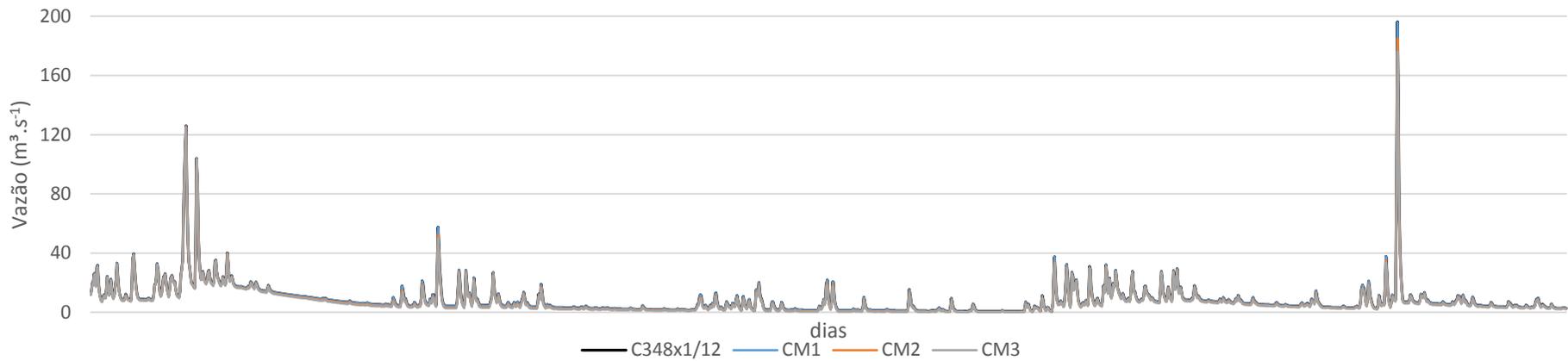
64

Figura 16. Detalhe para as vazões menores de 50 m³.s⁻¹ do hidrograma da melhor combinação e dos cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Santa Maria da Vitória



Fonte: do autor.

Figura 17. Hidrograma da melhor combinação e os cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Jucu Braço Norte.



Fonte: do autor.

69

Figura 18. Detalhe para as vazões menores de 50 m³.s⁻¹ do hidrograma da melhor combinação e os cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Jucu Braço Norte.

