

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS
COM BASE EM ANALOGIA COM AS HIPÓTESES DE BUDYKO**

LEIDI CAHOLA RAMÍREZ CASTRILLÓN

ORIENTADOR: DIRCEU SILVEIRA REIS JR.

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM 160-/2014

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2014

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS
COM BASE EM ANALOGIA COM AS HIPÓTESES DE BUDYKO**

LEIDI CAHOLA RAMÍREZ CASTRILLÓN

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Dirceu Silveira Reis Jr., PhD (ENC-UnB)
(ORIENTADOR)**

**Prof. Carlos Henrique Ribeiro Lima, PhD (ENC-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof. Carlos de Oliveira Galvão, PhD (UFCG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA-DF, 10 DE MARÇO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

CASTRILLON, L.C.R.

MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS COM BASE EM ANALOGIA COM AS HIPÓTESES DE BUDYKO

.xxiv, 109p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2013). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. MODELAGEM CONCEITUAL NA HIDROLOGIA 2. HIPÓTESES DE BUDYKO

3. MODELOS CHUVA-VAZÃO 4. MODELOS HÍBRIDOS CONCEITUAIS

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CASTRILLON, L. C. R (2014). *Modelagem Conceitual de Processos Hidrológicos com Base em Analogia Com as Hipóteses de Budyko*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-160/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Leidi Cahola Ramírez Castrillón

TÍTULO: Modelagem Conceitual de Processos Hidrológicos com Base em Analogia Com as Hipóteses de Budyko.

GRAU: Mestre

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Leidi Cahola Ramírez Castrillón
CLN 413, Bloco C, apt nº 109 Asa Norte CEP.: 70876-530
Brasília-DF, Brasil
rebecahola@gmail.com

*La luna blanca, y el frío
y el dulce corazón mío
tan lejano...*

*Y vagas notas del piano...
Del bosque un aroma arcano...
Y el remurmurar del río...*

Leon de Greiff (1895-1976)

Poeta Colombiano

Á minha Irmã, à minha Mae e ao Julián.

Em memória de meu pai

Antonio José Ramírez Torres.

AGRADECIMENTOS

À minha irmã, Natalia, e à minha mãe, Alicia, por respeitarem minha decisão, de sair do meu país e deixar tudo lá e vir a um lugar diferente a estudar. Por estarem comigo sempre, apesar da incerteza do que podia acontecer longe da minha cultura, da minha cidade, da minha família e dos meus amigos. Por entenderem meu humor tão difícil, minha ansiedade, especialmente nas semanas de ausência e de muito silêncio.

Ao meu ex-namorado, Julián Morales, por ser a pessoa mais maravilhosa que eu conheço, por entender nossa difícil situação, por me acompanhar no acadêmico e no pessoal. Por confiar em mim sem importar a complexidade dos meus objetivos. Por ser meu amigo e pela ajuda técnica em muitas dúvidas.

Ao meu orientador, Dirceu Reis, pela paciência e a confiança. Por ter me dado todo o apoio necessário para realizar essa dissertação.

Aos professores do PTARH, Yovanka Perez, Marco Antônio, Sergio Koide, Conceição Alves, Lenora Gomes, Karla Ariuska, Cristina Brandão, Oscar Cordeiro Netto e Carlos Lima, pela formação do mestrado na UnB.

À Claudia Pereira Guimaraes pela atenção e amizade. Às colegas de sala do mestrado: Sara Ferrigo, Fernanda Souza e Ana Maria. Aos demais colegas do PTARH: Pedro, Vinícius, Luiz B, Antônio, Mateus, Genilda, Bruna, Maria Elisa, Olga, Marlian, Caroll e Adriane.

Aos meus amigos colombianos que moram no Brasil: Hernán Martínez Carvajal, Catalina Mantilla Jimenez, Daniel Valencia Cárdenas e Jorge Esteban Alarcón, por escutar minhas angústias cada dia.

Aqueles amigos colombianos que nunca me esqueceram: Joany, Dieguito, Eduardo, Isabel, Angela, Juan Fernando, Carolina e os demais.

Ao pessoal que conheci nas ruas de Brasília, especialmente: Maristela, Rosana e Pedrinho. E todos aqueles que me ligaram para beber uma cerveja nos dias de solidão e angústia.

A todas aquelas pessoas que nos momentos de dificuldade me deram um sorriso e um abraço verdadeiro.

À CAPES pela bolsa de estudo concedida.

RESUMO

MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS COM BASE EM ANALOGIA COM AS HIPÓTESES DE BUDYKO

Autor: Leidi Cahola Ramírez Castrillón

Orientador: Dirceu Silveira Reis Jr.

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, Março de 2014

A metodologia de Budyko tem sido utilizada como fundamento teórico de muitos estudos, os quais tinham como propósito entender as características climáticas da bacia e sua relação com o equilíbrio do balanço hídrico de longo prazo. Com o intuito de empregar esses conceitos em escalas temporais menores, Zhang et al. (2008) desenvolveram um modelo conceitual do tipo chuva-vazão para modelar a geração de escoamento superficial e subterrâneo, assim como a recarga e evapotranspiração. Esta dissertação analisou e avaliou o desempenho do modelo baseado nas hipóteses de Budyko nas escalas mensal e diária, em duas regiões, uma no Distrito Federal e entorno, e a outra no Estado do Ceará. Para isto, foram feitas comparações com o modelo conceitual SMAP. Na escala mensal, os modelos obtiveram desempenho semelhante, com diferença média, em termos do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), de 0,06 (SMAP melhor) para a região do DF e entorno, e de 0,01 (Budyko melhor) para o estado do Ceará. Na escala diária, o modelo SMAP foi claramente superior. Para avaliar a estratégia de modelagem da geração do escoamento superficial baseada nas hipóteses de Budyko, criou-se um modelo híbrido, igual ao modelo SMAP, com exceção do escoamento superficial, que seguiu a estratégia do modelo de Budyko. Com base num teste formal de hipóteses, verificou-se que a utilização da modelagem de Budyko para a geração do escoamento superficial é tão ou mais eficiente do que a metodologia do *Soil Conservation Center* (SCS), empregada pelo modelo SMAP.

Palavras-chaves: modelagem conceitual, hipóteses de Budyko, geração de escoamento superficial, modelos chuva-vazão, modelos híbridos.

ABSTRACT

CONCEPTUAL MODELING OF HYDROLOGICAL PROCESSES BASED ON BUDYKO'S HYPOTHESIS.

Author: Leidi Cahola Ramírez Castrillón

Supervisor: Dirceu Silveira Reis Jr.

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, March of 2013

Budyko developed an elegant theory, based upon mass and energy conservation principles, which is now known as Budyko's hypothesis or Budyko model. Such parsimonious model allows estimation of long-term mean annual flow in ungauged basins based only on precipitation and potential evapotranspiration. Unfortunately, the model does not represent nature very well in smaller temporal scales. Zhang et al. (2008) have recently developed a model that employs Budyko's hypothesis to modeling runoff generation, evapotranspiration and recharge to be used in monthly and daily time scales. The present study aims at evaluating the performance of such a model in two different regions of Brazil, the biome cerrado, located in Distrito Federal, and in the semiarid region of the state of Ceara. The performance of the model was compared with that obtained by the SMAP model, very well known and largely used in Brazil. Moreover, the SMAP code was changed so that the runoff generation processes, based on Budyko's Hypothesis, could have been evaluated explicitly. Monthly results showed that the model has similar performance in both regions, although SMAP have had better performance metrics in most of streamgauges. Nevertheless, from the practical point of view, the model based on Budyko's hypothesis performed satisfactorily. On daily time scale, the 5 (five)-parameter hydrologic model was outperformed by the 6 (six)-parameter SMAP model, indicating that the model needs some changes in order to have reasonable performance. Finally, results for the state of Ceara showed that the runoff generation modeling, based on Budyko's hypothesis, performed equally well or even better than the widely known and largely used method of the Soil Conservation Service.

Keywords: Conceptual Modeling, Budyko's hypothesis, Runoff Generation Processes, Rainfall-Runoff Models.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	5
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
3.1	RELAÇÕES ENTRE O BALANÇO HÍDRICO E O BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE NO LONGO PERÍODO.....	6
3.2	MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	10
3.2.1	Método Curva-Número (CN-Curve Number).....	11
3.2.2	Modelo baseado na metodologia do Budyko (Zhang et al. (2008))......	13
3.3	MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL A PARTIR DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL.....	16
3.3.1	Modelo baseado na metodologia do Budyko (Zhang et al. (2008))......	16
3.4	MODELOS CONCEITUAIS HIDROLÓGICOS.....	21
3.4.1	SMAP - Soil Moisture Accounting Procedure.....	22
3.4.2	MODELOS HÍBRIDOS CONCEITUAIS DO TIPO CHUVA-VAZÃO.....	24
4.	METODOLOGIA.....	26
4.1	ÁREA DE ESTUDO.....	26
4.2	DADOS UTILIZADOS.....	28
4.2.1	Dados utilizados para modelagem na escala mensal.....	29
4.2.2	Dados utilizados para modelagem na escala diária.....	31
4.3	MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS UTILIZANDO UMA METODOLOGIA BASEADA NAS HIPÓTESES DE BUDYKO.....	32
4.3.1	Modelagem de escoamento superficial com a metodologia proposta por Zhang et. al (2008).....	32
4.3.2	Avaliação e comparação do desempenho do Modelo conceitual de Zhang et. al (2008), na escala diária e mensal.....	37
4.3.3	Modelagem de evapotranspiração real e escoamento superficial utilizando modelos hidrológicos híbridos.....	38
4.3.1	Calibração automática do Modelo Híbrido I (HIBI) na escala diária.....	40

5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
5.1	MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA ESCALA MENSAL APLICADO AO DISTRITO FEDERAL E ENTORNO	42
5.2	MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA ESCALA MENSAL APLICADO AO ESTADO DO CEARÁ.....	57
5.3	MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA ESCALA DIÁRIA APLICADO AO ESTADO DO CEARÁ.	69
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
	ANEXOS.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Índice de aridez em diferentes tipos de clima (Adaptação de Arora (2002)).	8
Tabela 2 Ordem dos parâmetros do Modelo proposto por Zhang et al., (2008)	20
Tabela 3. Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica na escala mensal no Distrito Federal.	29
Tabela 4. Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica na escala mensal no Estado do Ceará.	30
Tabela 5. Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica na escala diária no Distrito Federal.	31
Tabela 6. Intervalo de variação dos parâmetros do Modelo Conceitual Baseado nas Hipóteses de Budyko., na escala mensal.	35
Tabela 7. Características dos modelos conceituais do tipo chuva vazão a serem utilizados.	38
Tabela 8. Intervalo de variação dos parâmetros do Modelo Híbrido I (HIBI), na escala diária	40

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Curva de Budyko representada pela linha preta, a linha horizontal cinza descreve a condição de umidade extrema e a linha cinza diagonal descreve a condição de aridez extrema. (Adaptação de Donohue et al, (2011))..... 9
- Figura 2. Esquema da partição da precipitação na bacia, em escoamento superficial e retenção na camada superficial do solo . As linhas ponteadas representam os limites do sistema. (Fonte: Adaptação de Zhang et al., (2008))..... 15
- Figura 3 Relação média anual da evapotranspiração e precipitação (como função do índice de aridez (. As linhas ponteadas representam as condições limites propostas inicialmente na metodologia de Budyko. Fonte: Zhang et al., 2008 17
- Figura 4. Esquema da partição da água disponível em evapotranspiração real $ET(t)$, armazenamento $S(t)$ e recarga subterrânea. O indicador de oportunidade de evapotranspiração e o indicador de evapotranspiração real . As linhas ponteadas representam os limites do sistema. (Fonte: Adaptação de Zhang et al., (2008)) 20
- Figura 5. Esquema geral do Modelo SMAP. Fonte: Adaptação de Lopes (1999) 22
- Figura 6. Arquitetura de um sistema de modelo híbrido conceitual. Fonte: Adaptação de Wagener et al. (2004). 25
- Figura 7. Localização de algumas bacias utilizadas na modelagem hidrológica na escala diária e mensal no Estado do Ceará. (Fonte: Elaboração própria). 27
- Figura 8. Localização de algumas bacias utilizadas na modelagem hidrológica na escala mensal no Distrito Federal e entorno. (Fonte: Elaboração própria). 28
- Figura 9. Esquema geral do modelo de Zhang et al., (2008)..... 34
- Figura 10 Esquema geral do Modelo Híbrido I. Cálculo do escoamento superficial com a metodologia de Zhang et al., (2008) e as demais variáveis de estado com a metodologia do modelo conceitual SMAP..... 41
- Figura 11. Comparação dos valores de eficiência de Nash-Sutcliff obtidos no estudo de calibração dos modelos SMAP e Budyko, na escala mensal, para os postos fluviométricos localizados na região do Distrito Federal e Entorno..... 43
- Figura 12. Posto fluviométrico 42460000 comparação dos hidrogramas obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada) . 45

Figura 13: Posto fluviométrico 60.432.000 comparação dos hidrogramas obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada) .	46
Figura 14. Posto fluviométrico 60.435.300 comparação dos hidrogramas obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada) .	47
Figura 15. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões menores do que $Q_{obs,33} = 59.35 \text{ m}^3/\text{s}$ Posto 42.460.000. Localizado no Distrito Federal...	48
Figura 16. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,33}$ e menores do que $Q_{obs,66}$. Posto 42.460.000. Localizado no Distrito Federal	49
Figura 17. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,66}$. Posto 42.460.000. Localizado no Distrito Federal.....	50
Figura 18. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões menores do que $Q_{obs,33}$. Posto 60.435.300. Localizado no Distrito Federal.	51
Figura 19. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,33}$ e menores do que $Q_{obs,66}$. Posto 60.435.300. Localizado no Distrito Federal	52
Figura 20. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,66}$. Posto 60.435.300. Localizado no Distrito Federal.....	53
Figura 21. Análise dos comportamentos do Nash-Suttcliffe e da Correlação nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Baseado nas hipóteses de Budyko no Distrito Federal.	54
Figura 22. Análise dos comportamentos do RMSE e do BIAS nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Baseado nas hipóteses de Budyko no Distrito Federal e entorno.	55
Figura 23. Eficiência na calibração com o Algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) de Nash-Sutcliff para os 15 postos fluviométricos localizados no Estado do Ceará.	58

Figura 24. Posto fluviométrico 3595000 comparação dos hidrogramas obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada) .	59
Figura 25. Posto fluviométrico 3621000 comparação dos hidrogramas obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada) .	60
Figura 26. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões menores do que $Q_{obs,30}$. Posto 3595000. Localizado no Estado do Ceará.	61
Figura 27. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,33}$. menores do que $Q_{obs,66}$. Posto 3595000 localizado no Estado do Ceará.	62
Figura 28. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,60}$. Posto 3595000 localizado no Estado do Ceará.	63
Figura 29. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões menores do que $Q_{obs,33}$. Posto 3621000. Localizado no Estado do Ceará.	64
Figura 30. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,33}$ menores do que $Q_{obs,66}$. Posto 3621000 localizado no Estado do Ceará.	65
Figura 31. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,60}$. Posto 3576000 localizado no estado do Ceará.	66
Figura 32. Análise dos comportamentos do Nash-Sutcliffe e da Correlação nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Baseado nas hipóteses de Budyko no Estado do Ceará.	67
Figura 33. Análise dos comportamentos do RMSE e do BIAS nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Baseado nas hipóteses de Budyko no Estado do Ceará.	68
Figura 34. Eficiência na calibração com o Algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) para o índice Nash-Sutcliffe para as vazões. Postos fluviométricos localizados no Estado do Ceará.	70

Figura 35. Posto fluviométrico 35950000 comparação dos hidrograma obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo).	71
Figura 36. . Comparação dos valores de eficiência de Nash-Sutcliff obtidos no estudo de calibração dos modelos SMAP e o modelo híbrido (HIBI), na escala diária, para os postos fluviométricos localizados na região estado do Ceará.....	73
Figura 37. Posto fluviométrico 35950000 comparação dos hidrograma obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada) .	74
Figura 38. Posto fluviométrico 36210000 comparação dos hidrograma obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada) .	75
Figura 39. Análise dos comportamentos do Nash-Suttcliffe e da Correlação nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Híbrido (HIBI) no estado do Ceará.	76
Figura 40. Análise dos comportamentos do RMSE e do BIAS nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Baseado nas hipóteses de Budyko na escala diária. Aplicado ao Estado do Ceará.	77

1. INTRODUÇÃO

A modelagem hidrológica é uma ferramenta de extrema importância para a gestão dos recursos hídricos pela sua capacidade de fornecer informação sobre a natureza dos processos hidrológicos. A maioria dos estudos relacionados com a hidrologia tem como objetivo confirmar, conhecer ou verificar as relações entre diversos fatores característicos do clima e o regime hidrológico de um lugar determinado. Essas relações ou processos estão baseados principalmente, na de troca de energia que provem do sol com as diversas formas da matéria, principalmente, água, solo e gases atmosféricos.

A dinâmica do ciclo hidrológico está relacionada com a quantidade de energia disponível na atmosfera; no longo prazo, pode-se considerar o balanço de energia do sistema climático terrestre constante sem variações significativas. Sendo assim, o regime hidrológico de cada local, vai estar definido pelas transformações da energia e pelos fluxos da massa que estão sendo inserida e retirada do sistema. Existem dois conceitos matemáticos utilizados para quantificar o estado do sistema hidrológico: (i) o balanço hídrico, e (ii) o balanço de energia na superfície. O primeiro destes, e definido como o valor médio anual do escoamento superficial é igual à diferença entre precipitação e a evaporação, isto na escala do longo prazo e na escala de uma bacia determinada. O segundo balanço, é definido como: a radiação líquida que chega à atmosfera, é igual a soma do fluxo de calor sensível, o fluxo de calor latente e o fluxo de calor da superfície.

No ano de 1974 o climatologista russo Mikhail Budyko, estabeleceu umas relações entre o balanço hídrico de longo prazo e o balanço de energia na superfície, as quais são conhecidas como hipóteses de Budyko ou simplesmente metodologia de Budyko. Segundo esse autor, a geração de escoamento superficial depende em grande medida do processo de evapotranspiração, que por sua vez, é um processo básico de transformação da energia solar na superfície terrestre. Sendo assim, a média de escoamento superficial está conectada com as componentes básicas do balanço de energia na superfície.

O trabalho de Budyko está focado em termos de duas condições limite: (i) condições de aridez no solo, e (ii) condições de umidade abundante no solo. Na primeira condição toda a água recebida em forma de precipitação é retida inicialmente pelas forças moleculares das partículas de solo e finalmente convertida em evaporação. Em condições de umidade abundante, o fluxo de calor latente é quase igual à radiação líquida que está chegando à superfície. Essas duas situações limites do clima são utilizadas na hidrologia para descrever o balanço hídrico de longo prazo por meio do que se conhece como a curva de Budyko, a qual relaciona o índice de evapotranspiração (relação entre a evapotranspiração média de longo prazo com a precipitação média de longo prazo), com o índice de aridez (relação entre a evapotranspiração potencial de longo prazo com a precipitação média de longo prazo).

As incertezas existentes na determinação dos diferentes fluxos de água na superfície que compõem o ciclo hidrológico podem ser um obstáculo no momento estabelecer relações entre o balanço energético e o balanço hídrico de longo prazo. A metodologia de Budyko apresenta uma maneira simples, com benefícios práticos e méritos científicos, para determinar o balanço hídrico de longo prazo em termos da evapotranspiração média de longo prazo e da precipitação média de longo prazo, sendo uma técnica prática que busca entender o comportamento da bacia em função de dados observado (Zhang et al., 2008 e Dooge et al., 1999)

A metodologia de Budyko tem sido utilizada como fundamento teórico de muitos estudos, os quais tinham como propósito entender as características climáticas da bacia e sua relação com o equilíbrio do balanço hídrico de longo prazo (Arora et al., 2002; Koster e Suarez, 1999; Choudhury, 1999; Zhang et al., 2001, 2004; Potter et al., 2005, Gerrits et al., 2008). Existem vários tipos de curvas de Budyko que tem sido desenvolvidas em estudos clássicos, uma dessas curvas é a denominada curva de Fu Zhang et al. (2008, apud de Fu, 1981), a qual tem apresentando bom desempenho no cálculo do balanço hídrico em escalas anuais e interanuais.

Os modelos conceituais chuva-vazão são ferramentas da hidrologia utilizadas para entender a resposta da bacia em diferentes condições climáticas; na sua estrutura teórica

empregam o elemento de armazenamento como componente principal do modelo, os elementos de armazenamento são chamados usualmente de reservatórios, assim as entradas de fluxo de água nesses reservatórios estão relacionadas com a precipitação, infiltração e percolação, e a retirada de água desses reservatórios se dá por meio dos processos de evapotranspiração, de escoamento superficial e da drenagem, entre outros. Dentro da estrutura desses modelos estão inseridos parâmetros que são estimados no processo de modelagem e que ajudam para descrever a forma e distribuição dos elementos do modelo, por isso, também são conhecidos como modelos paramétricos. (Wagener et al., (2004))

O número de parâmetros requerido para modelagem vai definir o desempenho do modelo, os modelos com muitos parâmetros podem não ser eficientes, desde o ponto de vista computacional. O princípio da parcimônia na modelagem hidrológica está relacionado com as parametrizações simples (poucos parâmetros) que podem ser utilizadas para representar adequadamente o comportamento da bacia, de um processo ou um sistema por um modelo (Wagener et al., 2004).

O presente estudo pretende avaliar uma teoria análoga às teorias propostas por Budyko, desenvolvida e explicada no trabalho de Zhang et al. (2008). Esses autores desenvolveram um modelo conceitual do tipo chuva-vazão que conserva o princípio da parcimônia e que por meio da inclusão de novas variáveis de estado e fluxos, baseando-se nas condições limites estudadas por Budyko pode ser aplicado em bacias não monitoradas com a finalidade de prever vazões e calcular evapotranspiração real na escala diária.

O presente trabalho tem como finalidade avaliar a metodologia de Budyko para modelagem conceitual de processos hidrológicos na escala diária e na escala mensal, em duas regiões diferentes do Brasil. No capítulo 2 são apresentados os objetivos do presente estudo. O capítulo 3 contém uma revisão bibliográfica com as principais relações entre o balanço hídrico de longo prazo e o balanço de energia, assim como a descrição dos processos que compõem a estrutura dos modelos chuva-vazão.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia para a execução do modelo conceitual que vai ser implementado, fazendo também uma descrição dos dados, assim como os procedimentos que foram executados a estrutura geral dos algoritmos utilizados. No capítulo 5, são apresentados os resultados e as discussões das diversas etapas de modelagem que foram executadas. Finalmente no capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste estudo assim como algumas recomendações para os trabalhos futuros relacionados.

2. OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo geral avaliar como os conceitos de Budyko podem ser utilizados para modelar os processos de geração de escoamento superficial na escala diária e mensal, evapotranspiração real e a recarga para emprego em modelos hidrológicos conceituais parcimoniosos.

Para dar subsidio a essa análise, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Implementar o modelo conceitual proposto por Zhang et al, (2008) na modelagem diária e mensal da geração do escoamento superficial, evapotranspiração real e a recarga com base nas hipóteses de Budyko.
- b) Avaliar o desempenho do modelo proposto por Zhang et al. (2008) para modelagem da dinâmica do balanço hídrico na escala diária e mensal, comparado com outros modelos hidrológicos conceituas de estrutura similares como o modelo SMAP.
- c) Modificar a estrutura do modelo SMAP inserindo a metodologia baseado nas hipóteses de Budyko para a geração de escoamento superficial.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 RELAÇÕES ENTRE O BALANÇO HÍDRICO E O BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE NO LONGO PERÍODO.