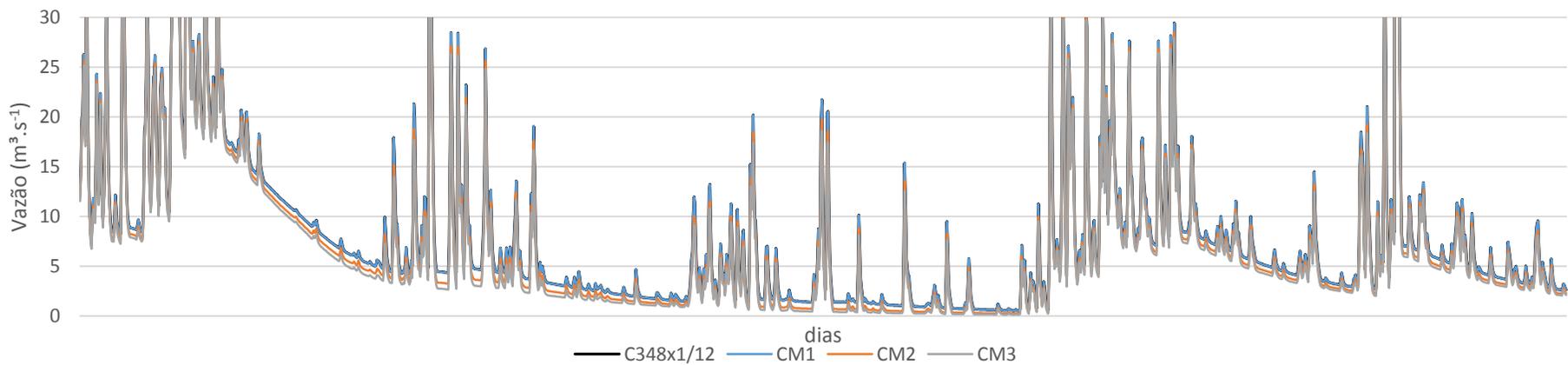
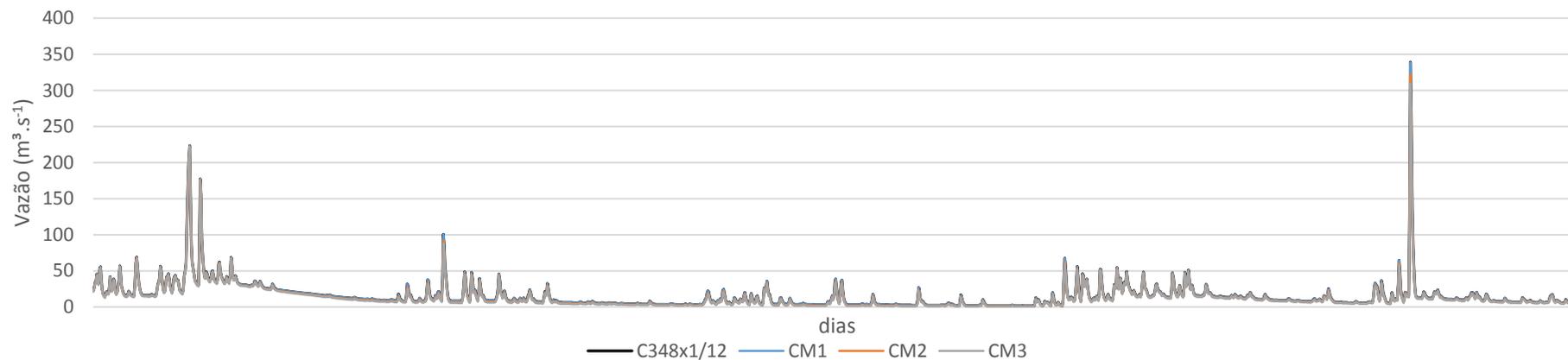
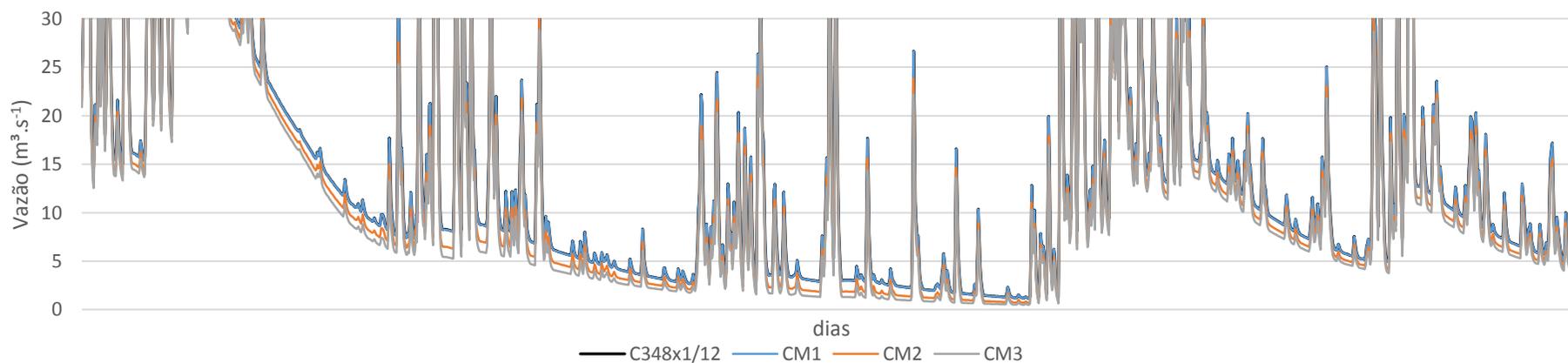


Figura 19. Hidrograma da melhor combinação e os cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Jucu.



Fonte: do autor.

99 Figura 20. Detalhe para as vazões menores de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do hidrograma da melhor combinação e os cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal para a sub-bacia do rio Jucu.



Fonte: do autor.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados obtidos referentes ao volume do escoamento superficial.

Tabela 16. Valores de escoamento superficial médio ($\bar{E}s$) e de variação do volume de escoamento superficial em relação a melhor combinação (ΔV) para os cenários projetados de uso e cobertura do solo

Cenários	STAMA		JUCUM		JUCUE	
	$\bar{E}s$	ΔV	$\bar{E}s$	ΔV	$\bar{E}s$	ΔV
C348	4.4	-	3.4	-	6.1	-
CM1	4.2	-3.3%	3.4	-0.1%	6.1	-0.1%
CM2	4.2	-3.1%	3.3	-3.6%	5.9	-3.4%
CM3	4.1	-5.2%	3.2	-5.7%	5.7	-5.4%

CM1 – aplicação do projeto corredores ecológicos; CM2 – incremento de 20% da cobertura florestal; CM3 – incremento de 50% da cobertura florestal.

Com o aumento da cobertura florestal, houve uma diminuição no escoamento superficial, devido ao aumento da evapotranspiração, da interceptação e da infiltração. Independente da base empírica dos parâmetros do solo, o modelo possui uma forte base teórica no que se diz respeito aos cálculos que compõe o balanço de água.

A magnitude desta redução, varia de acordo com o uso e cobertura do solo, o tipo de solo da região, o clima, e as diferentes vegetações existente em cada região e seus estados fenológicos. Com isso, não é correto afirmar que a redução no deflúvio e no escoamento superficial é algo constante e estático, mas sim algo variável e dinâmico. Cujo valor encontrado representa uma média do período analisado, sendo utilizado como caracterização das mudanças realizadas pelos cenários testados.

5. CONCLUSÕES

Um dos grandes problemas encontrados ao se trabalhar com modelo de simulação global, em bacias pequenas, é o fato de se ter que diminuir a resolução da área de estudo, porque a área gerada sempre sofrerá mudanças, acarretando: a não representação completa dos processos hidrológicos ocorridos na bacia; a magnitude do deflúvio simulado irá variar com a resolução utilizada; as simulações de mudança de uso e cobertura do solo podem não abranger áreas da bacia que estão nos divisores.

A utilização do conceito de construção dos arquivos de entrada, no que se diz respeito à escolha da resolução espacial, deve ser levada em consideração, conforme o objetivo do trabalho. Dependendo do tamanho da bacia, os resultados podem não ser satisfatórios; pois, além do erro referente ao tamanho da área nos resultados de vazão, as simulações de mudança de uso e cobertura do solo podem ser afetadas por não abranger toda as áreas pertencentes a determinada bacia.

O fato de se utilizar uma resolução como calibrador do processo para resoluções diferentes, mostrou-se inadequado para as bacias em estudos, sendo mais indicado uma calibração para cada tipo de resolução, uma vez que tipos de solo, e conseqüente características específicas, podem ser englobadas em uma resolução e em outras ser desconsideradas. Porém, identificar resultados de uma calibração efetuada para uma escala maior visando utilizá-la em escalas menores, é uma das formas de reduzir tempo no processamento de simulações.

Os resultados insatisfatórios obtidos são reflexos do tipo de calibração adotada (manual e com limites definidos), juntamente com o conjunto de possibilidades de erros embutidos pelos arquivos de entrada, e/ou deficiência do processo de parametrização do modelo hidrológico. A utilização destes dados durante as simulações de cenários de mudanças de uso e cobertura vegetal acarretou em resultados insatisfatórios.

O modelo possui potencial para utilização como ferramenta de monitoramento de vazões para as bacias do rio Jucu e Santa Maria da Vitória;

porém, a sua devida implementação deve passar por uma calibração mais minuciosa, ou até mesmo uma revisão dos dados de entrada. Entretanto, estudo com outros modelos hidrológicos para as bacias dos rios Jucu e Santa Maria da Vitória devem ser realizados, com o intuito de verificação de suas aplicabilidades com diferentes níveis de refinamento de dados, para uma gestão efetiva do território.

O simulação de cenários em que há o aumento do incremento florestal proporcionou a diminuição da vazão média dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu. Bem como a diminuição da lâmina, e do escoamento superficial dentro das duas bacias.

Tanto para o modelo VIC, como para projetos futuros com modelagem hidrológica, a obtenção de informações mais precisas sobre os dados bases (solo, vegetação, clima) é de suma importância para um bom resultado no processo de simulação hidrológica e, conseqüentemente, na gestão dos recursos hídricos.

6. RECOMENDAÇÕES

Processos de calibração são extremamente importantes, principalmente para modelos de caráter empírico; porém, deve-se ter atenção aos valores utilizados nos parâmetros calibráveis, para evitar a utilização de valores incompatíveis com a realidade da região, tornando a utilização do modelo incoerente.

A utilização de dados bases de baixa qualidade fazem com que os resultados, por vezes, fujam da realidade da região, mesmo realizando técnicas de aproximação. Porém a sua não utilização implica na falta de informações necessárias para realização do estudo. Tendo-se uma antítese comumente encontrado quando se necessita destas informações.