Em condições estáveis na escala de longo prazo, se pode dizer que o escoamento superficial é igual à soma da precipitação e da evapotranspiração ; a relação entre cada uma dessas variáveis é conhecida como balanço hídrico de longo prazo e matematicamente se pode escrever como segue:

(1)

O balanço de energia na superfície é uma formulação matemática para descrever a quantidade de energia que está sendo trocada entre a atmosfera e a superfície terrestre, suas componentes descrevem diversos processos de transformação da energia na superfície, sendo também um regulador do clima e dos processos atmosféricos na escala local (Piringer et al., (2002) e Su (2002)). De acordo com Zhang et al., (2008), no longo prazo, e ignorando os fluxos horizontais de umidade (advecção), pode-se dizer que o balanço de energia na superfície está definido por meio da equação (2).

(t) (2)

onde é o fluxo de radiação líquida incidente na superfície terrestre, conhecida também como balanço de radiação, suas unidades estão dadas em , é o chamado fluxo de calor latente dado em unidades de , e finalmente $H(t)$, é o denominado fluxo de calor sensível em .

No ano de 1974 o climatologista russo Mikhail Budyko estabeleceu umas hipóteses para tentar explicar a relação existente entre o balanço hídrico e o balanço de energia, seu estudo se converteu no fundamento físico de muitos modelos hidrológicos. Essas hipóteses estavam baseadas em duas condições extremas do clima, uma na qual a bacia apresenta condições de alta aridez no solo, e a outra na qual a bacia tem umidade abundante no solo, segundo esse autor o estudo da conexão entre esses dois balanços poderia contribuir para explicar os períodos que governam o ciclo hidrológico.

Para uma condição climática com alta aridez, toda a água recebida em forma de precipitação é retida pelas forças moleculares das partículas de solo, devido à escassez de água no solo pouca água é convertida em escoamento superficial, sendo assim, essa água que é retida fica na camada superficial do solo é retirada somente por meio da evapotranspiração, sob tais condições, a quantidade de água convertida em evapotranspiração vai ser aproximadamente igual à quantidade de precipitação recebida, o qual pode ser resumido mediante a seguinte expressão .

Com frequência na literatura relacionada com modelação hidrológica se define a relação , como a quantidade de radiação líquida disponível para os processos evaporativos na superfície, ao dividir essa relação pela quantidade de precipitação recebida, obtém-se uma nova relação a qual recebe o nome de índice de aridez, denotado por . Esse índice tem sido utilizado para conhecer a dinâmica da evapotranspiração em função da quantidade da energia disponível na atmosfera. Em condições de aridez alta, a taxa de precipitação se aproxima de zero, sendo assim o índice de aridez tende ao infinito ()

De acordo, com o exposto anteriormente, em condições de alta aridez se pode estabelecer a seguinte condição limite, em termos da evapotranspiração, da precipitação e do índice de aridez, assim:

$$\frac{R_n - G}{P} = I_a \quad (3)$$

A partir da condição limite apresentada na equação (3) é razoável afirmar que em condições de aridez climática, toda a radiação líquida vai ser convertida em evaporação, ou seja em fluxo de calor latente. Voltando com a definição do índice de aridez, Arora (2002), define-o como um indicativo do grau de aridez de um dado local, em termos gerais, as regiões áridas estão caracterizadas pelos altos fluxos de evapotranspiração (), baixa precipitação e altos fluxos de calor sensível (H). Usualmente o índice de aridez é maior que a unidade em regiões áridas. Alguns dos intervalos de variação deste parâmetro para diferentes tipos de clima estão apresentados na Tabela 1

Tabela 1 Índice de aridez em diferentes tipos de clima (Adaptação de Arora (2002)).

Tipo de Clima		
Árido	5	12
Semiárido	2	5
Sub-úmido	0.75	2
Úmido	0.375	0.75

A outra condição extrema que Budyko analisou foi o caso de umidade abundante no solo, nessa situação a precipitação excede a relação $\frac{P}{E_0}$, então o índice de aridez se aproxima de zero, ou seja, $\frac{P}{E_0} > 1$. Nessa mesma condição, na escala anual o fluxo de calor sensível (H) não fornece efeito significativo no balanço de energia, sendo assim a equação do balanço de energia fica $H = 0$, então a quantidade de radiação líquida R_n , vai ser aproximadamente igual à evapotranspiração real E_r , isto está resumido na relação apresentada pela equação (4), como segue:

$$E_r = \frac{R_n}{E_0} \quad (4)$$

A seguir, Budyko propôs uma função f , mostrada na equação (5), o objetivo dessa função é poder relacionar as formulas (3) e (4), para diferentes condições de umidade no solo e para estabelecer uma conexão entre o balanço de energia e o balanço hídrico de longo prazo:

$$f = \frac{E_r}{E_0} \quad (5)$$

Com a finalidade de conhecer a forma da função f , foi introduzida uma nova variável chamada evapotranspiração potencial (E_p), a qual vai a estar determinada pela quantidade de energia disponível na atmosfera, sendo definida como a evapotranspiração possível em um terreno em condições de abundante umidade no solo, e boa cobertura vegetal, assim ele assume que $E_r = E_p$). Além disso, a função f é conhecida como Curva ou Modelo de Budyko, a forma dessa curva é apresentada na figura 1.

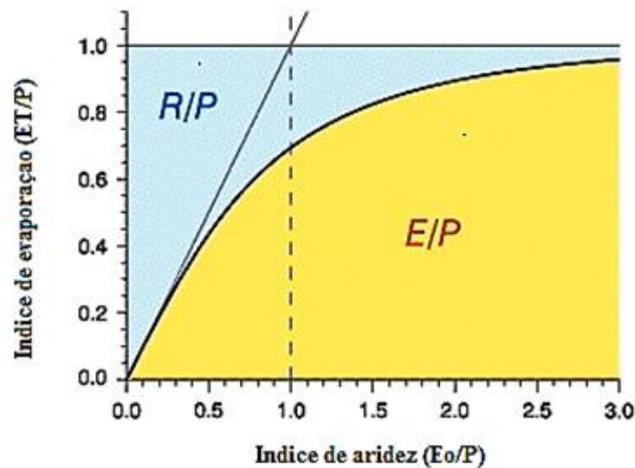


Figura 1. Curva de Budyko representada pela linha preta, a linha horizontal cinza descreve a condição de umidade extrema e a linha cinza diagonal descreve a condição de aridez extrema. (Adaptação de Donohue et al, (2011))

Segundo Donohue et al., (2011), a Curva de Budyko foi inicialmente desenvolvida para grandes escalas temporais e espaciais, ou seja para grandes bacias e para o longo prazo; nessas escalas a curva é uma boa estimativa da evapotranspiração de longo prazo, com erros menores de 10 %. De acordo com Porporato et al (2004) , a curva de Budyko é válida para as profundidades compreendidas entre 30-35 cm, já que esses valores representam a profundidade média do solo que é ativa desde o ponto de vista hidrológico, sendo que também corresponde com a profundidade média das zonas de raízes. Além disso, a curva pode ser utilizada para explicar os possíveis efeitos de mudanças climáticas, no sentido que dependendo das mudanças nas taxas de evapotranspiração, o regime de chuvas e as características da cobertura vegetal o modelo vai responder de maneira diferente. Renner et al., (2011), tentaram entender como a estabilidade de longo prazo das bacias poderiam ser afetadas com as variações locais do clima, para isso eles demonstraram a partir das relações de Budyko o grau de sensibilidade da vazão em varias bacias australianas.

No caso do clima tropical se tem a aplicação de Arias e Poveda (2004) na Colômbia. Esses autores encontraram que a curva de Budyko proposta no seu trabalho inicial, é uma ferramenta acertada para a estimação da evapotranspiração real a partir da evapotranspiração potencial; mais além, os autores enfatizam que existe uma grande variedade de propostas para determinar a evapotranspiração real, sendo que ainda não é

claro qual é a expressão mais adequada para estimá-la, principalmente devido ao desconhecimento do comportamento dessa variável, já que as maiorias dos modelos não incluem a influência do fator vegetação.

No caso do Brasil, Otsuki et al. (2012), ressaltaram a importância das Hipóteses de Budyko para determinar a sensibilidade das vazões de diversos rios localizados no nordeste do Brasil devido às possíveis mudanças do clima. Além dos resultados obtidos, esses autores mostraram que ainda é necessária a regionalização dos parâmetros do modelo para que ele possa ser utilizado como uma boa estimativa em áreas onde existem bacias não monitoradas.

3.2 MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.

Segundo Ponce e Hawkins (1996), o escoamento superficial é gerado por um conjunto de fluxos superficiais e subsuperficiais, entre os mais importantes estão os seguintes:

- Escoamento superficial Hortoniano: é o processo que acontece quando a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo. Usualmente ocorre ao início de uma chuva quando a coluna de solo ainda está seca. A diferença entre taxa de precipitação menos a capacidade de infiltração é o que se conhece como escoamento superficial.
- Escoamento superficial com saturação: é o processo que acontece depois de que o solo atinge a saturação depois de ter acontecido vários eventos chuvosos. Devido à condição saturada do solo, qualquer quantidade de precipitação que atinge a superfície vai escoar superficialmente.
- Processo de escoamento horizontal: este tipo escoamento prevalece em áreas com cobertura vegetal e que o solo possua camadas pouco permeáveis, pelo geral em rochas não intemperadas.

A seguir vão ser expostos três metodologias que foram desenvolvidas para modelagem do escoamento superficial.

3.2.1 Método Curva-Número (CN-Curve Number)

No ano de 1972 o Soil Conservation Service (SCS) dos Estados Unidos desenvolveu uma metodologia para o cálculo de chuva efetiva. O método consiste em supor que para uma chuva, a profundidade do excesso de precipitação ou escoamento superficial $(P - S)$ é sempre menor do que a profundidade da lâmina da água (S) ; depois, de ter começado o escoamento superficial a profundidade da lâmina de água armazenada no solo (S) ; é menor ou igual à máxima retenção de água, também conhecido como armazenamento máximo (S_m) ; existe certa quantidade de precipitação armazenada inicialmente (S_0) antes de que ocorra o encharcamento, logo o escoamento inicial vai estar dado pela diferença entre $(P - S_0)$. Segundo Chow et al. (1988), a principal hipótese do método SCS consiste em que as relações das quantidades potenciais ou máximas de armazenamento e as reais são iguais. Como segue:

$$Q = \frac{P - S_0}{2} \quad (6)$$

Substituindo o princípio de continuidade $(Q = P - S)$ na equação (6), encontra-se a seguinte expressão:

$$Q = \frac{P - S_0}{2} \quad (7)$$

Onde Q é o escoamento superficial, também conhecido como $(P - S)$. A utilização da equação (7) para o cálculo do escoamento somente é válida no caso em que precipitação exceda o armazenamento inicial de água no solo, é dizer, $(P > S_0)$. Na situação contrária simplesmente não existe escoamento superficial.

A variável S_0 inclui a água retida nas depressões da superfície, interceptada pela vegetação, evaporação e infiltração. S_0 é altamente variável, mas a partir dos dados de

pequenas bacias com uso de solo principalmente de agricultura, esta variável foi aproximada pela seguinte equação empírica:

(8)

Ao substituir a equação (8) em (7), obtém-se uma expressão em termos da precipitação e da capacidade máxima de armazenamento de água no solo para produzir uma quantidade única de escoamento superficial, de acordo como segue:

(9)

O parâmetro está relacionado com o tipo de solo e as condições de uso do solo, estas duas características estão inseridas dentro de um parâmetro denominado CN (Curve Number). O CN é um parâmetro adimensional que tem ordem entre 30-100 e está relacionado como, assim:

(10)

Segundo Rawls et al. (1993), existe uma série de fatores que vão determinar o CN, um desses é o tipo hidrológico do solo, o tipo de cobertura, a umidade antecedente do solo, entre outros; o Soil Conservation Service (1972), dos Estados Unidos classificou todos os solos dos Estados Unidos em quatro grupos hidrológicos em função da taxa de infiltração. O denominado grupo hidrológico tipo A se caracteriza pelo baixo potencial de escoamento superficial e altas taxas de infiltração. Os solos do grupo hidrológico B, têm taxas de infiltração moderadas; os solos do grupo hidrológico C tem taxas de infiltração baixas e finalmente os solos pertencentes ao grupo D tem um alto potencial de escoamento superficial, acompanhados de baixas taxa de infiltração.

Segundo Ponce e Hawkins (1999), o método do CN proposto pelo SCS, tem sido muito difundido e aceito principalmente, porque ele é um modelo conceitual que trabalha com dados empíricos, o qual é o método escolhido usualmente como método de desenho em

vários projetos na prática da engenharia. Não entanto, a principal limitação do método poderia estar relacionada com os aspectos biológicos da infiltração, consequentemente os efeitos das características da vegetação, tais como: a profundidade das raízes e a microfauna que possam interferir nos processos hidrológicos.

No caso de Brasil, Araújo Neto et al., (2012), para alguns usos da terra e grupo de solo de bacias localizadas no nordeste do Brasil, o valor CN não está disponível nos manuais sendo necessário fazer uma estimativa do possível valor desses parâmetros. Segundo os mesmos autores, emerge a importância do desenvolvimento de pesquisas que sejam capazes de estimar o número CN mediante diferentes cenários de uso e ocupação do solo para diferentes regiões.

Outros estudos têm sido desenvolvidos com a finalidade de analisar e determinar a validade do modelo proposto pelo SCS (Sartori et al., (2011); Stewart et al., (2012) e Eli e Lamont (2010)), ressalta-se a importância da utilização do método para bacias não monitoradas, não entanto, esses autores afirmam pode existir um grau de risco aceitável ao momento de dimensionar estruturas hidráulicas mediante este método.

3.2.2 Modelo baseado na metodologia do Budyko (Zhang et al. (2008)).

Segundo Zhang et al, (2008), na mudança da escala anual para escalas menores de tempo, espera-se que a capacidade de armazenamento da bacia seja mais significativa, devido a isso, as variações na precipitação, na evapotranspiração potencial e no armazenamento de água da bacia, devem ser consideradas. A metodologia de Budyko para modelagem da média anual de evapotranspiração pode ser adaptada para ser concebida como um sistema de demanda e abastecimento. O objetivo é desenvolver um modelo que simule a dinâmica do balanço hídrico em escalas subanuais, definindo novas variáveis de estado e fluxos.

A bacia é definida como um sistema com dois reservatórios: reservatório da camada superficial do solo (zona de raízes) e o reservatório subterrâneo. Para o cálculo do balanço

hídrico da bacia é assumido que a precipitação, pode ser particionada em escoamento superficial, , mais a soma de outras componentes do balanço hídrico.

(18)

Na expressão (18), é chamada *retenção de chuva da bacia*, sendo definida como a quantidade de precipitação retida na camada superficial de solo, e que está disponível para evapotranspiração, para mudanças na umidade do solo e para recarga subterrânea.

Existe uma demanda limite da água armazenada em denotada por a qual é definida como soma da capacidade de armazenamento do solo e a evapotranspiração potencial. O abastecimento "limite" da camada superficial do solo pode ser considerado igual à precipitação . Continuando com um argumento similar ao postulado do Budyko (1974), pode-se escrever as duas seguintes formulações para duas condições extremas do clima.

$$\frac{R}{P} = \frac{W}{W + P} \quad (19)$$

$$\frac{R}{P} = \frac{E_p}{E_p + P} \quad (20)$$

A equação (19) está relacionada com condições de aridez extrema; e a equação (20) está relacionada com condições de umidade extrema. Segundo Zhang et al. (2008, apud de Fu, 1981) e , junto as relações apresentadas pelas equações (19) e (20), podem ser utilizadas para o calculo da retenção de chuva da bacia. Por meio da seguinte expressão:

$$\frac{R}{P} = \frac{W}{W + P} \frac{E_p}{E_p + P} \quad (21)$$

A expressão apresentada em (21), é conhecida como Curva de Fu e foi desenvolvida inicialmente para estimar evapotranspiração real baseando-se em dados de precipitação e

evapotranspiração potencial. Onde, α é um parâmetro do modelo que varia entre 0 e 1, usualmente se costuma definir o seguinte parâmetro β ; β é definido como *eficiência de retenção*, assim valores altos de β implicam em maior retenção de água na camada superficial do solo e menos escoamento superficial. A relação $\beta = 1 - \alpha$ é análogo ao índice de aridez proposto por Budyko. Ao combinar as equações (18) e (21), o fluxo de escoamento superficial pode ser calculado como segue:

$$Q_d(t) = P(t) \left[1 - \beta \left(\frac{X(t)}{X_0} \right)^\alpha \right] \quad (22)$$

O comportamento dessa primeira parte do modelo conceitual é apresentado na Figura 5.

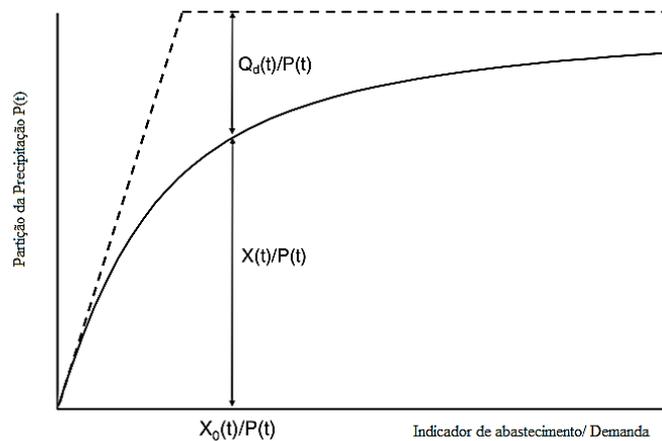


Figura 2. Esquema da partição da precipitação na bacia, em escoamento superficial e retenção na camada superficial do solo. As linhas ponteadas representam os limites do sistema. (Fonte: Adaptação de Zhang et al., (2008))

Pode-se observar como a precipitação que está chegando à bacia é particionada em escoamento superficial e uma quantidade de água ($X(t)$) que fica armazenada na camada superficial do solo. A quantidade máxima de água disponível está representada pela relação $X_0/P(t)$.

3.3 MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL A PARTIR DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

A evaporação ocorre quando a água é convertida em vapor de água. A variação da taxa do processo de evapotranspiração está controlada pela disponibilidade da energia na superfície. Tradicionalmente, a taxa de evapotranspiração tem sido estimada utilizando dados de estações meteorológicas localizadas em pontos específicos de uma região, assumindo que a taxa de evaporação tem pequenas variações dentro dessa região.

Em geral, os métodos para quantificar a quantidade de água que está sendo evaporada em uma superfície dada. Podem ser classificados em dois grandes grupos os métodos diretos e os indiretos. Segundo Folhes (2007), os primer tipo de métodos consiste na medição direta da evapotranspiração por meio de lisímetros, parcelas experimentais o simplesmente na medição da umidade no solo. Não entanto, usualmente na modelagem hidrológica têm sido desenvolvidos vários modelos conceituais baseados na física dos processos envolvidos com a evapotranspiração.

Folhes (2007) analisa cinco métodos indiretos para estimativa da evapotranspiração real, os quais são: Metodologia FAO-Penman-Monteith e os coeficientes de cultura, método das correlações turbulentas, sensoriamento remoto, método da relação de Bowen e o método do balanço de energia. Devido à complexidade de alguns dos métodos mencionados acima e à abordagem que está sendo analisada neste documento somente serão descrita somente a metodologia para determinação da evapotranspiração real a partir do calculo da evapotranspiração potencial proposta no trabalho de Zhang et al. (2008).

3.3.1 Modelo baseado na metodologia do Budyko (Zhang et al. (2008)).

O balanço hídrico na escala anual poder ser modelado utilizando a metodologia de Budyko sob a consideração que as características físicas da bacia somente têm efeitos dominantes na evapotranspiração. Essa aproximação holística assume que o equilíbrio do balanço hídrico está controlado pela disponibilidade de água na camada superficial do solo e a demanda de água da atmosfera. A disponibilidade de água vai estar dada pela precipitação

e a demanda atmosférica representa o máximo possível de evapotranspiração, a qual é denotada como evapotranspiração potencial.

Zhang et al. (2001), continuaram o trabalho de Budyko introduzindo controles adicionais, tais como a sazonalidade da precipitação e as características da vegetação. Um método similar para modelagem da evapotranspiração tem sido proposto baseado em condições limites similar às propostas na metodologia de Budyko. Baseado em considerações fenomenológicas esses autores utilizaram um tipo de curva de Budyko para estimar a média anual de evapotranspiração.

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (25)$$

A função mostrada na equação é conhecida como curva de Fu está dada pelo fator que multiplica na equação com diversos valores do parâmetro α , o qual varia entre (1, ∞), a forma da função vai ser diferente, usualmente se acostuma a definir o seguinte parâmetro α o qual varia entre 0 e 1; um incremento em α vai estar relacionado com um incremento na eficiência da evapotranspiração. A Figura 3, representa a variação da relação $\frac{EP}{P}$, em função da relação $\frac{Eo}{P}$, para diferentes valores do parâmetro α

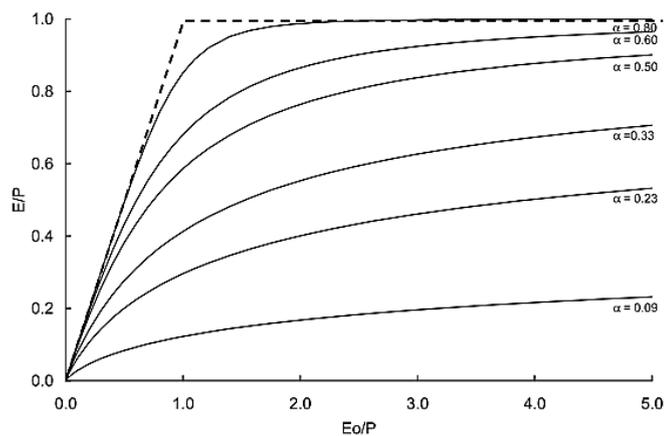


Figura 3 Relação média anual da evapotranspiração e precipitação ($\frac{EP}{P}$) como função do índice de aridez ($\frac{Eo}{P}$). As linhas ponteadas representam as condições limites propostas inicialmente na metodologia de Budyko. Fonte: Zhang et al., 2008

Nas escalas de tempo subanuais, pode ser definida uma nova variável chamada *disponibilidade de água*, assim:

(26)

Onde $X(t)$, é a quantidade de água armazenada no solo antes de cair uma quantidade de precipitação $P(t)$. Sendo que água retida na camada superficial do solo, poder ser utilizada para evapotranspiração, recarga subterrânea e mudanças na umidade de solo, $U(t)$. Pode se combinar a equação (26) com esta definição de $X(t)$ para produzir a seguinte expressão:

(27)

As equações (26) e (27), indicam os processos que estão relacionados com a disponibilidade de água no solo. A equação (26) indica a fonte de onde vem água que está armazenada no solo, e a equação (27) indica que água disponível no solo, está relacionada com a precipitação, a recarga subterrânea e a umidade no solo.

A quantidade de água que está sendo retirada do solo pela evapotranspiração vai estar definida por uma nova variável chamada, *oportunidade de evapotranspiração* $O(t)$. Essa variável vai estar dada como segue:

(28)

Assim, ao substituir a equação (28) na equação (27) fica a seguinte expressão:

(29)

Existe uma quantidade limite de $O(t)$ denominada *demanda limite de evapotranspiração*, denotada por O_m , a qual é definida como a soma da evapotranspiração potencial e a capacidade armazenamento máxima, assim nessa condição limite de demanda a água disponível pode ser definida como $O(t) = O_m - X(t)$. Sendo assim, podem ser também definidas duas formulações similares ao postulado de Budyko para o caso da evapotranspiração, como segue:

$$\frac{E_p}{E_{p0}} = \frac{F_u}{F_{u0}} \quad (30)$$

$$\frac{E_p}{E_{p0}} = \frac{F_u}{F_{u0}} \quad (31)$$

A equação (30) está relacionada com condições de aridez extrema; e a equação (31) está relacionada com condições de umidade extrema. Assim, fazendo uma análise similar à proposta feita para a retenção de chuva na camada superficial do solo, a oportunidade de evapotranspiração pode ser estimado mediante a curva de F_u , como segue:

$$\frac{E_p}{E_{p0}} = \frac{F_u}{F_{u0}} \quad (32)$$

A recarga subterrânea pode ser calculada por meio da equação (29), assim o passo seguinte é calcular a evapotranspiração real, em termos da demanda limite da evapotranspiração e o abastecimento limite, por meio de uma curva de F_u , assim:

$$\frac{E_p}{E_{p0}} = \frac{F_u}{F_{u0}} \quad (33)$$

O parâmetro η é um parâmetro do modelo que varia entre 0 e 1, usualmente se acostuma a definir o seguinte parâmetro η ; η é definido como *eficiência de evapotranspiração*. Observa-se que a equação (32) e (33) compartilham o parâmetro η , isso é devido a que a recarga subterrânea está determinada pela eficiência da evapotranspiração, assim para valores altos de η a recarga vai diminuir devido às altas taxas de evapotranspiração. Mais além, o valor de η nas equações pode ser idêntico para garantir que o armazenamento permanece constante entre 0 e θ .

Finalmente, a parte de água que está disponível para o processo de evapotranspiração está apresentando na figura 4, pode-se observar como a precipitação que chega na bacia é particionada em escoamento superficial e mais uma quantidade de água (que fica armazenada na camada superficial do solo. A quantidade máxima de água disponível está representada pela relação —

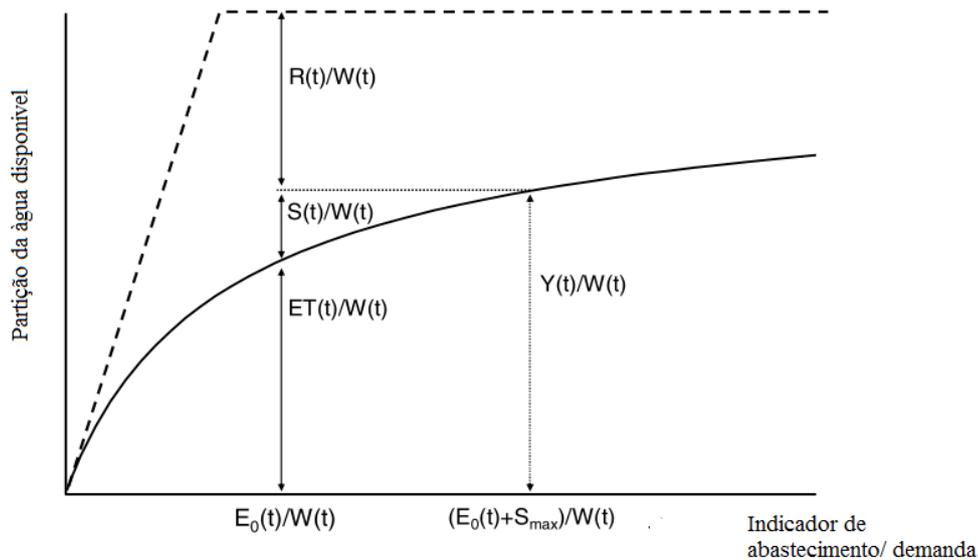


Figura 4. Esquema da partição da água disponível em evapotranspiração real $ET(t)$, armazenamento $S(t)$ e recarga subterrânea. O indicador de oportunidade de evapotranspiração — e o indicador de evapotranspiração real — . As linhas ponteadas representam os limites do sistema. (Fonte: Adaptação de Zhang et al., (2008))

Segundo os resultados obtidos por Zhang et al. (2008) existe uma ordem dos parâmetros do modelo de acordo com Tabela 2

Tabela 2 Ordem dos parâmetros do Modelo proposto por Zhang et al., (2008)

Parâmetro	Unidades	Valor Máximo	Valor Mínimo
Capacidade de armazenamento na camada superficial do solo ()	[mm]	500	50
Eficiência na retenção de chuva na camada superficial do solo ()	Adimensional	0.8	0.35
Eficiência na evapotranspiração na camada superficial do solo	Adimensional	0.8	0.35

Potter e Zhang (2009) ressaltam a importância deste modelo conceitual proposto no trabalho de Zhang et al (2008) e analisam que pode ser utilizado para determinar a variabilidade da evapotranspiração em cenários em escalas multianuais. Outros estudos (Donohue et al, (2011)), têm ressaltado a importância da calibração dos parâmetros da curva de F_u apresentados nas equações (25), (32) e (33), especialmente devido a que o modelo simula a dinâmica do armazenamento de água na camada superficial de solo em escalas curtas de tempo, convertendo-se em uma ferramenta que pode melhorar o conhecimento na geração de escoamento superficial.

3.4 MODELOS CONCEITUAIS HIDRÓLOGICOS.

Os modelos de chuva vazão são um tipo de modelos conceituais que tentam representar os processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia, por meio de elementos de armazenamento, chamados usualmente de reservatórios e suas interações conhecidas como fluxos. Os reservatórios estão definidos por variáveis de estado. De acordo com Gupta et al, (2005), a maioria dos modelos conceituais do tipo chuva- vazão (MCCV), podem ser definidos como concentrados, é dizer, não consideram a variabilidade espacial dos processos; em geral, os modelos concentrados utilizam somente o tempo como variável independente.

Os modelos conceituais estão estruturados para que suas equações e seus parâmetros descrevam as características dos reservatórios e dos processos hidrológicos envolvidos na modelagem, tais como: o tamanho dos reservatórios, a localização das retiradas, a distribuição espacial, entre outros. Uma das suposições iniciais é que se esses parâmetros não são mensuráveis, eles representam constantes do sistema que está sendo modelado, e além da implementação do modelo deve ser definida de maneira indireta algum processo para estimação desses parâmetros.

O principal desafio do hidrólogo é a identificação de um modelo conceitual do tipo chuva-vazão ou vários dependendo do tipo de caso, do objetivo da modelagem, das características da bacia e os dados disponíveis. Essa fase de identificação pode ser subdivida em dois

estágios: (i) seleção da estrutura do modelo, e (ii) Identificação e/ou estimação dos parâmetros (Wagener et al, 2004). Uma vez foram atingidas as duas fases anteriormente descritas deve-se começar a fase de validação ou verificação. No contexto hidrológico validação ou verificação são utilizadas para confirmar se o modelo escolhido representa adequadamente o sistema.

A seguir vão ser descritos dois modelos conceituais do tipo chuva-vazão na escala diária.

3.4.1 SMAP - Soil Moisture Accounting Procedure

O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. Segundo Lopes (1999), o modelo foi desenvolvido baseado na aplicação do modelo Stanford Watershed IV e o modelo Mero em trabalhos realizados no Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Foi originalmente desenvolvido para intervalo de tempo diário e posteriormente apresentadas versões horária e mensal, adaptando-se algumas modificações em sua estrutura. Na versão diária de SMAP, o modelo pode ser resumido como segue na Figura 5.

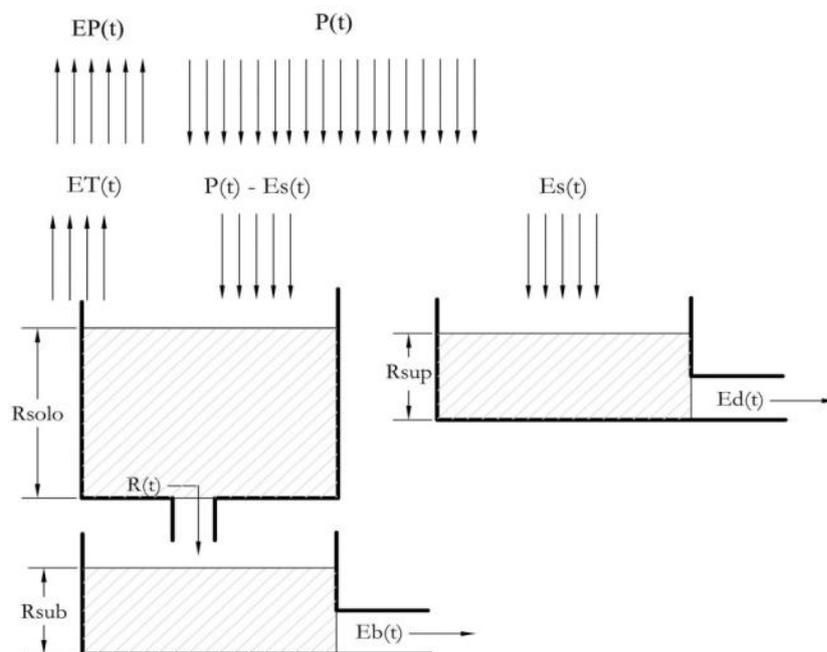


Figura 5. Esquema geral do Modelo SMAP. Fonte: Adaptação de Lopes (1999)

Observa-se no esquema que o Modelo SMAP em sua versão diária está constituído de três reservatórios lineares, associado a cada reservatório existe uma variável de estado. No caso do reservatório definido pela camada de solo, a variável de estado é chamada z , o reservatório da camada superficial do solo está definido pela variável z_s , e o reservatório definido pela parte subterrânea está dado por z_b . O reservatório que representa o solo atualiza sua variável de estado z de acordo com a seguinte expressão:

(34)

Onde z é o nível do reservatório no tempo t , P é a precipitação no tempo t ; Q representa o escoamento superficial no tempo t , R e o fluxo de recarga subterrânea. z_s . No caso do reservatório que representa a camada superficial do solo a atualização da variável de estado é feita por meio da seguinte equação:

(35)

Na expressão (24), uma das variáveis é fluxo de escoamento direto como uma saída do reservatório que representa a camada superficial do solo, a recarga subterrânea vai estar dada pela variável R , como segue:

(36)

Onde Q_b representa o fluxo de escoamento base. A separação do escoamento superficial está fundamentada no método do SCS descrito na seção (3.2.1). O modelo SMAP possui seis parâmetros para calibração, quais sejam a abstração inicial e capacidade de saturação do solo, que estão relacionados com a geração de escoamento direto, o coeficiente de recarga e a capacidade de campo, relacionados com o fluxo de água da camada superficial do solo para o aquífero, e os coeficientes dos reservatórios superficial e subterrâneo.

Segundo Castanharo et al., (2012), analisou e comentou sobre a correção das variáveis de estado dos reservatórios que compõem o modelo SMAP. Antes de ocorrer um grande evento de cheia o reservatório do solo pode ser ocupado em toda sua capacidade, acontecendo uma superestimava dos picos de cheias que ocorrem nos instantes seguintes.

3.4.2 MODELOS HÍBRIDOS CONCEITUAIS DO TIPO CHUVA-VAZÃO

Os modelos conceituais do tipo chuva- vazão possuem uma estrutura que depende do grau de complexidade e da incerteza associada com os processos que estão sendo modelados. No entanto, as diferentes componentes dos modelos conceituais podem ser modificadas para os requerimentos específicos de um problema determinado, sendo adicionadas outras com outro grau de complexidade. Na maioria dos casos, a estrutura é modificada com a finalidade de conservar o princípio da parcimônia e diminuir o grau de incerteza associado como os parâmetros do modelo.

Alguns autores têm trabalhado nas diferentes estruturas de modelos conceituais, no caso de Wagener et al., (2004), esses autores desenvolveram uma metodologia chamada RRMT (The Rainfall-Runoff Modelling Toolbox) a qual visa a idealizar as componentes de um modelo conceitual como um conjunto de "caixas" ou "módulos", sendo assim, dentro de qualquer modelo conceitual podem ser inseridas diferentes estruturas; devido a que cada "módulo" representa um processo dentro do sistema, cada modulo pode ser trocado por outro "módulo" com uma metodologia diferente de operação.

A Figura 6 apresenta a estrutura de módulos que compõem os diversos modelos híbridos conceituais, os quais podem ser executados com relativa facilidade dentro de um pacote computacional. A ideia principal desse tipo de interface gráfica é apresentar para o usuário que podem ser utilizadas diferentes aproximações para cada módulo

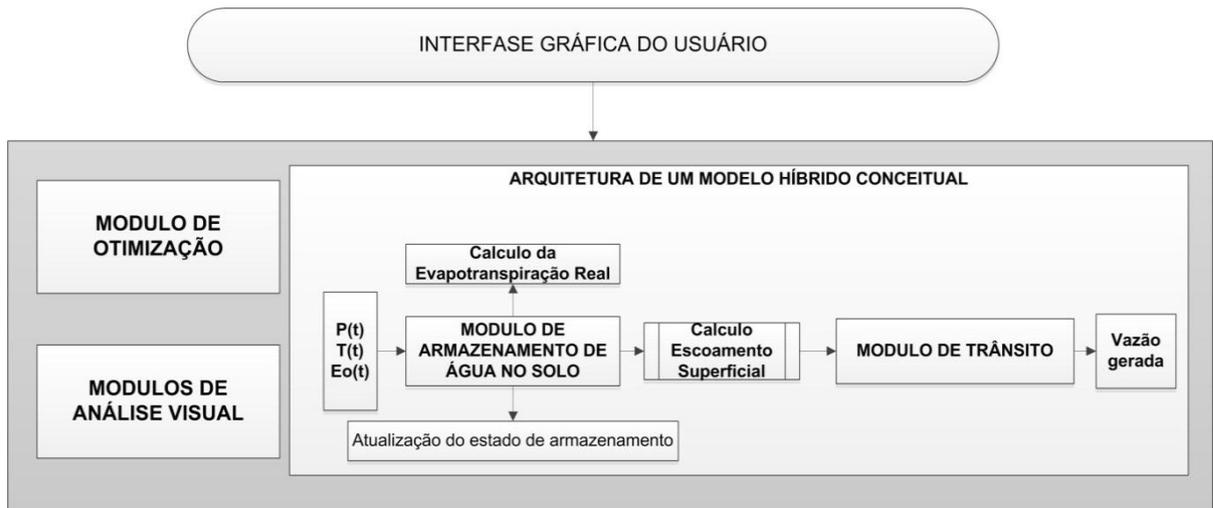


Figura 6. Arquitetura de um sistema de modelo híbrido conceitual. Fonte: Adaptação de Wagener et al. (2004).

Na Figura 6, observa-se que inicialmente são inseridos dados de precipitação, cálculo de evapotranspiração potencial por meio de dados de temperatura do ar. A função do módulo de armazenamento de água no solo é transformar os dados de precipitação em escoamento superficial, na maioria dos casos esse modelo possui diferentes representações da evapotranspiração real e da maneira como é armazenada a água no solo. O módulo de trânsito simula os diferentes caminhos possíveis dos fluxos horizontais que estão sendo gerados e finalmente gera um valor de vazão. Os outros módulos adicionais que estão por fora da arquitetura do modelo conceitual híbrido são os módulos de calibração e da análise visual, os quais também podem ser modificados dependendo do tipo.

4. METODOLOGIA

A seguir vão ser apresentados os dados disponíveis, a estrutura e os procedimentos computacionais que foram executados para cumprir com as análises propostas nos objetivos gerais e específicos dessa pesquisa. Inicialmente foi feita uma descrição geral da zona de estudo, visando a conhecer a disponibilidade e as características dos dados que existem nessa área de estudo. Continuando, com uma descrição da modelagem conceitual de processos hidrológicos por meio da utilização de uma metodologia análoga à proposta inicial do Budyko no longo prazo, mas enfocada na modelagem na escala diária. Finalmente é apresentada a estrutura do modelo híbrido conceitual do tipo chuva-vazão proposto nesse estudo para estabelecer comparações entre diversos resultados que esperam ser obtidos.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi subdividida em duas regiões diferentes do Brasil. A primeira foram 15 postos fluviométricos localizados no estado do Ceará; a segunda área de estudo tratava-se de 23 postos fluviométricos localizados no Distrito Federal e entorno.

Na Figura 7, apresenta-se a localização de algumas bacias utilizadas nesse estudo. Uma das razões para utilização dos dados dessas bacias, pode ser resumido de acordo como Alexandre et al. (2005), como segue: A utilização de modelos chuva-vazão no Estado do Ceará torna-se fácil devido ao maior número de registros na série de precipitação e sua melhor distribuição espacial. Já para os dados de evapotranspiração existem poucos pontos de coleta, no entanto, estes podem ser transferidos de bacias próximas sem grandes problemas devido a sua pequena variabilidade no semi-árido

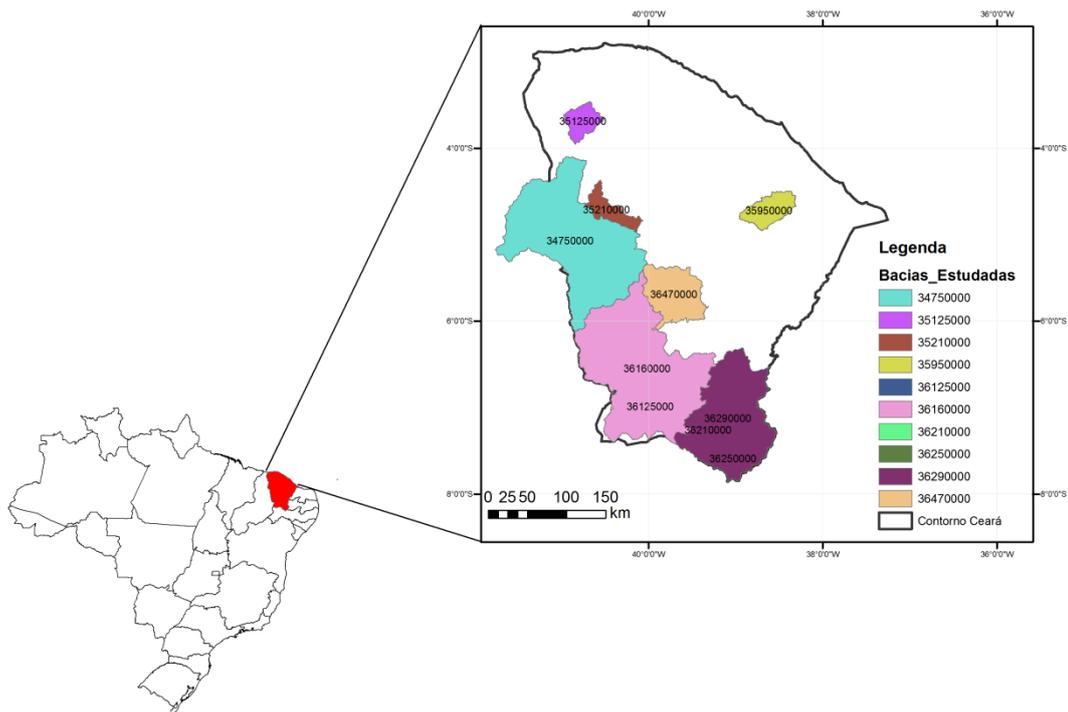


Figura 7. Localização de algumas bacias utilizadas na modelagem hidrológica na escala diária e mensal no Estado do Ceará. (Fonte: Elaboração própria).

O modelo proposto por Zhang et al., (2008) para determinação de escoamento superficial foi aplicado em bacias áridas e semiáridas na Austrália, outra razão apropriada para a utilização dos dados das bacias do Ceará e para a aplicação e avaliação desse modelo simples e com poucos parâmetros. Sendo uma novidade, analisar os resultados obtidos com esta metodologia de modelagem conceitual hidrológica na escala sub-anual.

Na Figura 8, apresenta-se a localização dos postos fluviométricos trabalhados na escala mensal no Distrito Federal e entorno.

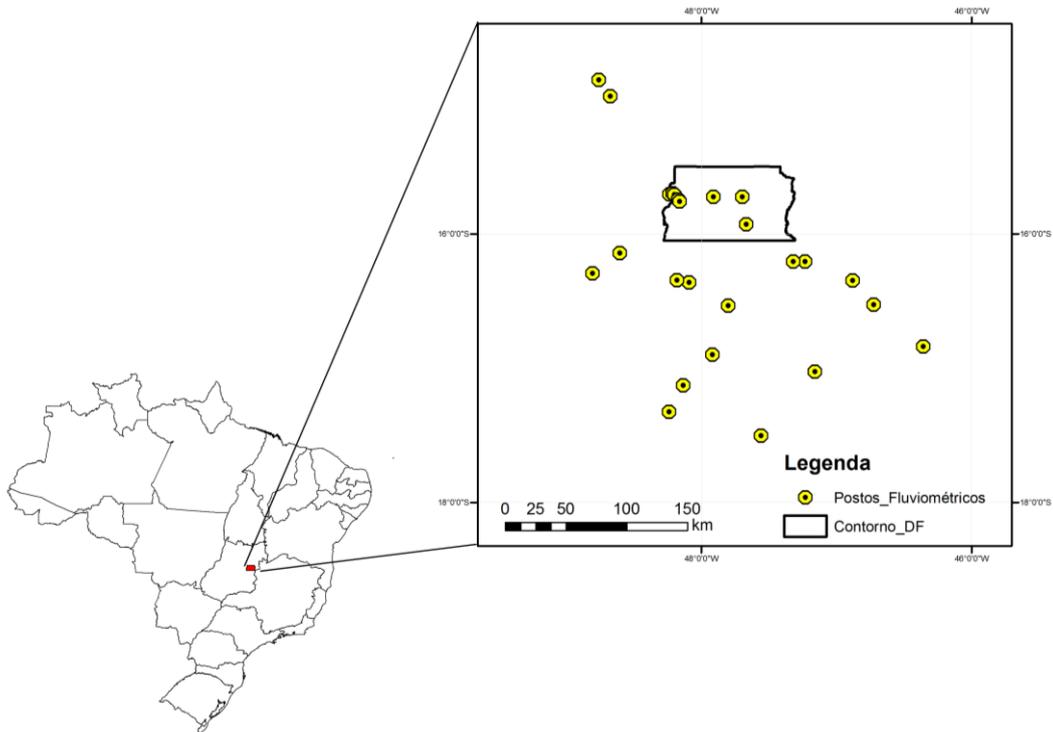


Figura 8. Localização de algumas bacias utilizadas na modelagem hidrológica na escala mensal no Distrito Federal e entorno. (Fonte: Elaboração própria).

A região de estudo localizada no Distrito Federal corresponde a bacias localizadas no Distrito Federal e entorno. Segundo Kawashita (2012) a região do Distrito Federal e Entorno é composta por três regiões hidrográficas federais: Paraná, São Francisco e Tocantins- Aráguaria. Essas regiões hidrográficas nacionais, nos âmbito do Distrito Federal e Entorno, são subdivididas em sete bacias hidrográficas: rio Corumbá, rio Descoberto, rio Paranoá, rio São Bartolomeu, rio São Marcos, rio Preto e rio Maranhão. As cinco primeiras fazem parte da região hidrográfica do Paraná, a penúltima do São Francisco e a última do Tocantins-Aráguia.

4.2 DADOS UTILIZADOS

Os dados foram divididos, processados e caracterizados dependendo da escala para qual foram utilizados, e dizer, em escala mensal e diária. A seguir são expostas as características desses dados.

4.2.1 Dados utilizados para modelagem na escala mensal

Para a modelagem conceitual de processo hidrológicos na escala mensal aplicado ao Distrito Federal foram utilizados 23 postos fluviométricos cujas características são apresentadas na Tabela 3. De acordo como o apresentado nessa tabela as bacias que foram estudadas têm áreas variando de 12.6 até 20.681 km². A quantidade de anos disponíveis varia entre 23 e 78, com uma média de 400 meses de análise para cada posto fluviométrico.

Tabela 3. Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica na escala mensal no Distrito Federal.