Em geral, os principais dados bases encontrados para o Brasil, possuem certos problemas em relação, a qualidade, a abrangência e a disponibilidade. Estas características dos dados brasileiros torna a pesquisa demorada, limitada e com grande nível de ressalvas. Com isso é preciso iniciar um levantamento dos dados bases, juntamente com a qualidade dos mesmos, antes de começar a trabalhar com o modelo.

A pesquisa exploratória e de base se destaca durante os processos de modelagem hidrológica, pois é de grande necessidade a obtenção dos valores reais dos parâmetros para as regiões, sejam eles referentes ao solo, à vegetação ou ao clima. Somente com um conjunto de qualidade destes dados, pode-se extrair o máximo de um modelo hidrológico.

O aprendizado de técnicas básicas de programação é de grande importância na utilização deste modelo e dos modelos a ele acoplado. E juntamente com o conhecimento em Linux, se tornam as principais bases para a sua devida utilização.

Ao se trabalhar com editores de texto da Microsoft, pode ocorrer o reconhecimento de caracteres de forma diferente dentro do modelo. Para se evitar este tipo de problema, é preferível utilizar um editor de texto do CygWin ou até mesmo editores com multi-plataforma, como no caso do MATLAB, que pode ser especificado em qual plataforma o arquivo será gerado.

O MATLAB utiliza a função “!” para executar internamente outro terminal de execução. Por exemplo, ao se utilizar a função ‘!vicNI’ dentro da pasta que contém o arquivo compilado do VIC, o MATLAB irá executar o VIC, emulando-o internamente. Esta função é bastante útil durante processos que envolva grande quantidade de execuções do modelo ou mesmo a criação de rotinas dentro do MATLAB para execução automática.

A utilização do MOCOM-UA como processo de calibração é muito útil, pois além de economizar tempo durante o processo, esta rotina irá indicar os melhores valores de cada parâmetro calibrável que gerará a vazão com melhor índice estatístico. Porém, este algoritmo possui certas peculiaridades no qual torna sua utilização um pouco mais complexa do que o usual.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLA, F. A.; LETTENMAIER, D. P., WOOD, E. F., SMITH, J. A. Application of a macroscale hydrologic model to estimate the water balance of the Arkansas-Red River basin. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 3, n. 101, p. 7449-7459, 1996.

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Bacias Hidrográficas do Atlântico Sul; Trecho Leste. **Sistema nacional de informações sobre recursos hídricos**. cd. 4. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/doc/BHASLeste/index.htm>>. Acesso em: 4 out. 2010.

BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. **Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta**. Kamloops: FOREX, v. 25, 2009.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, 1997. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 4 out. 2010.

CASTRO, F.S. **Zoneamento agroclimático para a cultura do pinus no estado do Espírito Santo**. 2008.123f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2008.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n.3, p.27-39, 2003.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 194f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

FRANCHINI, M.; PACCIANI, M. Comparative analysis of several conceptual rainfall runoff models. **Journal of Hydrology**, v. 122, p. 161-219, 1991.

GAO, H.; TANG, Q.; SHI, X.; ZHU, C.; BOHN, T. J.; SU, F.; SHEFFIELD, J.; PAN, M.; LETTENMAIER, D.P.; WOOD, E.F. Water budget record from Variable Infiltration Capacity (VIC) model. In **Algorithm theoretical basis document for terrestrial water cycle data records**. 2010. Disponível em: < <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/Documentation/References.shtml> >. Acesso em: 20 de fev. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico de 2010**. Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/index.php>>. Acesso em: 04 de out. 2010.

INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES. Disponível em: <http://www.ijsn.es.gov.br/>>. Acesso em: 04 de out. 2010.

JAYAWARDENA, A. W.; MAHANAMA, S. P. P. Meso-scale hydrological modeling: application to Mekong an Chao Phaya basins. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 7, n. 1, p. 12-26, 2002.

KIMBALL, J. S.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature. **Agricultural and forest meteorology**, n. 85, p. 87-98, 1997.

LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P., WOOD, E. F., & BURGESS, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 99, n. 7, p. 14415-15528, 1994.

LIANG, X.; WOOD, E. F.; LETTENMAIER, D. P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification. **Global and Planetary Change**. n.13, p. 195-206. 1996.

LOBMEYER, M.; LOHMANN, D.; RUHE, C. An application of a large-scale conceptual hydrological model over the Elbe Region. **Hydrology and Earth System Sciences**, Katlenburg-Lindau, n. 3, p. 363-374, 1999.