Posto Fluviométrico	Código	Período de dados disponíveis	Curso de Água.	Área de Drenagem [km ²]
Descoberto Chácara 89 Chapadinha	60.435.000	1979-2006	Rio Descoberto	116,00
(Aviário DF-180)	60.435.100	1979-2005	Rio Chapadinha	21,00
Olaria (DF-08)	60.435.150	1979-2005	Córrego Olaria	12,60
Capão Comprido (Descoberto)	60.435.300	1979-2005	Rio Capão Comprido	14,00
Ribeirão das Pedras (DF-180)	60.435.400	1979-2005	Ribeirão das Pedras	75,90
Bananal - EPIA 003	60.477.600	1979-2005	Córrego Bananal	112,00
Sobradinho - Jusante DF-330	60.474.100	1979-2004	Ribeirão Sobradinho	125,00
DF-18 / BR 251	60.490.000	1971-2005	Rio São Bartolomeu	2.140,00
Ponte São Bartolomeu	60.500.000	1971-2004	Rio São Bartolomeu	4.688,00
Ponte Anápolis-Brasília	60.430.000	1970-2004	Rio Corumbá	1.711,00
Ribeirão das Antas	60.432.000	1979-2002	Rio das Antas	349,00
Estrada GO-56 (PCD INPE)	60.445.000	1972-2003	Rio Corumbá	7.732,00
Fazenda Buriti	60.510.000	1972-2003	Rio Corumbá	14.847,00
Montes Claros	60.540.000	1972-2008	Rio Piracanjuba	3.843,00

Posto Fluviométrico	Código	Período de dados disponíveis	Curso de Água.	Área de Drenagem [km²]
Pires do Rio (PCD INPE)	60.545.000	1972-2004	Rio Corumbá	20.681,00
Ponte São Marcos	60.020.000	1971-2004	Rio São Marcos	4.339,00
Campo Alegre de Goiás	60.030.000	1972-2005	Rio São Marcos	7.864,00
Ponte Quebra Linha	20.050.000	1967-2008	Rio Maranhão	11.259,00
AHE Porteiras	20.090.000	1967-2002	Rio Maranhão	13.901,00
Fazenda Limeira	42.460.000	1957-2006	Rio Preto	3.746,00
Unai	42.490.000	1957-2003	Rio Preto	5.229,00
Santo Antônio do Boqueirão	42.540.000	1957-2004	Rio Preto	5.773,00
Porto dos Poções	42.600.000	1957-2004	Rio Preto	9.270,00

Os dados de evapotranspiração potencial [mm/mês] e precipitação [mm/mês] foram obtidos de Kawashita (2013), enquanto os dados de vazão [m³/s] são aqueles publicados no PGIRH-DF (2012). Para a modelagem na escala do mensal no Estado do Ceará foram utilizadas 15 estações fluviométricas. A média de registros nas estações é de 21 anos com registros variando entre 11 e 31 anos. Algumas das características desses postos fluviométricos são apresentados na Tabela 4

Tabela 4. Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica na escala mensal no Estado do Ceará.

ID Estação	Área de Drenagem [km²]	Anos de calibração	Período de calibração [meses]	Disponibilidade de dados [anos]
34750000	18339.5	1989-1996	96	31
35210000	1642.6	1993-2000	96	31
35650000	453.9	1974-1978	60	31
35760000	244.9	1970-1973	48	31
35880000	4093.2	1977-1983	84	31
35950000	2055.8	1981-1988	96	18
36045000	3958.5	1989-1996	96	14
36125000	3746.1	1892-1989	96	21

ID Estação	Área de Drenagem [km²]	Anos de calibração	Período de calibração [meses]	Disponibilidade de dados [anos]
36160000	20608.9	1977-1984	96	17
36210000	1755.9	1991-1996	72	11
36250000	4372	1989-1996	96	23
36270000	8986.9	1975-1082	96	19
36290000	12680.4	1972-1979	96	15
36470000	4838.3	1979-1985	84	12
36520000	6794.6	1936-1943	96	15

Os dados empregados tinham características similares com os dados que foram utilizados na modelagem feita no Distrito Federal, é dizer, dados de evapotranspiração potencial em [mm/mês], dados de precipitação também nas mesmas unidades. Assim como, dados observados de vazão mensal em [m³/s].

4.2.2 Dados utilizados para modelagem na escala diária

Os dados que foram para modelagem na escala diária foram processados segundo o procedimento descrito em Otsuki et. al, (2012), esse dados estão sendo apresentados na Tabela 4. Foram utilizados dados de evapotranspiração em [mm/dia], dados de precipitação diária e dados de vazões observadas em [m³/s].

Tabela 5. Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica na escala diária no Distrito Federal.

ID Estação	Área de Drenagem [km²]	Anos de calibração	Anos de verificação	Disponibilidade de dados [dias]	Disponibilidade de dados [anos]
34750000	18339.5	1989-1996	1965-1988	2922	31
35210000	1642.6	1993-2000	1963-1992	2922	31
35650000	453.9	1974-1978	1969-1973	1826	31
35760000	244.9	1970-1973	1967-1969	1461	31

ID Estação	Área de Drenagem [km²]	Anos de calibração	Anos de verificação	Disponibilidade de dados [dias]	Disponibilidade de dados [anos]
35880000	4093.2	1977-1983	1970-1976	2556	31
35950000	2055.8	1981-1988	1979-1980	2922	18
36045000	3958.5	1989-1996	1982-1988	2922	14
36125000	3746.1	1892-1989	1968-1981	2922	21
36160000	20608.9	1977-1984	1967-1976	2922	17
36210000	1755.9	1991-1996	1985-1990	2192	11
36250000	4372	1989-1996	1973-1988	2922	23
36270000	8986.9	1975-1082	1963-1974	2922	19
36290000	12680.4	1972-1979	1964-1971	2922	15
36470000	4838.3	1979-1985	1973-1978	2557	12
36520000	6794.6	1936-1943	1928-1935	2922	15

4.3 MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS UTILIZANDO UMA METODOLOGIA BASEADA NAS HIPÓTESES DE BUDYKO.

De acordo com o que foi descrito nas seções (3.1), (3.2) e (3.3) as relações propostas por Budyko para a modelagem do balanço hídrico em função de condições limites do clima local, poderiam ser uma ferramenta que ajude a entender a dinâmica do balanço hídrico em escalas curtas de tempo. De acordo com Yang et al., (2006), o balanço hídrico na escala local depende das condições climáticas e também está relacionada com fatores da superfície terrestre tais como a capacidade de armazenamento no solo, sendo necessário principalmente nas regiões áridas determinar como variam as taxas de evapotranspiração em função da precipitação de acordo com o formulado no modelo de Zhang et al., (2008). A seguir vai ser descrito a metodologia para a modelagem utilizando essas propostas

4.3.1 Modelagem de escoamento superficial com a metodologia proposta por Zhang et. al (2008)

De acordo com o apresentado na seção (3.2.4) o modelo proposto por Zhang et al., (2008) pode ser resumido de acordo com o esquema mostrado na Figura 9. Inicialmente são introduzidos dados de evapotranspiração potencial e precipitação, e o modelo gera vazões na escala diária, para cada posto fluviométrico foi preciso a calibração dos parâmetros. Na calibração do modelo proposto por Zhang et al., (2008) vai ser utilizada uma calibração automática com o algoritmo SIMPLEX proposto por Nelder & Mead (1965). A seguir vai ser descrito, o processo que foi implementado na calibração do modelo baseado nas hipóteses de Budyko.

a) Calibração automática com o algoritmo de busca direta SIMPLEX (Nelder e Mead, 1965) na escala diária e mensal.

Na calibração do Modelo proposto por Zhang et. al. (2008) na escala diária com algoritmo de busca directa Simplex, trabalhou-se com a avaliação de uma função objetivo, denominada (FO1) que busca maximizar a eficiência definida por Nash e Sutcliff (1970), e apresentada na equação (37):

(37)

em que, O , é a série de vazões observadas, S , a série de vazões simuladas, no comprimento da série em meses e O_m , é vazão média observada; θ é um conjunto de parâmetros determinado.

O conjunto de parâmetros inicialmente proposto na Metodologia de Zhang et al. (2008) calibrado, está conformado pelos quatro parâmetros desse modelo, como segue, θ . Devido a que não se conheciam as condições iniciais dos reservatórios, foram calibradas as condições de armazenamento iniciais dos reservatórios superficial e subsuperficial

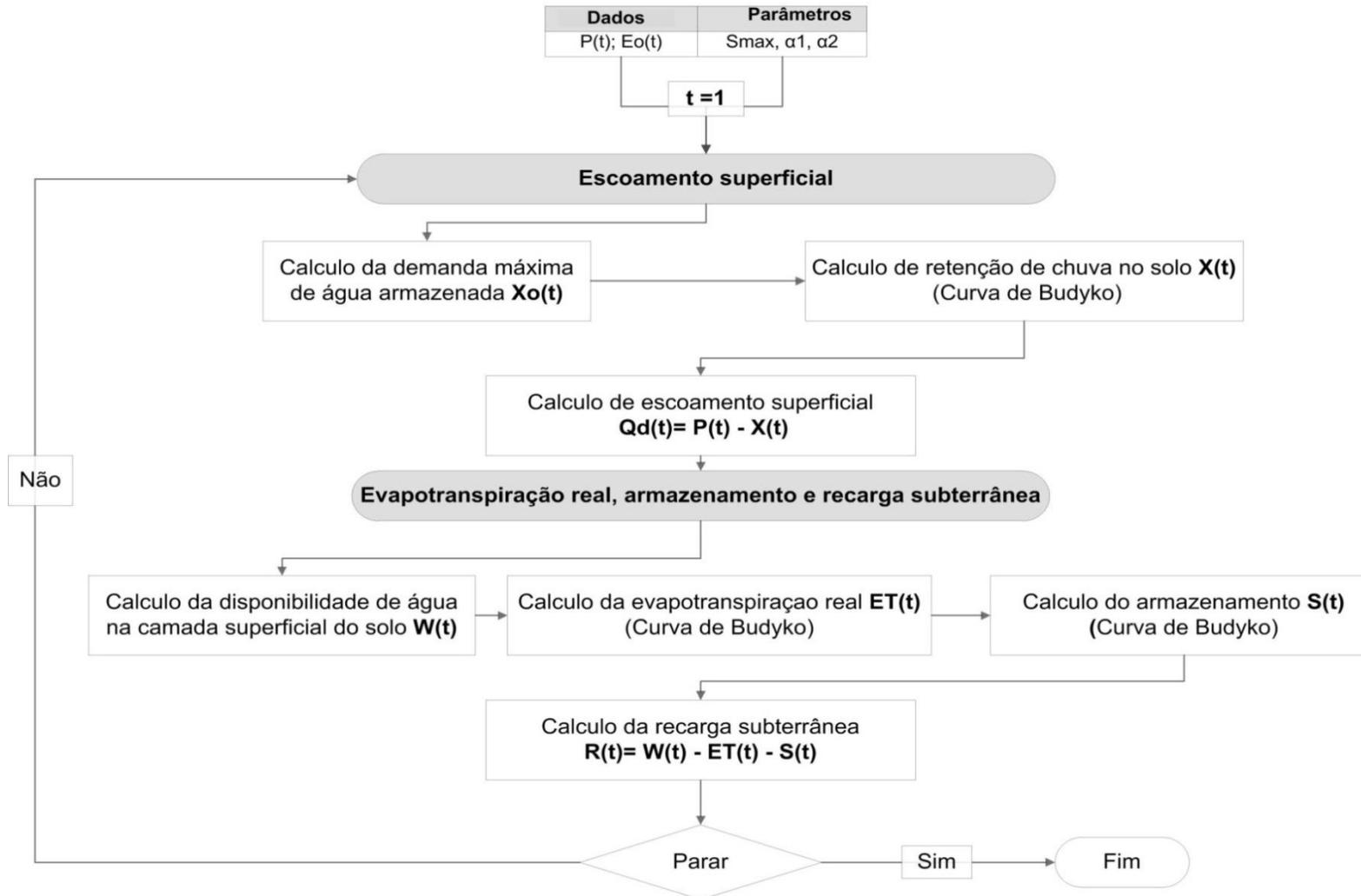


Figura 9. Esquema geral do modelo de Zhang et al., (2008)

Sendo assim, o conjunto de parâmetros calibrado foi, . Na Tabela 6 apresenta-se o intervalo de variação dos parâmetros calibrados na escala mensal no Distrito Federal e Entorno e no Estado do Ceará.

Tabela 6. Intervalo de variação dos parâmetros do Modelo Conceitual Baseado nas Hipóteses de Budyko., na escala mensal.

	Parâmetross					
	Smax [mm]	α_1	α_2	d	tuin	ebin
Limite Inferior	10	0	0	0	1	0
Limite Superior	3000	1	1	1	90	10

O algoritmo de busca direta SIMPLEX foi proposto por Nelder e Mead (1965). Segundo Da Silvae e Júnior (2004), os métodos de busca direta, caracterizam-se pela busca de valores de uma específica função objetivo, usualmente são empregados quando a função é descontínua e não diferenciável, quando as derivadas são difíceis de calcular, ou para aproximações prévias. O método proposto por Nelder e Mead (1965) consiste na criação de um simplex¹ dinâmico modificado continuamente por regras estabelecidas, a fim de que se adapte da melhor maneira à configuração local.

De acordo com Carrillo (2007), em cada iteração o algoritmo proposto por Nelder e Mead (1965) pode ser descrito como segue. Inicialmente, o pior ponto no Simplex é achado ordenando seus vértices da seguinte forma: , de maneira que

. Em um problema de minimização, é o melhor ponto, é o pior ponto, é o segundo pior ponto e assim por diante. Primeiramente, o centróide de todos, menos o pior ponto, é calculado. Seguidamente, o pior ponto do Simplex é refletido, por meio da expressão:

¹ Figura geométrica de N dimensões, consistindo de $N + 1$ vértices e de todos os segmentos de reta que os interconectam, as faces poligonais, etc., conhecido por poliedro convexo.

Onde \bar{x} é o ponto refletido com relação ao centroide. Se \bar{x} e se as restrições não são violadas neste ponto, se considera que a reflexão. \bar{x} levou o Simplex a uma melhor região no espaço de busca, o pior ponto x_i é substituído por \bar{x} e a iteração acaba.

No processo de calibração com o algoritmo SIMPLEX (Nelder e Mead, 1965) foi minimizada a função objetivo (FO1), Nash- Sutcliff para as vazões apresentada anteriormente nesse documento. Com vistas a entender e avaliar o desempenho dos modelos conceituais que foram calibrados, foram introduzidas outras métricas, tais como: o coeficiente Nash-Sutcliff (N.S), a raiz do erro quadrático meio (RMSE), o BIAS o Viés, e o coeficiente de correlação (CORR). A seguir vai ser descrita de maneira geral cada uma dessas métricas:

- **Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)**

A raiz do erro quadrático médio é uma medida frequentemente utilizada para estimar a qualidade de um classificador. Pode ser calculada utilizando a equação (32), na qual n é o número de amostras, x_i é a i-ésima amostra e \bar{x} é a média dos valores de todas as amostras.

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (40)$$

Com a métrica RMSE, quanto mais próximo de zero, melhor será a estimativa.

- **BIAS ou Viés (BIAS)**

O BIAS ou Viés é uma medida que relaciona em termos médios ao longo do período estudado, a diferença entre o valor observado e o valor estimado. Segundo Kawashita

(2013), essa métrica permite a avaliação da direção predominante dos erros associados às estimativas, ou seja, possibilita avaliar se essas estão super ou subestimadas. Com esse conhecimento é possível a aplicação de alguns métodos de correção estatística com a finalidade de remover o viés e aumentar a precisão das previsões.

- **Coefficiente de correlação de Pearson (CORR)**

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis, no caso em estudo essas duas variáveis é a relação entre o valor observado e o valor estimado. Esse coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 (zero) significa que não há relação linear, o valor 1 indica uma relação linear perfeita, o cálculo é feito utilizando a equação

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (41)$$

Onde \bar{x} , é a média dos valores estimado, \bar{y} é a média do valor observado. o valor do coeficiente de correlação e n é o número de observações.

4.3.2 Avaliação e comparação do desempenho do Modelo conceitual de Zhang et. al (2008), na escala diária e mensal.

Com a finalidade de avaliar o desempenho do modelo conceitual de Zhang et al, (2008) na modelagem da dinâmica do balanço hídrico na escala diária e mensal, foi analisado o desempenho do modelo em comparação com outro modelo hidrológico conceitual de chuva-vazão que tivesse sido aplicado nas áreas de estudo. O modelo com características similar escolhido foi o SMAP. A fundamentação teórica desse modelo já foi apresentada nas seções (3.2.1) e (3.4.1).

O modelo SMAP já tem sido executado no nordeste do Brasil e no Distrito Federal para a modelagem do balanço hídrico na escala mensal e diária, apresentando bons resultados. A

modelagem com SMAP foi feita por meio de códigos programados em MATLAB já existentes desse modelo na escala diária e mensal, e também foi executado nos mesmos postos fluviométricos. O modelo SMAP foi calibrado na escala diária por meio do modelo Simplex (Nelder e Mead, 1965) de acordo com o que foi descrito nas seções (4.3.1-a).

4.3.3 Modelagem de evapotranspiração real e escoamento superficial utilizando modelos hidrológicos híbridos.

Os modelos conceituais chuva-vazão descritos na seção (3.4) possuem diferentes estruturas para o cálculo do escoamento superficial, modelagem da evapotranspiração real, da propagação superficial e da propagação subterrânea. Na Tabela 7, são apresentados as principais características do modelo: SMAP, Modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, o qual é denominado na Tabela 7 como BUD(2008). Com vista a melhorar o desempenho do modelo SMAP foi proposto um modelo híbrido denotado HIBI o qual possui as características expostas na Tabela 7.

Tabela 7. Características dos modelos conceituais do tipo chuva vazão a serem utilizados.

Nome do Modelo	Geração de escoamento superficial		Modelagem da Evapotranspiração real		Propaga superficialmente?	
	SCS	BUD	PROP	BUD	SIM	NÃO
SMAP	X		X		X	
BUD(2008)		X		X	X	
HIBI		X	X		X	

De acordo como foi descrito na seção (3.2) deste documento, existem três aproximações para a modelagem do escoamento superficial: SCS e a metodologia baseada nas hipóteses de Budyko (BUD). Uma vez é determinado dentro da estrutura do modelo o escoamento superficial, a evapotranspiração real é calculada, em alguns desses modelos, o processo de evapotranspiração retira toda a água que está armazenada na camada superficial do solo, o qual é denominado na Tabela 7, como uma parte da água disponível que é utilizada em outros processos (PROP). No caso da evapotranspiração calculada com o modelo BUD(2008), é apresentado um novo processo para cálculo da evapotranspiração real, que não encaixa como propagação e também não retira a água do solo. Além disso, existem

nesses modelos fluxos horizontais da água que está sendo gerada, o qual foi chamado na Tabela 7 propagação superficial, e a propagação subterrânea que como seu nome o indica está relacionada com os fluxos verticais da água que vão alimentar fluxos subsuperficiais.

Com a finalidade de explorar possíveis melhoras no desempenho do modelo SMAP, inseriu-se dentro da estrutura desse modelo conceitual a metodologia para cálculo escoamento superficial definida no trabalho de Zhang et al. (2008). A seguir, vai ser definida a estrutura do modelo híbrido, HIBI

I. Modelo Híbrido I (HIBI)- Modelo de Zhang et al., (2008) e SMAP

O modelo híbrido I (HIBI) consiste em calcular o escoamento direto utilizando a metodologia proposta no trabalho de Zhang et al. (2008), contida no modelo SMAP, descrito na seção (3.2.2) e aproveitar a estrutura do modelo SMAP, para a modelagem de evapotranspiração real, o armazenamento de água do solo, recarga subterrânea, entre outras variáveis de estado.

Com a adaptação do modelo para uma estrutura híbrida, o número de parâmetros a serem calibrados aumentou. O teor de umidade do solo depende de um parâmetro que representa o grau de saturação do solo representado como, (SAT), o qual vai ser definido igual ao parâmetro, . Outra característica do modelo que foi modificada, está relacionada está relacionada com como o parâmetro . contido no reservatório linear inserido na superfície, o qual não possuía inicialmente o modelo baseado nas hipóteses do Budyko.

A Figura 10 apresenta o esquema geral do funcionamento do Modelo Híbrido I o qual foi programado em MATLAB. Inicialmente foram definidos os parâmetros do modelo de Zhang et al. (2008),, mais os parâmetros (SAT) e (. do SMAP. As condições iniciais do reservatórios do solo, , e do reservatório subterrâneo, , foram calibradas também. como função das condições iniciais tuin e ebin do SMAP, respectivamente.. Iniciou-se com

o cálculo do escoamento superficial em termos das variáveis de estado do modelo de Zhang et al. (2008). As outras variáveis de estado foram calculadas conforme com a metodologia do SMAP, é dizer, atualiza-se o reservatório da superfície e continua ao momento de calcular a evapotranspiração real, a atualização dos reservatórios de superfície e subsuperficial, Finalmente, calcula-se a vazão como o somatório do escoamento de base e do escoamento superficial.

4.3.1 Calibração automática do Modelo Híbrido I (HIBI) na escala diária

O modelo híbrido na escala diária, foi implementado na região de estudo do Ceará e com os dados descritos na seção (4.2.2). A calibração do Modelo Híbrido foi feita por meio do algoritmo Simplex (Nelder e Mead, 1965) avaliando a eficiência de Nash-Suttcliffe e de outras métricas, tais como o coeficiente de correlação (CORR), a raiz do erro quadrático meio (RMSE) e o BIAS. Os parâmetros calibrados foram: dois parâmetros contidos na estrutura do modelo proposto por Zhang et al (2008) para a geração do escoamento superficial, quais sejam, α_1 e α_2 , a capacidade armazenamento máximo do solo e o coeficiente de eficiência de retenção da precipitação no solo. Devido a que na estrutura do modelo híbrido foi inserido um reservatório linear na superfície contido na estrutura do SMAP, o parâmetro d também foi calibrado. As condições iniciais (tuin) e (ebin) do modelo SMAP, também foram calibradas já que não se conhece com certeza o valor inicial dos reservatórios da superfície e sub-superficial. No total, sete (7) parâmetros foram calibrados no modelo híbrido (HIBI). O intervalo de variação desses parâmetros é apresentado na tabela 8.

Tabela 8. Intervalo de variação dos parâmetros do Modelo Híbrido I (HIBI), na escala diária

	Parâmetro						
	Smax [mm]	α_1	α_2	d	tuin	ebin	k_{2t}
Limite Inferior	10	0	0	0	1	0	0.2
Limite Superior	3000	1	1	1	90	10	10

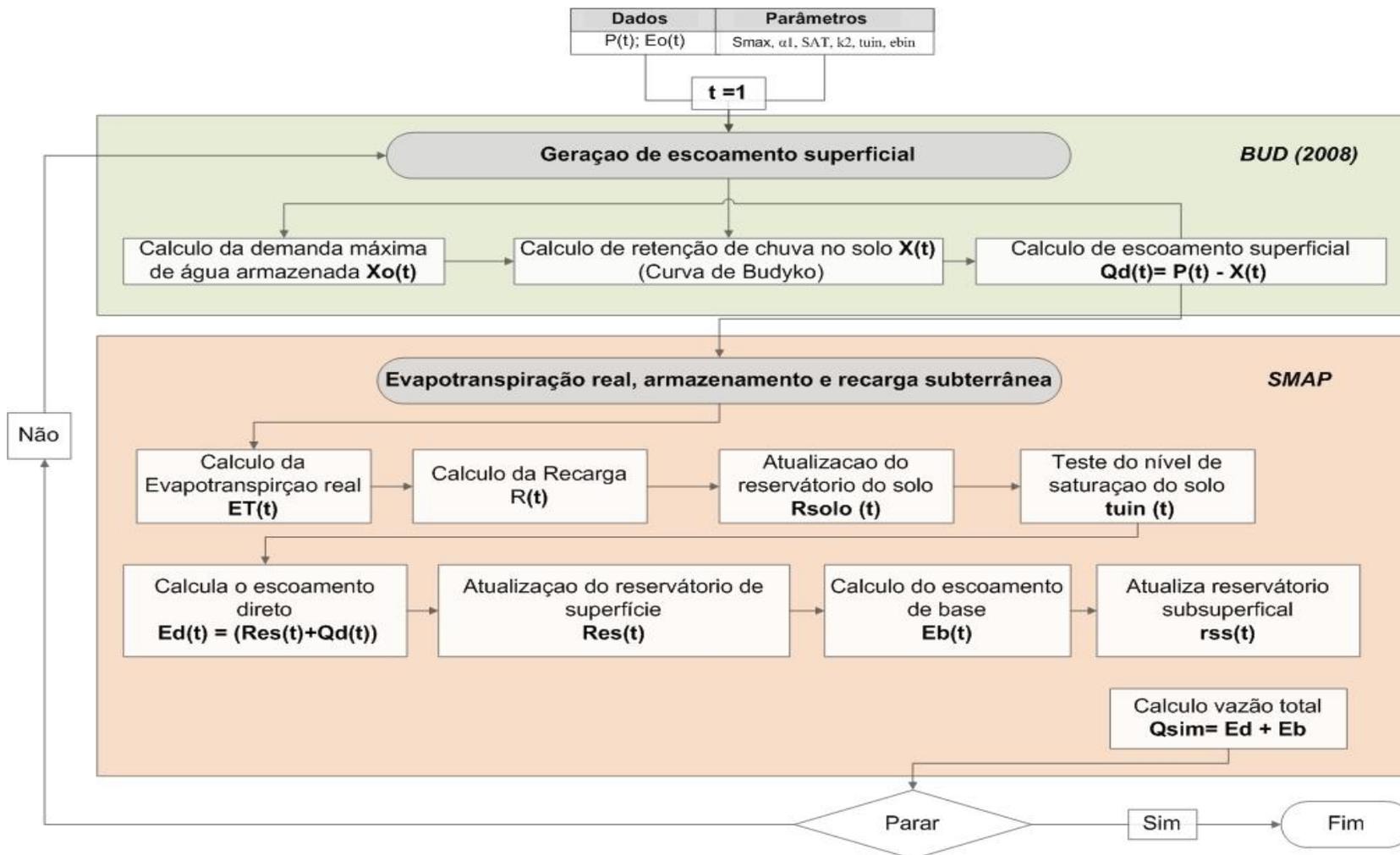


Figura 10 Esquema geral do Modelo Híbrido I. Cálculo do escoamento superficial com a metodologia de Zhang et al., (2008) e as demais variáveis de estado com a metodologia do modelo conceitual SMAP.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo foram propostas várias análises com a finalidade de entender o desempenho do modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, proposto por Zhang et. al. (2008). As análises foram realizadas nas escalas mensal e diária em duas regiões climáticas diferentes, uma no estado do Ceará, localizado no Nordeste do Brasil, onde a maioria das estações estão localizadas em região semi-árida, sobre o embasamento cristalino, com pouca ou nenhum escoamento de base, e outra na região de cerrado do Distrito Federal e entorno, com importante contribuição das águas subterrâneas.

O seguinte capítulo está estruturado como segue, na primeira parte está sendo apresentados os resultados obtidos no Distrito Federal na escala mensal. Depois, prossegue-se com a modelagem na escala mensal para o estado do Ceará, e finalmente é apresentado o trabalho desenvolvido na escala diária para o estado do Ceará. Cada uma dessas partes será acompanhada de uma análise dos resultados obtidos.

5.1 MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA ESCALA MENSAL APLICADO AO DISTRITO FEDERAL E ENTORNO

O desempenho do Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, proposto por Zhang et al. (2008), foi comparado com o desempenho do Modelo Conceitual SMAP, versão de passo mensal. Os dois modelos foram calibrados para os 23 postos fluviométricos, tendo sido empregado o algoritmo de busca direta Simplex (Nelder & Mead, 1965) para maximizar a eficiência de Nash-Sutcliffe para as vazões. A Figura 11 apresenta uma comparação dos valores de eficiência de Nash-Sutcliffe obtidos no processo de calibração dos modelos SMAP e Budyko para os 23 postos fluviométricos estudados na região do Distrito Federal e Entorno.

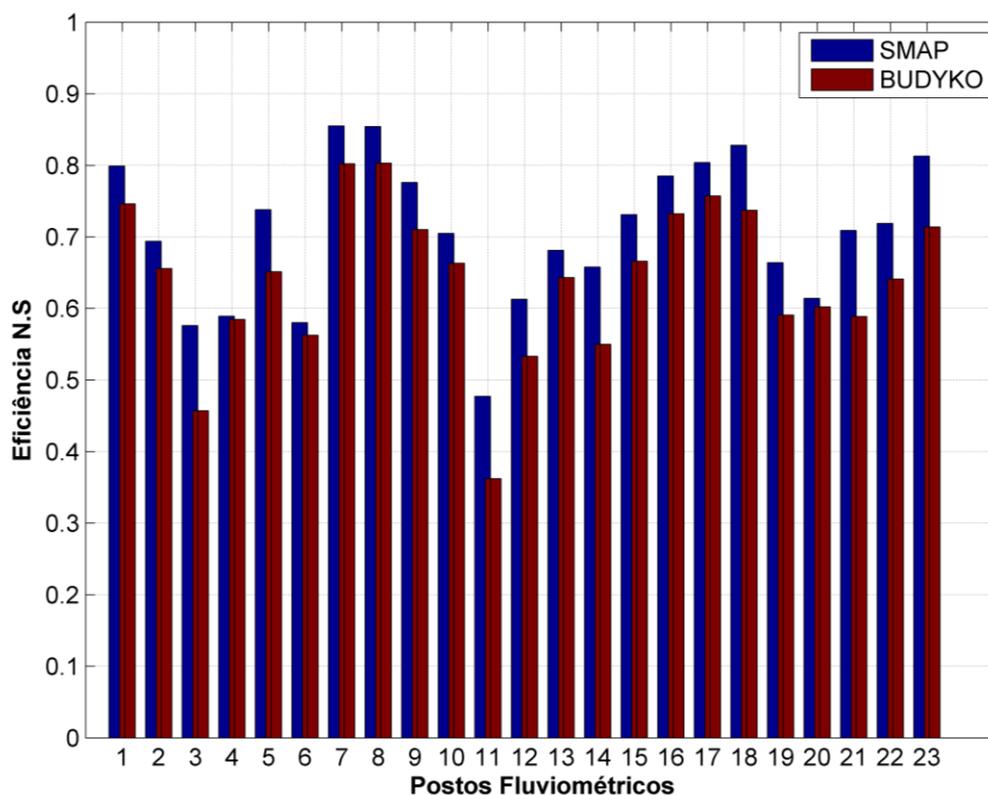


Figura 11. Comparação dos valores de eficiência de Nash-Sutcliff obtidos no estudo de calibração dos modelos SMAP e Budyko, na escala mensal, para os postos fluviométricos localizados na região do Distrito Federal e Entorno.

Observa-se na Figura 11 que o desempenho do Modelo Conceitual Baseado nas Hipóteses de Budyko foi pior do que o desempenho do modelo SMAP em quase todos os postos fluviométricos, embora as diferenças observadas sejam relativamente pequenas na maioria deles. Por exemplo, em quase 60% dos postos, a diferença observada de desempenho foi menor do que 10%, e em mais de 90% dos postos, a diferença foi menor do que 17%. A máxima diferença observada foi de 24% (posto 11).

Quando se realiza uma inspeção visual dos hidrogramas simulados pelos dois modelos, na maioria das vezes, apesar das diferenças numéricas observadas na eficiência de Nash-Sutcliff, não se observa diferenças significativas nas séries de vazão, como pode ser observado no Anexo 1 e na Figura 13, que apresenta as séries simuladas pelos dois modelos, assim como a série observada na estação 60432000 (posto 11).

Evidencia-se também que as eficiências de Nash-Sutcliff são maiores que 0.50 na quase totalidade dos postos, independente do modelo utilizado. No caso do modelo SMAP, apenas um posto obteve Nash-Sutcliff abaixo de 0,50 (posto 11 – NS = 0.47), enquanto que no caso do modelo baseado em Budyko, observaram-se dois postos abaixo desse limite (posto 11 – NS = 0,36; posto 3 – NS = 0,46).

O posto fluviométrico que mostrou a menor eficiência de calibração foi o posto 60.432.000 (posto 11), pertencente ao Rio das Dantas, com uma eficiência no período de calibração de 0,36, no caso do modelo Budyko, e de 0,48 no caso do modelo SMAP. Os postos que apresentaram a melhor eficiência de calibração foram o 60.474.100 e o 60.490.000 com valores do índice Nash-Sutcliff acima dos 0,75. Esses dois postos estão localizados na Bacia de São Bartolomeu, com períodos de calibração da série de 33-34 anos respectivamente. Não foi possível explicar o porquê desses comportamentos díspares dos dois modelos na mesma região, provavelmente seja que existem diferenças significativas nos dados de entrada e por isso o comportamento díspare desses postos fluviométricos.

A Figura 12, Figura 13 e Figura 14, ilustram as diferenças entre os hidrogramas simulados pelos dois modelos nas bacias 42460000 com área de 3746 km² (posto 20), 60432000 com área de 349 km² (posto 11), e 60435300 com área de 14 (posto 4), respectivamente, de forma que seja possível relacionar os valores de Nash-Sutcliff com a inspeção visual dos hidrogramas, tendo em vista que basear-se apenas no valor numérico da métrica empregada pode ser enganoso. Na primeira bacia, a diferença de desempenho, em termos de eficiência de Nash-Sutcliff, foi de 2%, enquanto que na segunda, a diferença foi de 24%, a maior entre os postos utilizados. Na terceira bacia, a diferença é de menos de 1%.

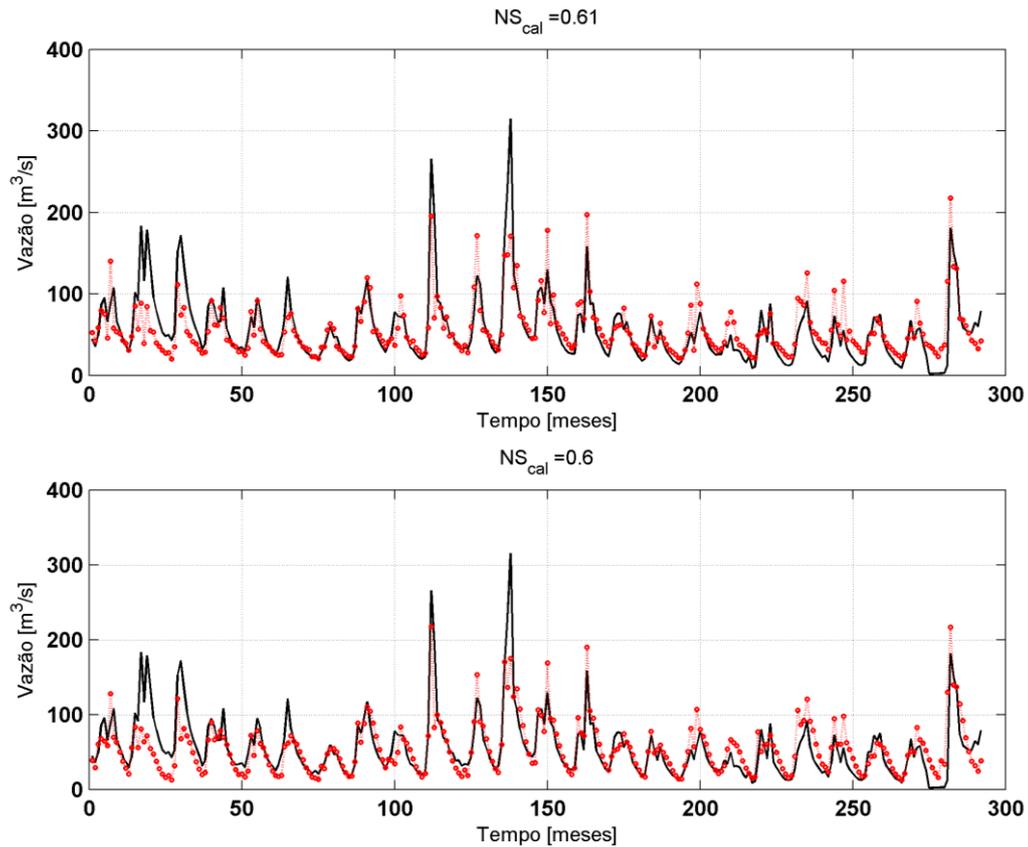


Figura 12. Posto fluviométrico 42460000 comparação dos hidrogramas obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada)

Os hidrograma simulados pelos dois modelos para a bacia 42460000 são praticamente iguais. Ambos representam relativamente bem as vazões observadas no período entre 50 e 200 meses, e ambos apresentam dificuldades em simular as vazões mínimas nos períodos 0-50 e 250-300 meses.

No posto fluviométrico 60432000, os resultados obtidos pelos dois modelos mostram eficiências na calibração menores do que 0,50, embora visualmente, os hidrogramas simulados pelos dois modelos representam relativamente bem o hidrograma observado, com exceção de alguns meses muito úmidos, quando a vazão atinge valores em torno ou maior do que $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Aparentemente, os erros observados nesses períodos são a causa de

um valor de Nash-Sutcliff baixo. Mais uma vez, não se observa uma diferença muito significativa entre os dois modelos hidrológicos.

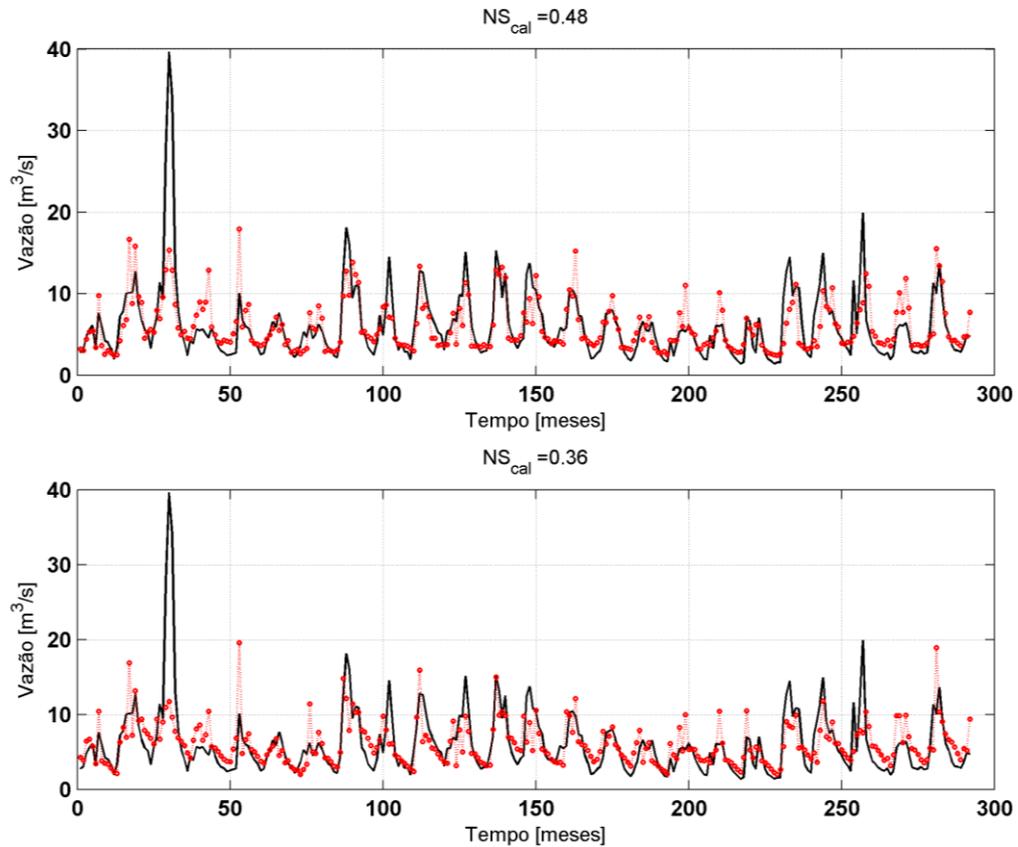


Figura 13: Posto fluviométrico 60.432.000 comparação dos hidrogramas obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada)

Em alguns postos observam-se visualmente diferenças na faixa de vazões mais baixas, como é o caso do posto 60435300, apresentado na Figura 14, onde ambos os modelos apresentam valores de Nash-Sutcliff de aproximadamente 0,60. Apesar de valores similares de Nash-Sutcliff, há indícios de que o modelo baseado nas hipóteses de Budyko é capaz de simular melhor os meses de vazões mais baixas.

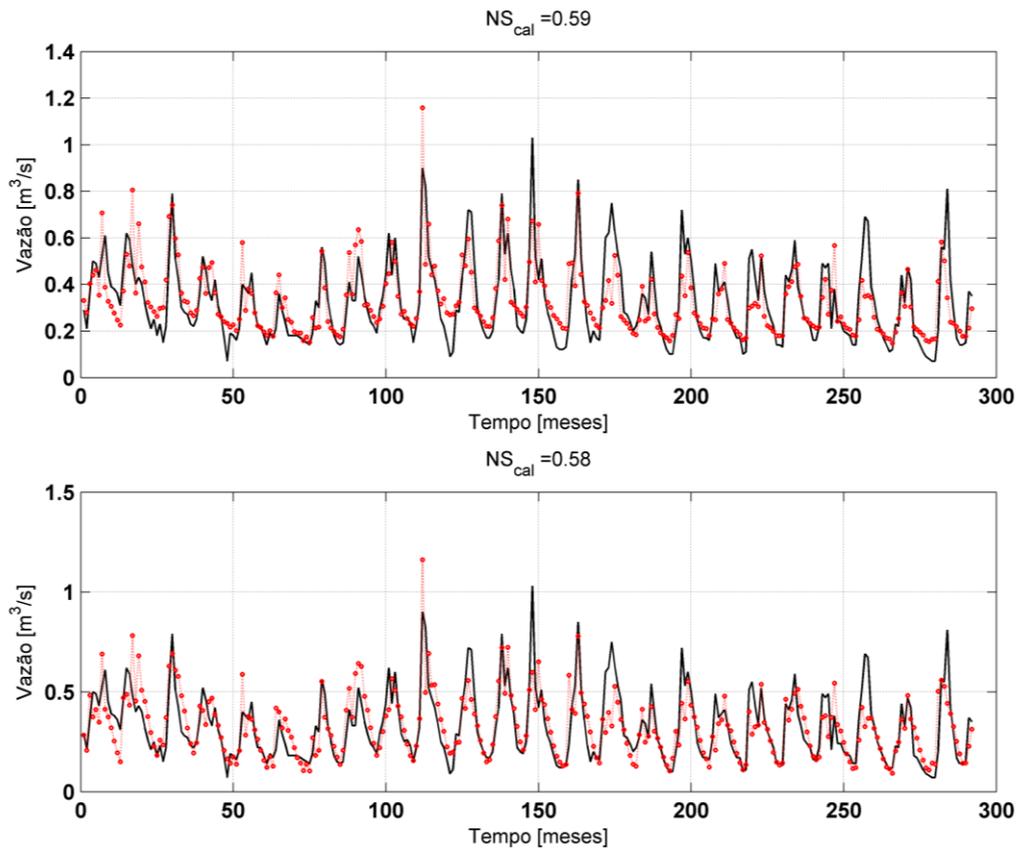


Figura 14. Posto fluviométrico 60.435.300 comparação dos hidrogramas obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada)

Com a finalidade entender o desempenho dos modelos em diferentes faixas de vazão, decidiu-se por avaliar os erros em três diferentes faixas de vazão observada. A série foi dividida numa primeira faixa abaixo do percentil 33 ($Q_{obs} < Q_{obs,33}$), uma segunda faixa das vazões que estão entre o percentil 33 e o percentil 66 ($Q_{obs,33} < Q_{sim} < Q_{obs,66}$), e uma última faixa para os valores acima do percentil 66 ($Q_{obs} > Q_{obs,66}$). Calculou-se o erro definido simplesmente como a diferença entre a vazão simulada e a observada, para cada componente desses vectores.. Além disso, foi construído o erro absoluto definido como o valor absoluto da diferença entre a vazão simulada e a vazão observada para cada faixa.

Observa-se na Figura 15, na primeira faixa das vazões simuladas para o posto 42.460.000 com $Q_{obs,33} = 59.35 \text{ m}^3/\text{s}$, observa-se que a mediana dos erros da série das vazões simuladas no modelo SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko são

quase similares, só tendo uma diferença significativa no grau de variação do erro do modelo SMAP em comparação com o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko.

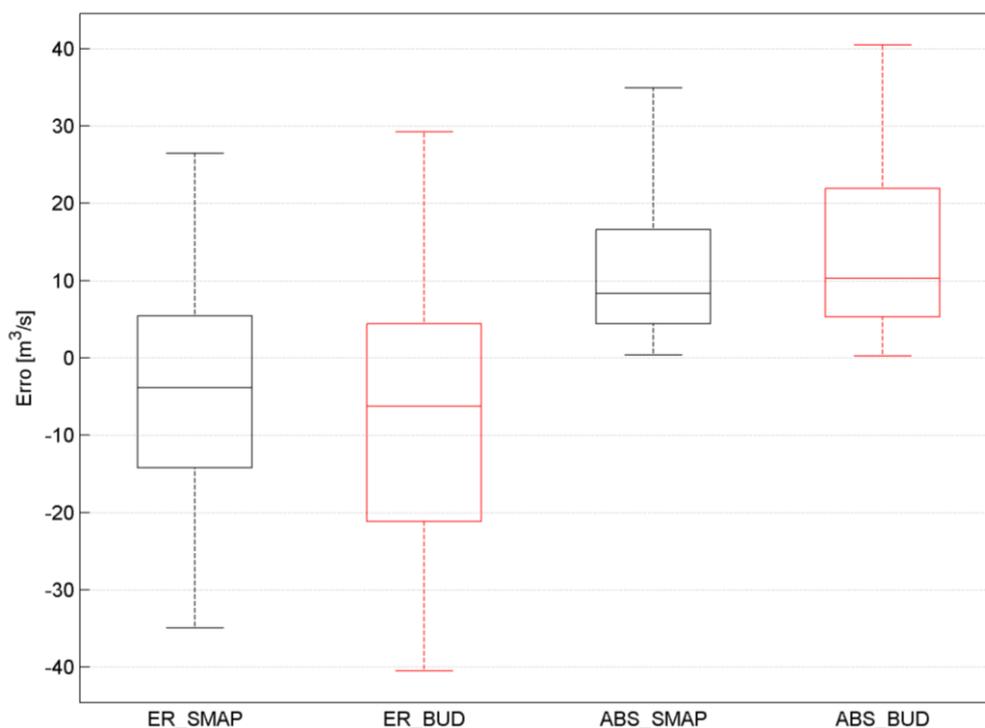


Figura 15. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões menores do que $Q_{obs,33} = 59.35 \text{ m}^3/\text{s}$ Posto 42.460.000. Localizado no Distrito Federal

Na segunda faixa, a qual tem como limite $Q_{obs,66} = 110.20 \text{ m}^3/\text{s}$, apresentada na Figura 16 a mediana das duas séries produzidas é quase similar, devido a que as linhas centrais dos diagramas de caixas estão localizadas na mesma posição horizontal, além disso, o grau de variabilidade do erro e do erro absoluto nos dois modelos é quase similar. Sendo assim, pode ser afirmado que o comportamento dos dois modelos conceituais é muito similar na faixa que vai entre $Q_{obs,33}$ e $Q_{obs,66}$ no posto fluviométrico 42.460.000, localizado no Distrito Federal.