LOHMANN, D.; NOLTE-HOLUBE, R.; RASCHKE, E. A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes, **Tellus**, v. 48, n. 5, p. 708-721, 1996.

LOHMANN, D.; RASCHKE, E.; NIJSSEN, B., & LETTENMAIER, D. P. Regional scale hydrology: II. Application of the Vic-2l model to the Weser River, Germany. **Hydrological Sciences Journal**, Wallingford, v. 43, n. 1, p. 143-158, 1998.

LOHMANN, D.; RASCHKE, E.; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D.P. Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. **Hydrological Sciences Journal**, Wallingford, v. 43, n.1, p. 131-142, 1998.

MATTHEUSSEN, B.; KIRSCHBAUM, R. L., GOODMAN, I. A., O'DONNELL, G. M., & LETTENMAIER, D. P. Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia river basin (USA and Canada). **Hydrological Processes**, Chichester, v. 14, p. 867-885, 2000.

MECHOSO, C. R.; DIAS, P. L. S.; BAETHGEN, W.; BARROS, V.; BERBERY, E. H.; CLARKE, R. T.; CULLEN, H.; EREÑO, C.; GRASSI, B.; LETTENMAIER, D. **Climatology and Hydrology of the Plata Basin: A Document of VAMOS1 Scientific Study Group on the Plata Basin**, 2001. 55p. Disponível em: < http://www.atmos.umd.edu/~berbery/lpb/science_plan.html >. Acesso em: 4 jun. 2013.

MIRANDA, A. C. R. **Métodos de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo: estudo de caso para a bacia do Rio das Velhas**. 2012. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

MIRANDA, E. E.; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 24 out. 2011.

NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D. P.; LIANG, X.; WETZEL, W.; WOOD, E. F. Stream simulation for continental-scale river basins. **Water Resources Research**, Washington, n. 33, p. 711-724, 1997.

NIMER, E. Um modelo metodológico de classificação de climas. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 41, n. 4, p. 59-89, 1979.

PELL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, R. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, n. 11, p. 1633-1644, 2007.

PORTO, M. F. A.; L, PORTO. R. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, 2008.

RENNÓ, C.D.; SOARES, J.V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental: Relatório Técnico Parcial**, INPE, 2000.

SANTIAGO, A.V. **Simulações dos efeitos da cobertura vegetal no balanço hídrico da bacia do Rio Ji-Paraná, RO**. 2005. 69f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SILVA, J. M. A. **Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas: desenvolvimento e aplicação**. 2002. 142p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, MG, 2002.

TRESINARI, E. M. (Coord.). **Produto Interno Bruto (PIB) dos municípios do Espírito Santo – 2010**. Vitória: Instituto Jones dos Santos Neves, 2012. Disponível em: < http://www.ijsn.es.gov.br/Sitio/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=51&Itemid=126 > Acesso em: 23 de jul. 2013.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. Ed. Porto Alegre: UFRGS, 2007. 943 p.

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

VICTORIA, D.C. **Simulação hidrológica de bacias amazônicas utilizando modelo de capacidade de infiltração variável (VIC)**. 2010. 85f. Tese (Doutorado em Química na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

WIGMOSTA, M.S.; VAIL, L.; LETTENMAIER, D.P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1665-1679, 1994.

WOOD, E. F.; LETTENMAIER, D. P., LIANG, X., NIJSSEN, B., & WETZEL, S. W. Hydrological modeling of continental-scale basins. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, Palo Alto, v. 25, p. 279-300, 1997.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. The Dublin Statement and Report of the Conference. **International Conference on Water and the Environment: Development Issues for the 21st Century**. Dublin, Ireland ,1992. Disponível em: < <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/documents/english/icwedece.html> >. Acesso em: 4 out. 2001

XIE, Z.; YUAN, F.; DUAN, Q.; ZHENG, J.; LIANG, M.; CHEN, F. Regional parameter estimation of the VIC land surface model: methodology and application to river basins in China. **Journal of Hydrometeorology**. v. 8, p. 447-468, 2007

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v.204, p. 83-97, 1998.

YUAN, F.; XIE, Z.; LIU, Q.; XIA, J. An application of the Vic-3L model in assessing effects of climate change on water resources in the Haihe river basin. In: The Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources, 2004, Singapore. **Anais The 2nd APHW**, Singapore, 2004.

ZHU, C.; LETTENMAIER, D. P. Long-term climate and derived surface hydrology and energy flux data for Mexico: 1925 – 2004. **Journal of climate**. v. 20, p. 1936-1946, 2007.