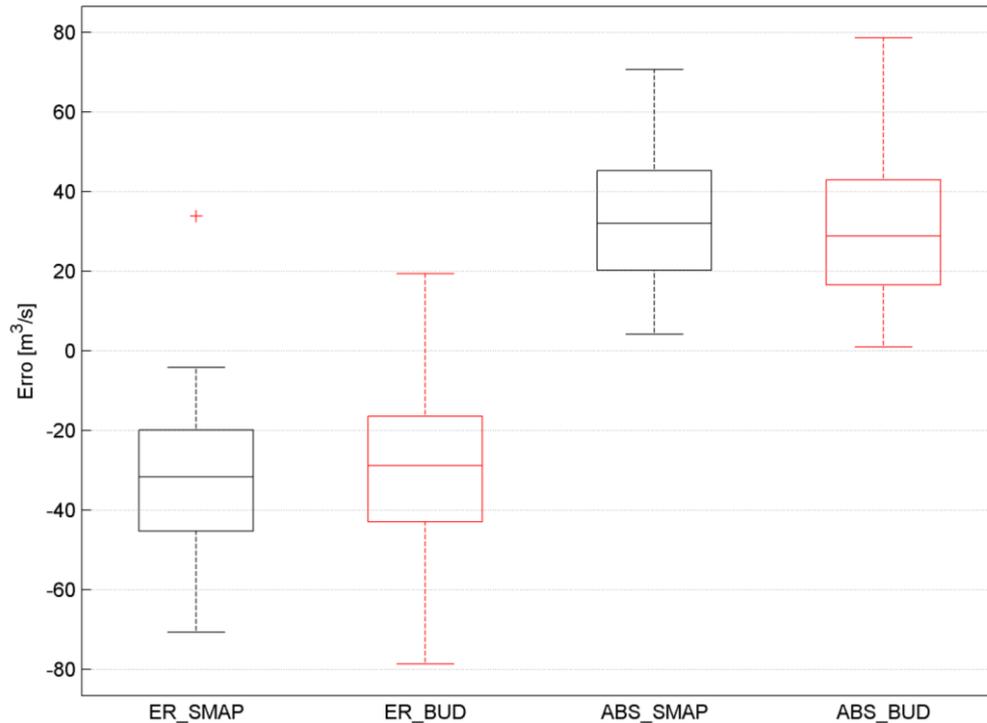


Figura 16. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,33}$ e menores do que $Q_{obs,66}$. Posto 42.460.000. Localizado no Distrito Federal

Na ultima faixa de análise para o posto 42.460.000, que compreende o erro das vazões simuladas com os dois modelos acima do $Q_{obs,66} = 110.20 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ver Figura 17) os diagramas de caixas dos dois modelos mostram a existência de valores atípicos. Vale a pena relembrar que esse posto apresentou bom desempenho na modelagem hidrológica. A magnitude do erro nessa faixa e muito maior em comparação com as outras faixas.

Resumindo, ao fazer análise em cada uma das faixas estabelecidas para o posto fluviométrico 42.460.000 localizado no Distrito Federal, o Modelo SMAP e o Modelo baseado nas hipóteses de Budyko apresentaram um comportamento muito similar, sendo que a magnitude dos erros e o grau de variabilidade do erro são muito similar nos dois modelos, fato que já foi tinha sido observado no hidrograma das vazões simuladas para esse posto a apresentado na Figura 12

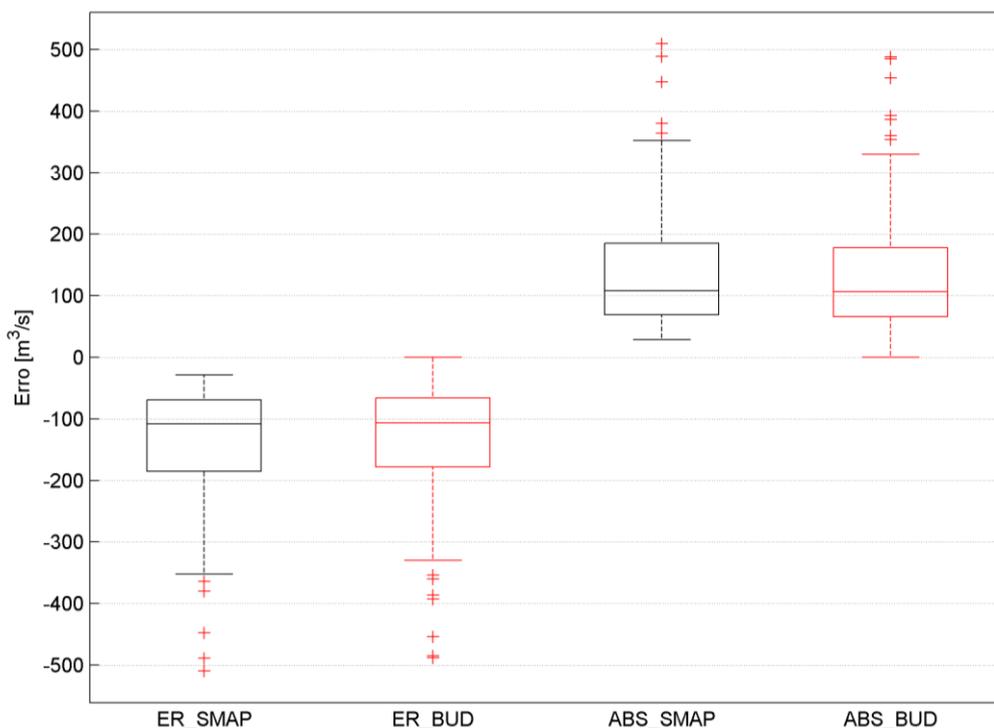


Figura 17. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,66}$. Posto 42.460.000. Localizado no Distrito Federal

Na Figura 18, Figura 19 e Figura 20, está apresentada a análise de faixas para as vazões simuladas em comparação com a vazão observada do posto fluviométrico 60.432.000, lembrando esse posto fluviométrico apresentou valores baixos na eficiência de calibração com os dois modelos.

Na Figura 18, está sendo apresentando o erro e o erro absoluto das vazões para as vazões simuladas abaixo de $Q_{obs,33} = 0.22 \text{ m}^3/\text{s}$, observa-se que os valores do erro da modelagem feita com o modelo baseado nas hipóteses de Budyko tende a subestimar as vazões nessa faixa, apresentando valores de erro negativos. No entanto, o modelo SMAP tende a superestimar as vazões, porém o grau de variabilidade é menor. No caso do erro absoluto, os dois modelos apresentam diferenças, sendo que a média do erro absoluto do modelo SMAP é menor comparado com o modelo baseado nas hipóteses de Budyko.

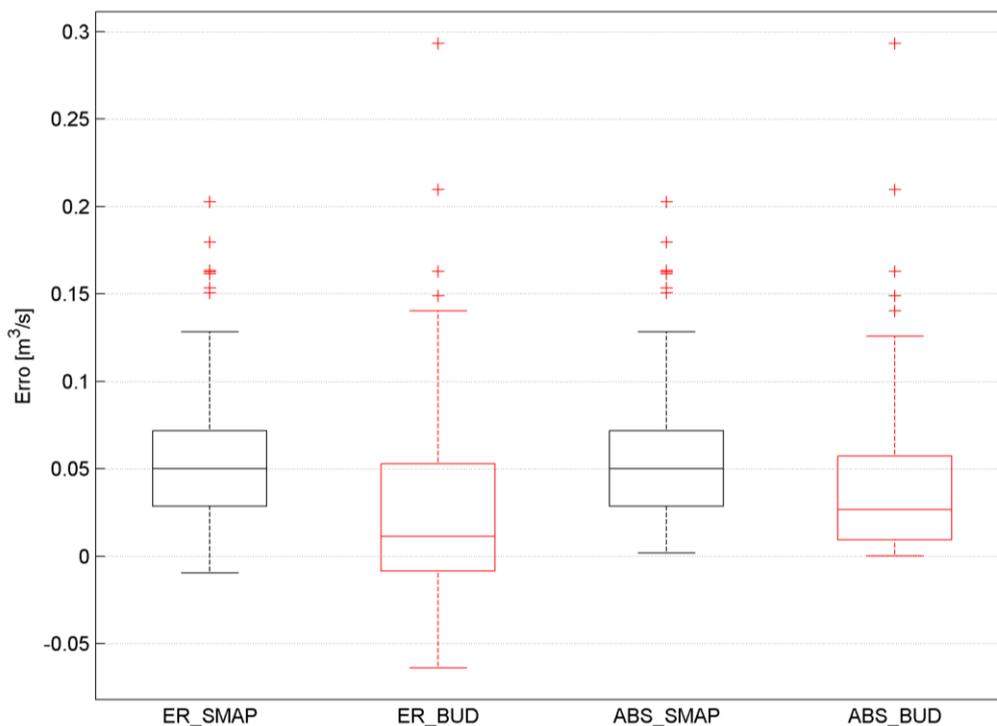


Figura 18. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões menores do que $Q_{obs,33}$. Posto 60.435.300. Localizado no Distrito Federal.

A análise para segunda faixa no posto 60.435.300 localizado no Distrito Federal, representa o grau de variabilidade do erro para as vazões pertencentes ao intervalo maiores do que $Q_{obs,33}$ e menores do que $Q_{obs,66} = 0.38 \text{ m}^3/\text{s}$. (Ver Figura 19). As diferenças não são muito significativas, os dois modelos apresentam um comportamento quase similar. Um aspecto destacável é que na análise de erro o modelo baseado nas hipóteses de Budyko apresenta um grau de dispersão maior do erro. As caixas que relacionam o erro absoluto mostram um grau de variabilidade quase similar, embora o comprimento da caixa do modelo SMAP seja menor.

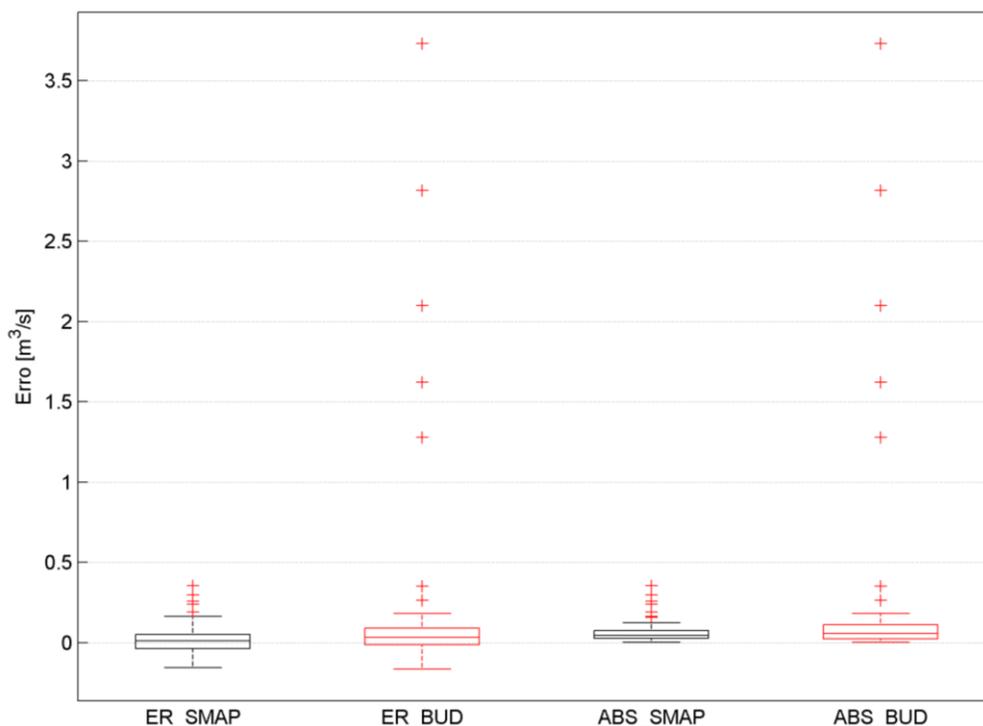


Figura 19. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,33}$ e menores do que $Q_{obs,66}$. Posto 60.435.300. Localizado no Distrito Federal

Na Figura 20 é apresentada a análise comparativa para a faixa pertencente aos valores simulados maiores do que $Q_{obs,66} = 0.38 \text{ m}^3/\text{s}$ no Posto Fluviométrico 60.435.300. Pode-se afirmar que a magnitude do erro nessa faixa é quase similar para os dois modelos. Embora a magnitude dos erros seja pequena, é evidente um grau de variabilidade maior no erro das vazões simuladas com o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko.

Resumindo, a análise das diferentes faixas de vazão simulada para o posto 60.435.300 apresentado anteriormente, mostra como existe um grau de variabilidade maior do erro para as vazões simuladas abaixo de $Q_{obs,33}$, além disso existe uma tendência do modelo baseado nas hipóteses de Budyko a subestimar as vazões mínimas comparado com o Modelo SMAP nesse mesmo posto. Já na análise das vazões acima de $Q_{obs,66}$ a tendência das vazões simuladas com os dois modelos é muito similar, embora exista uma variação do erro com o modelo baseado nas hipóteses de Budyko, porém pouco significativa devido a magnitude pequena do erro.

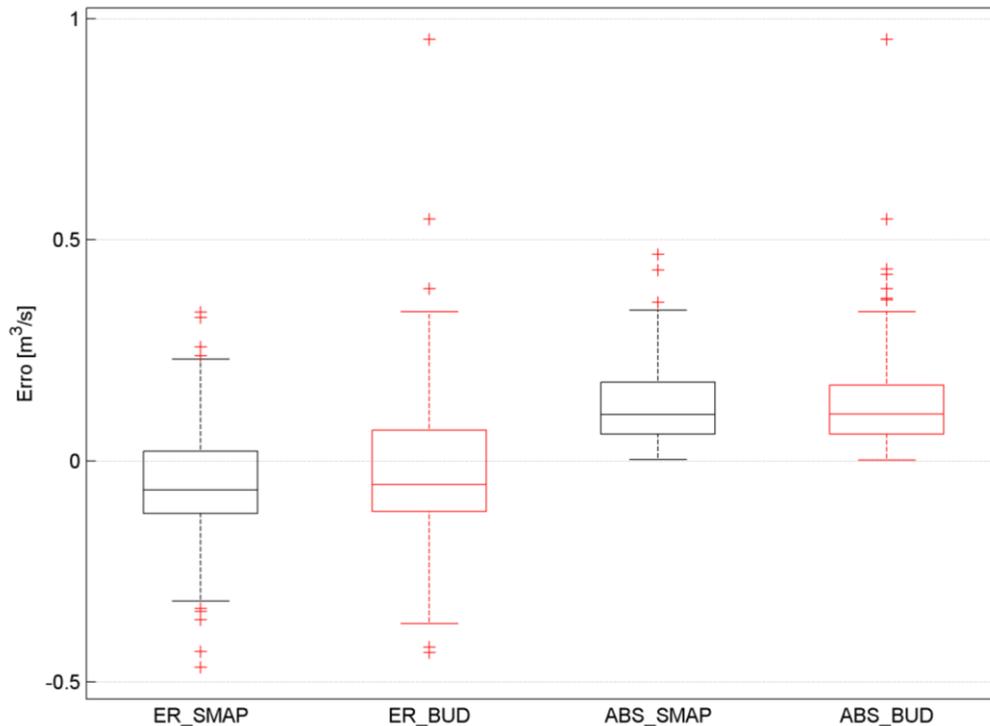


Figura 20. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,66}$. Posto 60.435.300. Localizado no Distrito Federal

Com vista a analisar e confirmar aspectos da modelagem já ressaltados nesse documento foram testadas outras métricas, além da eficiência de Nash-Sutcliff com a finalidade de entender o comportamento das vazões simuladas obtidas com a simulação, assim como o comportamento e avaliar à aplicabilidade do Modelo Conceitual Baseado nas Hipóteses de Buyko, proposto por Zhang et al., (2008). As outras métricas utilizadas foram: Correlação (CORR), BIAS e o erro quadrático médio (RSME). O resultado geral de rodar essas métricas para todos os postos fluviométricos no Distrito Federal e entorno está resumido na Figura 21 e na Figura 22.

Na Figura 21, estão sendo apresentados o comportamento geral das métricas Nash-Sutcliff (N.S) e o coeficiente de correlação de Pearson (CORR) para todos os postos fluviométricos estudados no Distrito Federal e Entorno. Os valores do N.S obtidos com o modelo baseado nas hipóteses de Budyko apresentaram um valor da mediana de 0.65, e uma variabilidade do mesmo coeficiente de entre 0.3-0.8, no caso do N.S obtido com o modelo SMAP, a

localização da linha central da caixa está localizada acima de 0.7, com uma variabilidade entre 0.65-0.8 o qual quer dizer, que a mediana das eficiências obtidas com a modelagem feita com o modelo SMAP é maior do que o Modelo Baseado nas Hipóteses de Budyko. A mesma afirmação pode ser feita pensando no caso da correlação, valores acima de 0.8 como os dois modelos conceituais, embora o modelo baseado nas hipóteses de Budyko apresentasse em alguns postos fluviométricos valores atipicamente baixos em alguns postos fluviométricos como já foi falado anteriormente nesse estudo.

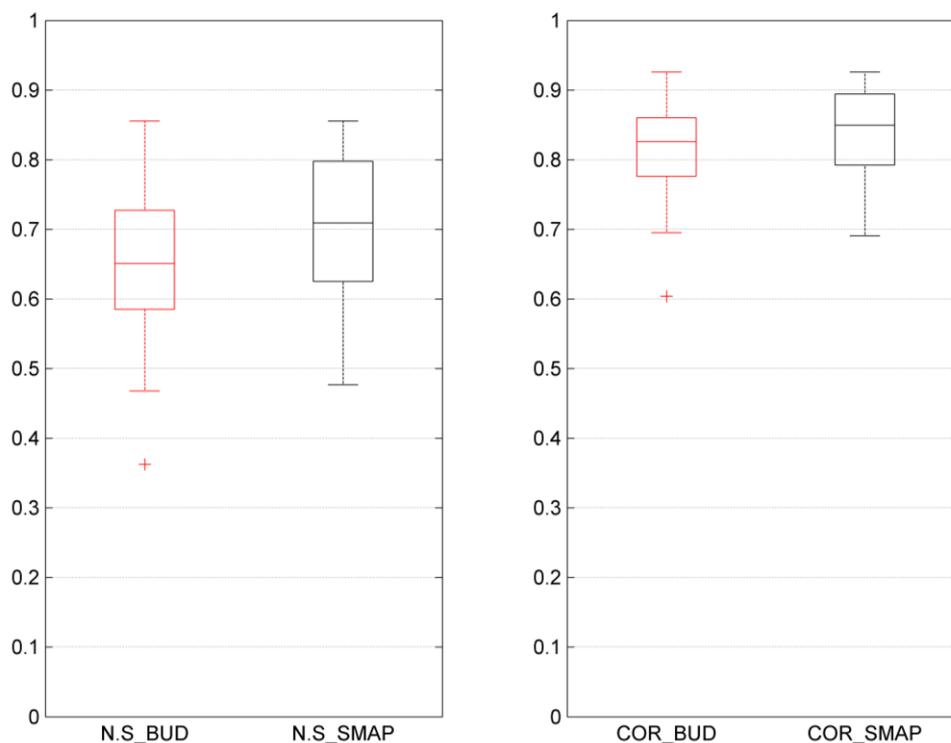


Figura 21. Análise dos comportamentos do Nash-Suttcliffe e da Correlação nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Baseado nas hipóteses de Budyko no Distrito Federal.

Na figura 22, observa-se como o erro quadrático médio (RMSE) tem uma maior dispersão nas simulações feitas com o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, variando entre 0-40, no entanto, no caso do modelo SMAP a variação está compreendida entre 0-40 embora as linhas centrais das duas caixas estejam quase alinhadas, o qual quer dizer que o erro dos dois modelos com respeito às vazões observadas é quase similar. O significado do Bias ou Viés, está relacionado com o erro tendencioso ou sistemático no processo de estimação dos parâmetros de cada modelo conceitual ao observar as caixas apresentadas na

Figura 22 correspondente aos modelos pode-se observar, que o erro é menor nas simulações feitas com o modelo SMAP, pode-se afirmar que a mediana do BIAS produzido ao longo de todos os postos fluviométrico é quase igual, ou seja, o valor esperado de cada uns dos parâmetros e valor esperado dos mesmos é quase similar estimados esse modelo. Não obstante, com o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, os estimadores desses produzem estimativas desviadas do valor esperado, produzindo valores negativos do BIAS.

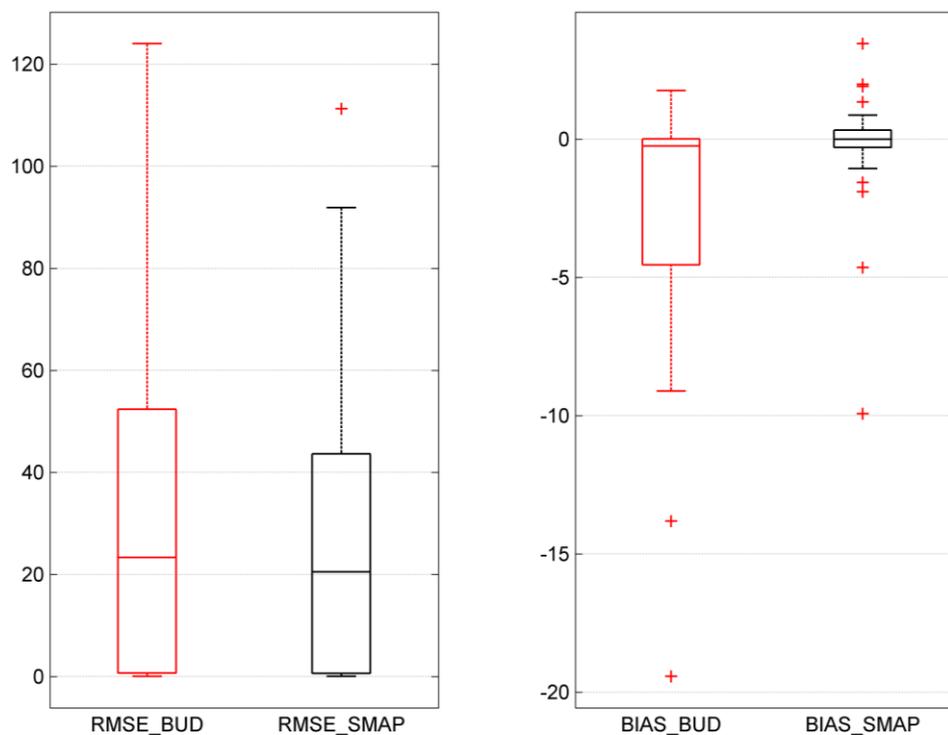


Figura 22. Análise dos comportamentos do RMSE e do BIAS nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Baseado nas hipóteses de Budyko no Distrito Federal e entorno.

Resumindo, a análise das métricas avaliadas com o modelo SIMPLEX (Nelder & Mead, 1965) é muito similar com os dois modelos, no entanto existe um grau de variabilidade maior do modelo baseado nas hipóteses de Budyko, para cada métrica analisada.

Com a finalidade de avaliar se o desempenho do modelo baseado nas hipóteses de Budyko apresentado é estatisticamente inferior ao modelo SMAP na escala mensal nos postos fluviométricos estudados no Distrito Federal e entorno, foi realizado um Teste de

Hipóteses supondo que a eficiência de calibração para cada posto no Ceará seja a mesma nos dois modelos. Calculou-se a diferença do coeficiente de Nash Sutcliff para cada posto como os dois modelos, ou seja, (Ver Anexo 8). Sendo assim, com uma amostra de vinte e três valores, $n = 23$, e supondo que essa amostra se distribui normalmente, então a média das diferenças calculadas foi de $\bar{d} = -0.06$, e o desvio padrão das diferenças $s_d = 0.03$. A hipótese nula (H_0) afirma que a média das diferenças de eficiência de calibração é igual a zero ($\bar{d} = 0$), e a hipótese alternativa é de que a diferença é menor do que zero, de forma que:

$$H_0 :$$

$$H_1 :$$

Utilizando a distribuição *t-student*, devido a que uma amostra com número de dados menor do que 30, e utilizando um nível de significância $\alpha = 0.05$. O valor de referencia para rejeitar o aceitar a hipótese, para uma amostra com $n=23$ de observações, seria igual $t_{\alpha, n-1}$, e assim a decisão a tomar seria como segue:

$$t \leq t_{\alpha, n-1} : \text{ Aceita-se } H_0$$

$$t > t_{\alpha, n-1} : \text{ Rejeita-se } H_0$$

Onde $t = \frac{\bar{d} - 0}{s_d / \sqrt{n}}$, ao substituir os valores de \bar{d} e s_d definidos anteriormente, obtém-

se que $t = -1.15$, ou seja a hipótese H_0 é aceita, é dizer a diferencia das eficiências de calibração, definidas por: $\bar{d} = -0.06$ é menor do que zero, ou seja para cada posto o modelo baseado nas hipóteses de Budyko apresenta um desempenho na calibração menor do que o Modelo Conceitual SMAP. Entretanto, vale mencionar que apesar do desempenho do modelo baseado nas hipóteses de Budyko seja estatisticamente inferior ao modelo SMAP na região, as diferenças são pequenas, ou seja, em termos práticos essas diferenças não são muito importantes (diferença média de 0.06). Discussões sobre significância estatística e significância prática podem ser encontradas em diversos livros de estatística, como por exemplo, em Devore (2004).

Em conclusão, nessa seção foram apresentados os resultados das simulações feitas com dados de 23 postos fluviométricos localizados no Distrito Federal e Entorno na escala mensal. Os resultados mostram que apesar do modelo baseado nas hipóteses de Budyko ter obtido desempenho marginalmente menor do que o modelo SMAP, visualmente os hidrograma simulados são bastante próximos dos hidrograma simulados pelo modelo SMAP. Ao fazer análise das séries de vazões, simuladas para os postos 42.460.000 e 60.435.300 com áreas de 14 e 3746 km², respectivamente, por meio da definição de faixas definidas pelas vazões observadas $Q_{obs,33}$ e $Q_{obs,66}$ de cada posto, mostrou-se como no posto 60.435.300 existe uma tendência do Modelo Baseado nas Hipóteses de Budyko a subestimar as vazões mínimas. Finalmente, foram analisadas diferentes métricas para entender características das séries simuladas com os dois modelos avaliados, as métricas apresentaram uma tendência similar ao longo bacias estudadas na região do Distrito Federal e Entorno.

5.2 MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA ESCALA MENSAL APLICADO AO ESTADO DO CEARÁ.

De maneira análoga ao realizado na seção (5.1) para as bacias da região do Distrito Federal e Entorno, o Modelo SMAP e o modelo conceitual baseado de Budyko nas Hipóteses de Budyko foram ajustados na escala mensal para os 15 postos fluviométricos do estado do Ceará, apresentados anteriormente na Tabela 4, seção (4.2.1). O algoritmo utilizado no processo de calibração dos parâmetros foi o Simplex (Nelder & Mead, 1965) utilizando como função objetivo a eficiência de Nash-Sutcliff e outras métricas definidas: Coeficiente de Correlação de Pearson (CORR), erro quadrático médio (RMSE) e o BIAS. Devido ao grande número de vazões nulas em alguns postos fluviométricos, foi necessário ao momento da avaliação das métricas e da análise das faixas das vazões simuladas trabalhar só com vazões diferentes de zero.

A Figura 23 apresenta os resultados obtidos pelos dois modelos em termos da eficiência Nash-Sutcliff ao longo dos 15 postos. Observa-se que em termos gerais, as eficiências de calibração são maiores quando são comparadas com as eficiências obtidas para as bacias

do Distrito Federal e Entorno, e dizer a quase todos os postos fluviométricos apresentam eficiências de calibração acima de $N.S = 0.4$. Além disso, o modelo baseado nas hipóteses de Budyko apresentou desempenho melhor do que o modelo SMAP em 4 (quatro) dos 15 (quinze) postos utilizados no estudo.

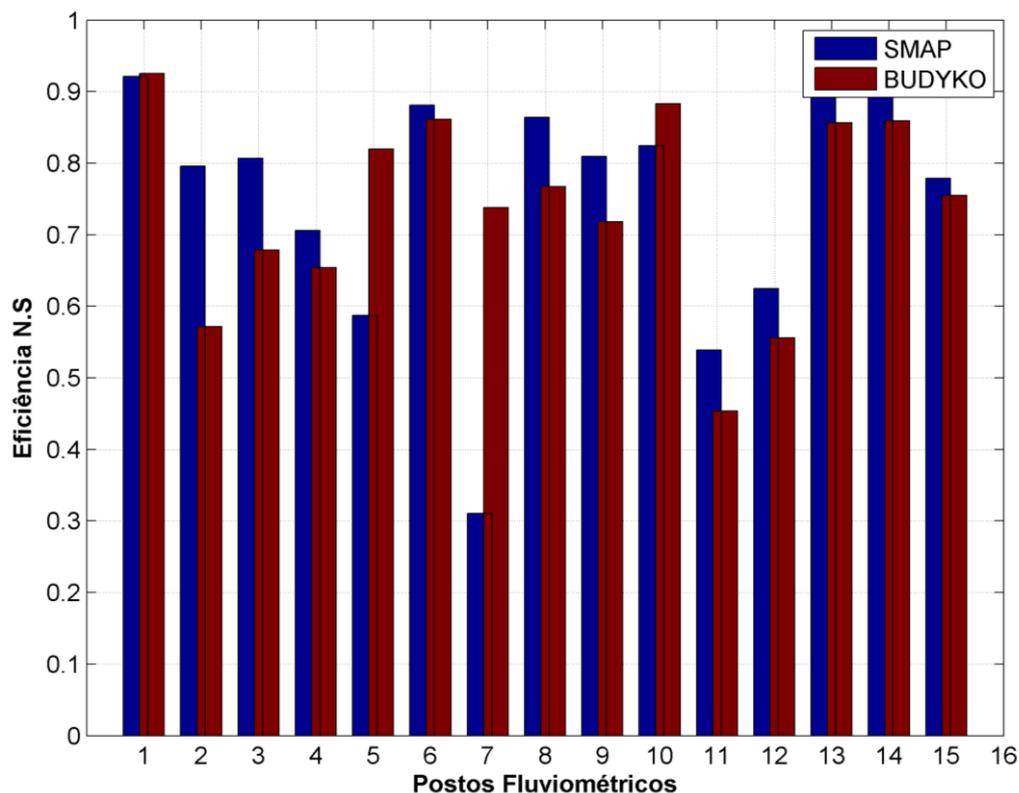


Figura 23. Eficiência na calibração com o Algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) de Nash-Sutcliffe para os 15 postos fluviométricos localizados no Estado do Ceará.

Na grande maioria dos postos onde o desempenho do SMAP foi melhor, a diferença observada foi relativamente pequena. Por exemplo, dos 11 (onze) postos onde o SMAP apresentou melhor desempenho, a diferença de desempenho foi menor do que 12% em 8 (oito). Em apenas 1 (um) posto a diferença de desempenho ultrapassou os 16% (35210000 – posto 2).

Os postos fluviométricos, 36045000 (posto 7), 3625000 (posto 11), 3627000 (posto 12), apresentaram os menores valores de eficiência na calibração, todos abaixo de 0,60. A

estação 36045000 é o único posto que apresente uma eficiência baixa com 40% de eficiência de calibração aproximadamente.

Na Figura 24 são apresentados os hidrograma das vazões simuladas e vazões observadas do posto fluviométrico 3595000, para o modelo SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, esse posto é importante já que apresentou a maior eficiência de calibração definida por Nash-Sutcliff com um coeficiente de $N.S = 0.86$. Ao observar a esses hidrograma (Ver Figura 20), os dois modelos apresentam desempenhos muito similares conseguindo atingir os pontos máximos das séries de vazões observadas, embora o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko tende a superestimar as vazões nos picos.

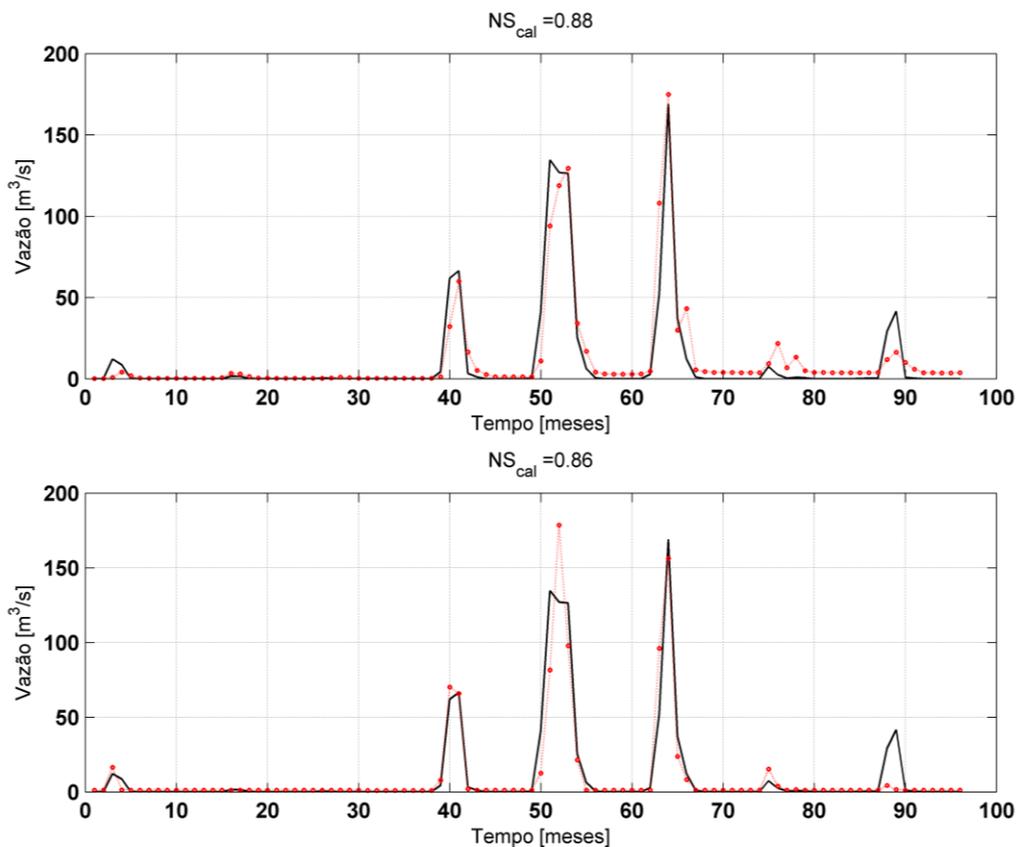


Figura 24. Posto fluviométrico 3595000 comparação dos hidrogramas obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada)

Na Figura 25 são apresentados os resultados da modelagem com os dois modelos conceituais no posto 3621000, os hidrogramas mostram resultados muito similares, com valores de Nash- Sutcliff acima de 0.8. Esse posto foi ressaltado devido a que nos picos, o modelo baseado nas Hipóteses de Budyko tende a superestimar as vazões, com diferenças entre a vazão simulada e a observada de até 80 m³/s. No entanto, nas vazões mínimas o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko apresenta um melhor ajuste.

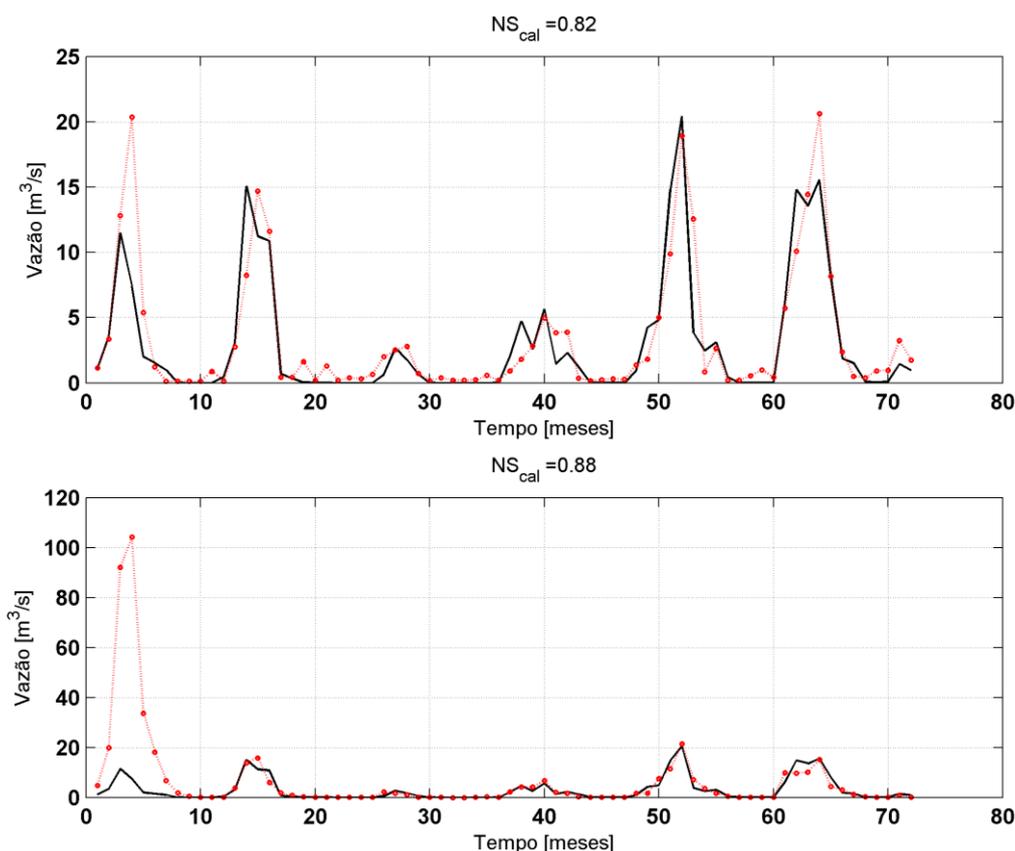


Figura 25. Posto fluviométrico 3621000 comparação dos hidrogramas obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada)

Na análise das vazões mínimas similarmente com o que foi feito na seção (5.1) foram produzidos gráficos para diferentes faixas da série da vazão simulada. A série foi dividida numa primeira faixa abaixo do percentil 33 das vazões observadas ($Q_{sim} < Q_{obs, 33}$), uma segunda faixa das vazões simuladas que estão entre o percentil 33 e o percentil 66 das vazões observadas ($Q_{obs, 33} < Q_{sim} < Q_{obs, 66}$), e uma ultima faixa para os valores acima do percentil 66 ($Q_{sim} > Q_{obs, 66}$). Os postos estudados nessa análise de faixas foram os postos fluviométricos 3595000 e o posto 3621000, com áreas de 2055,8 e 1755,9 km², períodos

de calibração de 96 e 72 meses, respectivamente. Como já foi falado anteriormente, só foram incluídas vazões diferentes de zero.

Na Figura 26, está sendo apresentada a primeira faixa de análise vazões simuladas no posto 3595000 abaixo da vazão observada do percentil 33, no caso desse posto, $Q_{obs,33} = 0.767 \text{ m}^3/\text{s}$. Observa-se, como o erro do modelo de Budyko tem uma variabilidade menor dentro dessa faixa, com erro variando entre $1.12 - 1.69 \text{ m}^3/\text{s}$, no entanto o erro com as vazões simuladas com o Modelo SMAP tem o grau de variabilidade maior, variando entre $-0.28 - 12.48 \text{ m}^3/\text{s}$. Sendo assim, pode ser afirmado que o modelo baseado nas hipóteses de Budyko apresenta um erro menor em comparação com o modelo SMAP, nessa faixa de análise.

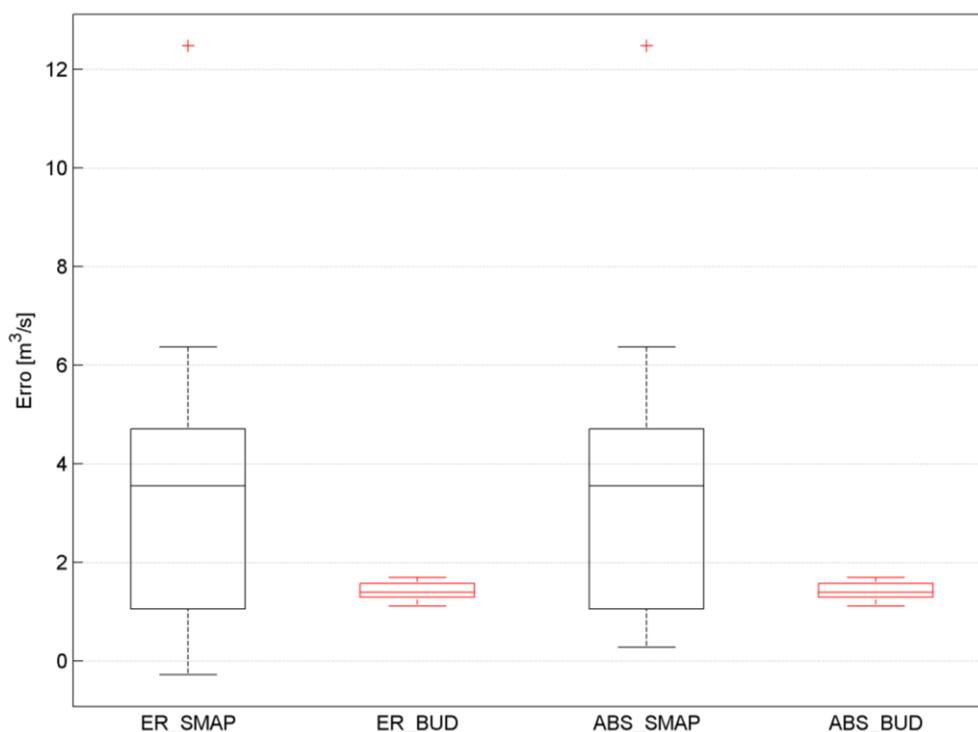


Figura 26. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões menores do que $Q_{obs,30}$. Posto 3595000. Localizado no Estado do Ceará.

Na segunda faixa de análise (Ver Figura 27) para o posto fluviométricos 3595000, definida pelas vazões simuladas pertencentes ao intervalo definido pelas vazões simulada maiores do que $Q_{obs,33} = 0.77 \text{ m}^3/\text{s}$ e menores do que o $Q_{obs,66} = 11.97 \text{ m}^3/\text{s}$. Observa-se como o

modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, apresentam um baixo grau de dispersão do erro, em comparação com o modelo SMAP. Com o modelo baseado nas hipóteses de Budyko o erro nessa faixa varia entre $-5.44 \text{ m}^3/\text{s}$ e $7.24 \text{ m}^3/\text{s}$ e com o modelo SMAP o erro atinge valores de até $31.16 \text{ m}^3/\text{s}$. Outra coisa que é importante ressaltar é que as linhas centrais das caixas não estão alinhadas, mostrando que existe uma diferença entre as medianas e uma tendência do modelo baseado a subestimar as vazões nessa faixa..

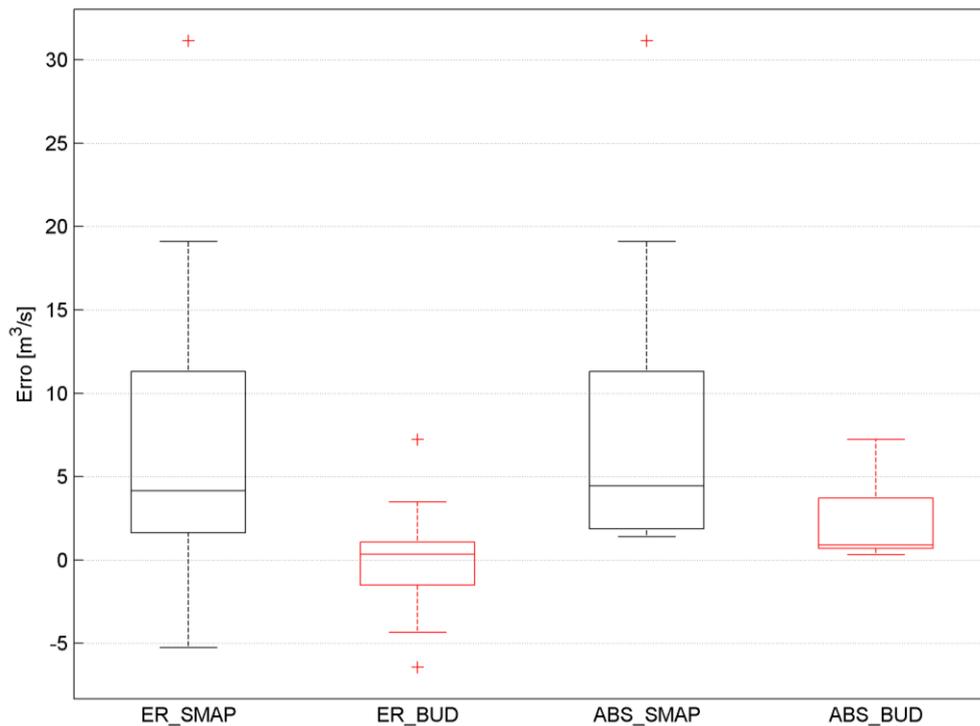


Figura 27. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,33}$, menores do que $Q_{obs,66}$. Posto 3595000 localizado no Estado do Ceará.

Na Figura 28 é apresentada a análise comparativa para a faixa pertencente aos valores simulados maiores do que $Q_{obs,66}$. No posto fluviométrico 3595000 o valor do percentil 66, $Q_{obs,66} = 11.97 \text{ m}^3/\text{s}$. Pode-se afirmar que o erro nessa faixa é quase similar para os dois modelos, devido a que a linhas centrais das caixas são quase coincidentes. O intervalo de variação do erro simples, para o modelo baseado nas hipóteses de Budyko, está entre $-53.85 \text{ m}^3/\text{s}$ até $52.29 \text{ m}^3/\text{s}$; no caso do modelo SMAP o erro varia entre $-40.77 \text{ m}^3/\text{s}$ até $55.64 \text{ m}^3/\text{s}$. Ao observar as caixas que relacionam o erro absoluto das simulações com esse

modelo, é evidente como o erro absoluto com a modelagem feita com o modelo de Budyko apresenta um grau de variabilidade maior, no entanto os intervalos de variação dos dois modelos são quase similares. No caso do modelo baseado nas hipóteses de Budyko, o grau de variabilidade está entre $0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ até $53.85 \text{ m}^3/\text{s}$, a para o Modelo SMAP o grau de variabilidade está entre $2.87 \text{ m}^3/\text{s}$ até $55.64 \text{ m}^3/\text{s}$.

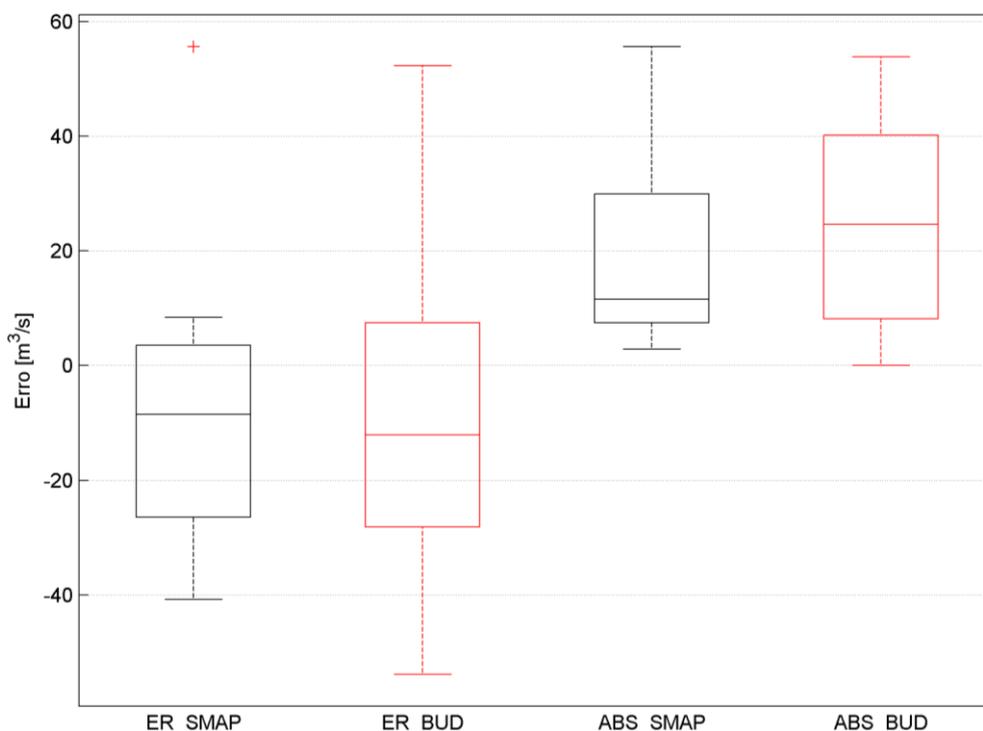


Figura 28. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,60}$. Posto 3595000 localizado no Estado do Ceará

Resumindo a análise feita, para o posto 3595000 o qual apresentou eficiências de Nash-Sutcliffe acima de 80% com os dois modelos conceituais que estão sendo analisados, pode ser afirmado que o desempenho dos dois modelos é parecido, já que os limites de variabilidade dos erro simples e do erro absoluto em cada umas das faixas analisadas apresentou valores muito próximos.

Na Figura 29, Figura 30 e Figura 31, são apresentados as análises das faixas para o posto pluviométrico 3621000, porque foi um posto que apresentou bons resultado na calibração

ao igual que o posto 3565000. No entanto, nas vazões máximas foi visto que as simulações feitas com o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko tende a superestimar os picos, embora nas vazões mínimas ele apresente um bom ajuste.

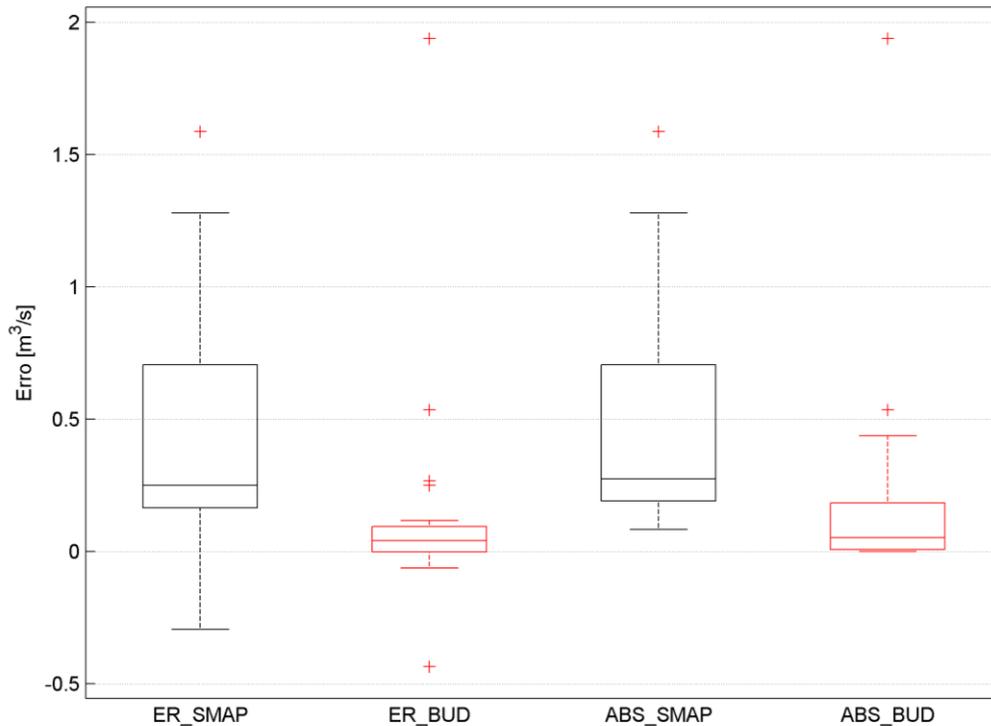


Figura 29. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões menores do que $Q_{obs,33} = 0.5051 \text{ m}^3/\text{s}$. Posto 3621000. Localizado no Estado do Ceará.

Na Figura 29, apresenta-se a análise comparativa de erro para as vazões menores do que $Q_{obs,33} = 0.5051 \text{ m}^3/\text{s}$ nessa figura o erro da função objetivo SMAP apresenta um grau de variabilidade maior quando é comparada com o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko. Com o modelo SMAP a variabilidade do erro das vazões simuladas varia entre $0.2-0.8 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo baseado nas hipóteses de Budyko a variabilidade está mais próxima de zero e apresenta uma variação pouca para grande maioria das vazões simuladas. Isto pode significar em termos do desempenho do modelo que para as vazões mínimas o modelo baseado nas hipóteses de Budyko nesse posto é muito mais preciso, e os erros produzidos nas simulações são quase do mesmo ordem de magnitude.

Na Figura 30 é apresentada a análise comparativa para a faixa pertencente aos valores simulados maiores do que $Q_{obs,30} = 0.50 \text{ m}^3/\text{s}$ menores do que $Q_{obs,60} = 2.72 \text{ m}^3/\text{s}$ pode-se afirmar que a mediana do erro nessa faixa é quase similar para os dois modelos. Embora o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, apresente um grau de variabilidade maior, e inclusive valores negativos. Ao observar às caixas obtidas, com o erro absoluto a série do erro absoluto construída está compreendida entre o intervalo $0.27 \text{ m}^3/\text{s}$ atingindo valores de até $31.59 \text{ m}^3/\text{s}$.

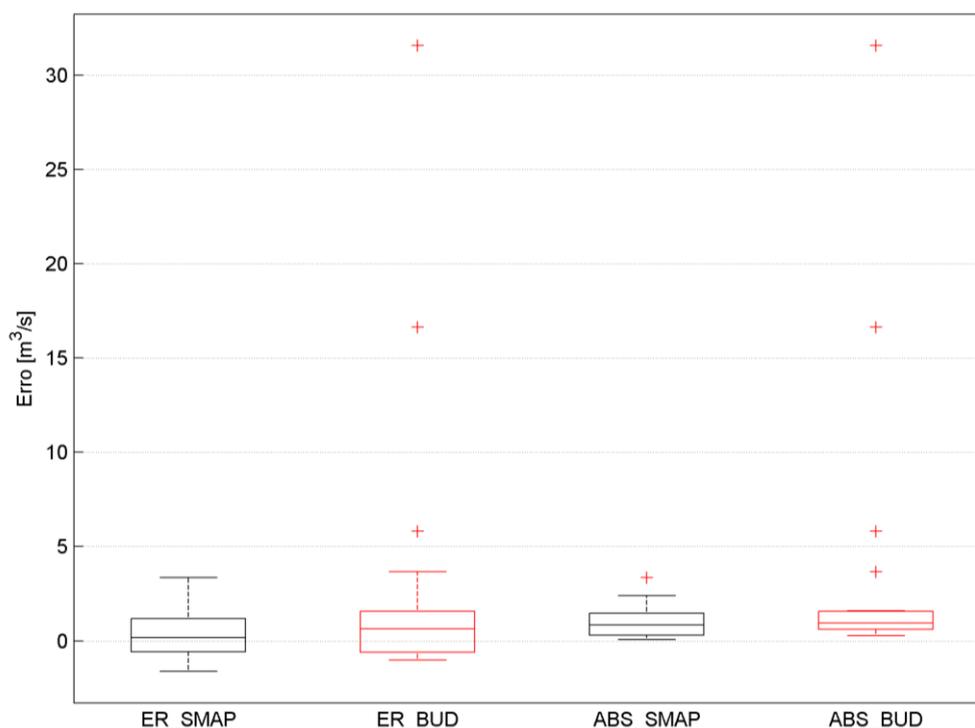


Figura 30. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,33}$ menores do que $Q_{obs,66}$. Posto 3621000 localizado no Estado do Ceará.

Na Figura 31, é apresentado à análise das vazões simuladas no posto 36210000 acima de $Q_{obs,66} = 2.72 \text{ m}^3/\text{s}$, As série de vazões simulada para o modelo baseado nas hipóteses de Budyko, variam entre $0.30 \text{ m}^3/\text{s}$ atingindo valores de até $96.78 \text{ m}^3/\text{s}$. No caso do modelo SMAP, essa faixa compreende valores que vão desde $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ até $12.93 \text{ m}^3/\text{s}$. Pode ser afirmado que nessa faixa o modelo SMAP apresenta um melhor desempenho, já que o valor máximo da vazão observada nesse intervalo é de $20.44 \text{ m}^3/\text{s}$

Resumindo essa análise das séries simuladas para o posto 3595000 e 3621000 localizados no estado do Ceará, com áreas de 2055.8 km² e 1755.9 km², e períodos de calibração de 96 meses e 72 meses, respectivamente, pode ser afirmado que o modelo baseado nas hipóteses de Budyko, para duas bacias localizadas no mesmo estado e com áreas do mesma ordem de magnitude e períodos de calibração embora consiga valores acima de 80% de eficiência na calibração não apresenta um desempenho similar para duas bacias em condições quase semelhantes.

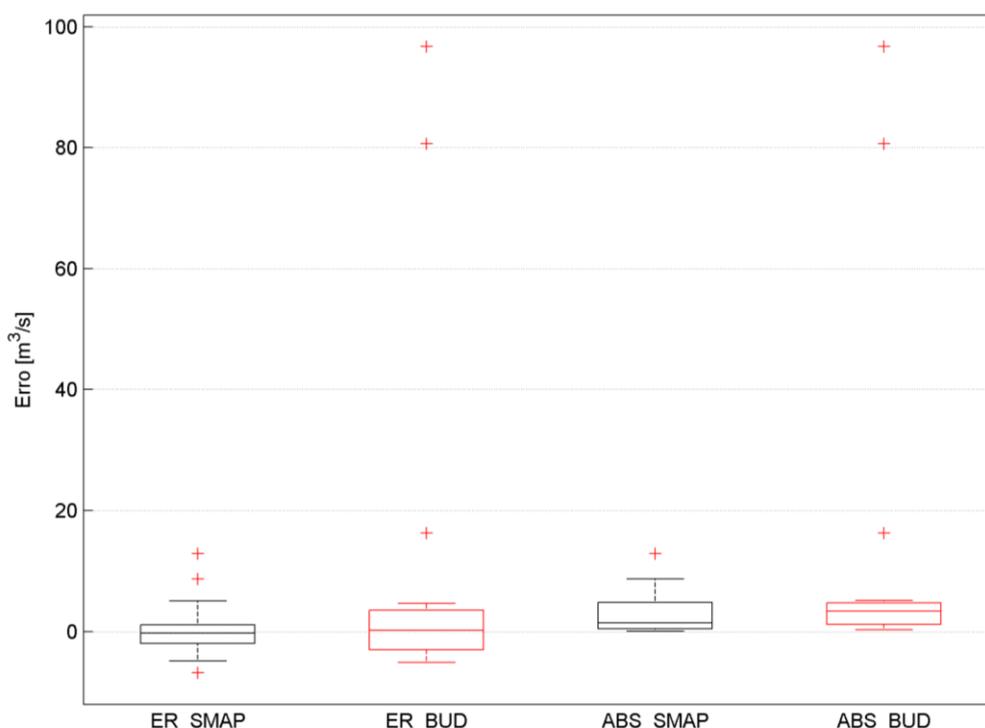


Figura 31. Análise comparativa de erro e erro absoluto das vazões simuladas com os modelos SMAP e o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, para as vazões maiores do que $Q_{obs,60}$. Posto 3576000 localizado no estado do Ceará

Seguindo um procedimento análogo de avaliação do desempenho das métricas ao longo dos postos fluviométricos, assim como foi feito na seção (5.1); foram construídos diagramas de caixas que mostrassem a variação das métricas nos quinze (15) postos fluviométricos, além da eficiência, as outras métricas utilizadas foram: o coeficiente de correlação de Pearson (CORR), BIAS e o erro quadrático médio (RSME). O resultado geral do comportamento dessas métricas nos quinze (15) postos fluviométricos estudados estado do Ceará está resumido na Figura 32 e Figura 33

Na Figura 32, são exibidos os diagramas de caixas correspondentes à variação das métricas coeficiente de Nash-Sutcliffe (N.S) e o coeficiente de correlação de Pearson (CORR), em termos gerais, os dois modelos apresentam um comportamento similar dessas métricas. A mediana das caixas que representam a variação do N.S estão deslocadas na vertical, sendo que a mediana do N.S obtida com o modelo SMAP está acima da mediana do modelo baseado nas hipóteses de Budyko, mostrando como a eficiência de calibração com esse indicador foi melhor para o modelo SMAP. Apesar desse aspecto, pode ser afirmado que os coeficientes N.S apresentam valores acima de 0.7, o qual significa que os dois modelos apresentam um bom desempenho, na escala mensal. No caso do coeficiente de correlação de Pearson (CORR) os dois modelos apresentam valores próximo de um (1), estando acima de 0.85, o qual pode significar que existe uma correlação linear significativa entre as vazões simuladas e as vazões observadas.

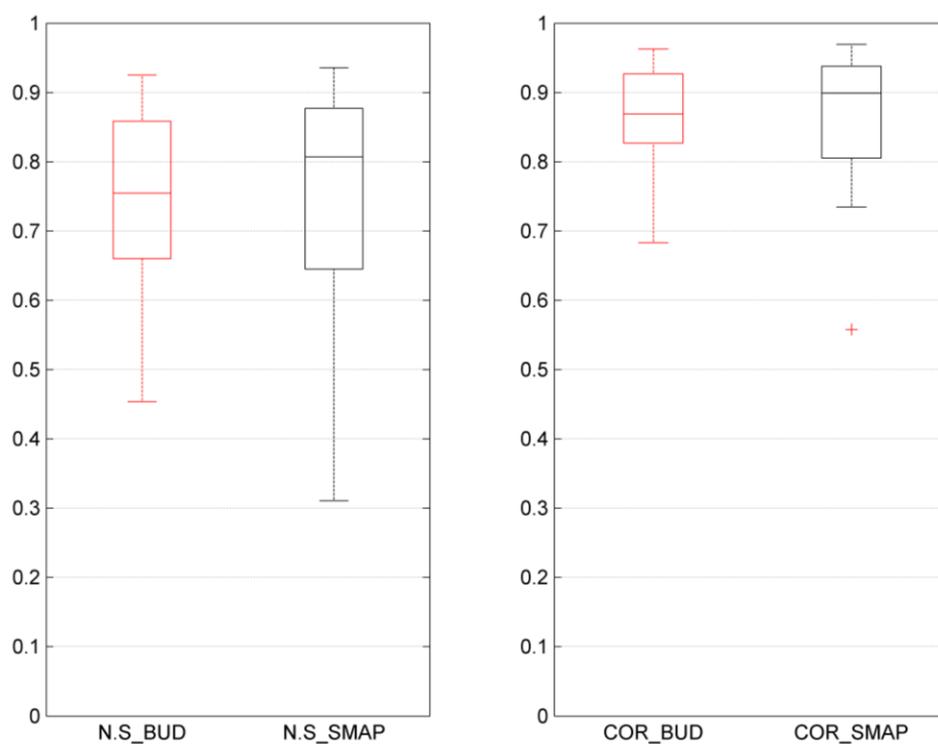


Figura 32. Análise dos comportamentos do Nash-Suttcliffe e da Correlação nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Baseado nas hipóteses de Budyko no Estado do Ceará

Na Figura 33, observa-se como a raiz do erro quadrático médio (RMSE), a variação dessa métrica com o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, apresenta um valor mínimo de 1.38 e máximo 28.32 no caso do modelo SMAP o valor mínimo obtido com o (RMSE) é de 1.67 e máximo de 24.56 (Ver Anexo 3 e Anexo 4). Sendo assim, pode ser afirmado que os dois modelos apresentam um grau de variabilidade muito semelhante, variando dentro da mesma ordem de magnitude. Além disso, pode ser ressaltada a localização das linhas centrais das caixas (medianas) estando quase alinhadas. Na Figura 33, também está sendo apresentado o comportamento do BIAS ao longo dos 15 postos fluviométricos estudados, observa-se como a variação do BIAS é maior nas simulações feitas com o modelo SMAP, variando de 0.01 até 5.19. O grau de variabilidade do BIAS ao longo dos 15 postos fluviométricos com o modelos baseado nas hipóteses de Budyko, varia desde -1.28 até 0.79, sendo assim pode-se afirmar que as vazões simuladas com o modelo de Budyko possuem um erro menor, na escala mensal nessa área.

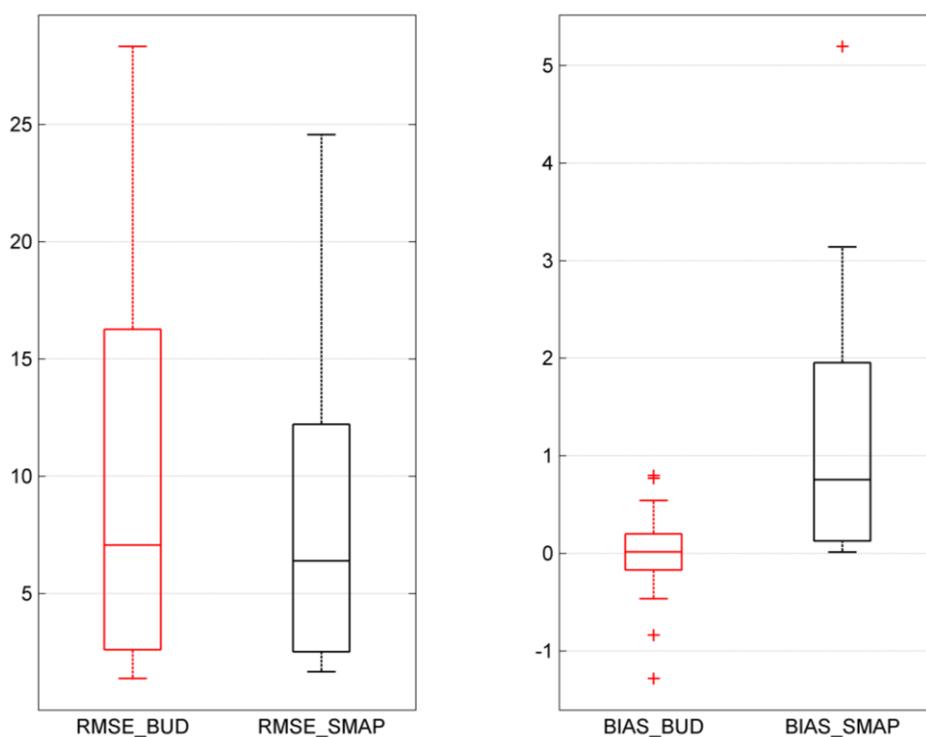


Figura 33. Análise dos comportamentos do RMSE e do BIAS nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Baseado nas hipóteses de Budyko no Estado do Ceará..

De acordo como o que foi feito na seção (5.2), fez-se uma análise estatística por meio de um Teste de Hipotese para avaliar se o desempenho do modelo baseado nas Hipóteses de

Budyko foi superior ao modelo SMAP na escala mensal, nos postos fluviométricos estudados no estado do Ceará. Calculou-se a diferença do coeficiente de Nash Sutcliff para cada posto como os dois modelos, é dizer, (Ver Anexo 9), sendo assim, tinha-se uma amostra de quinze valores, $n= 15$, e supondo que essa amostra se distribui normalmente, então a média das diferenças calculadas foi de $\bar{d}=0.01$, e o desvio padrão das diferenças $s_d = 0.16$. A hipótese nula (H_0) afirma que que a média das diferenças de eficiência de calibração é igual a zero ($\bar{d} = 0$), e a hipótese alternativa é de que o desempenho baseado nas hipóteses de Budyko é maior do que o do modelo SMAP, de forma que o teste estatístico ficou assim:

$$H_0 :$$

$$H_1 :$$

Utilizando a distribuição *t-student*, devido a que uma amostra com número de dados menor do que 30, e utilizando um nível de significância $\alpha = 0.05$, o valor de referencia para rejeitar o aceitar a hipótese nula, para uma amostra com $n=15$ de observações, seria igual $t_{\alpha/2, n-1}$, e assim a decisão a tomar seria como segue:

$$t \leq t_{\alpha/2, n-1} : \text{ Aceita-se } H_0$$

$$t > t_{\alpha/2, n-1} : \text{ Rejeita-se } H_0$$

em que $t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}}$. Substituindo-se os valores de \bar{d} e s_d definidos anteriormente,

obtem-se que $t = 0.15$, de forma que não é possível rejeitar a hipótese nula de que o desempenho dos dois modelos são iguais na região.

5.3 MODELAGEM CONCEITUAL DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA ESCALA DIÁRIA APLICADO AO ESTADO DO CEARÁ.

O modelo SMAP e o modelo baseado nas hipóteses de Budyko em suas versões de passo diário foram ajustados aos 15 postos fluviométricos do estado do Ceará, apresentados na Tabela 5, seção 4.2.2, do presente documento. Os dois modelos foram calibrados esses postos fluviométricos, tendo sido empregado o algoritmo de busca direto denominado

Simplex (Nelder & Mead, 1965) para maximizar a eficiência de Nash-Sutcliff para as vazões e de maneira análoga a modelagem no passo mensal, foram testadas varias métricas que permitissem entender o comportamento do modelo ao longo dos postos fluviométricos.

A quantidade de parâmetros do modelo baseado nas hipóteses de Budyko mudou já que foi inserido um reservatório linear, similar ao que está contido na estrutura do modelo conceitual do SMAP, para propagação do fluxo na rede de canais. No total foram calibrados cinco (5) parâmetros, um a mais do que contém o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko para a simulação mensal, além das condições iniciais dos reservatórios. Seguindo um procedimento similar à modelagem que foi feita na escala mensal para o Ceará, o modelo foi calibrado para os quinze postos fluviométricos. (Ver Figura 36)

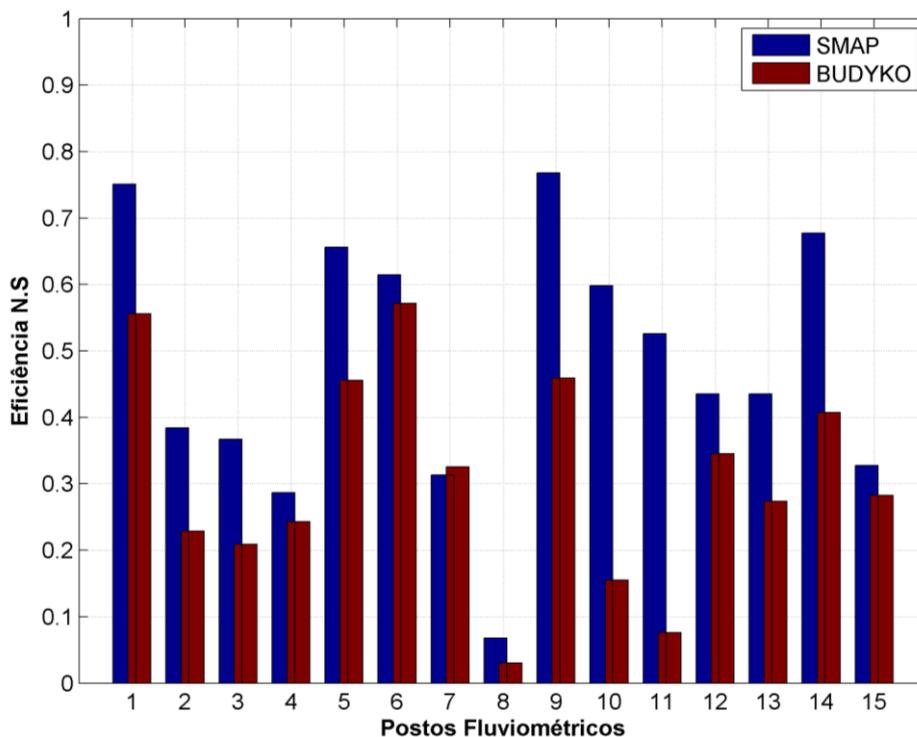


Figura 34. Eficiência na calibração com o Algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) para o índice Nash-Sutcliff para as vazões. Postos fluviométricos localizados no Estado do Ceará.

Na Figura 36, observa-se como as eficiências do Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko são menores do que o Modelo SMAP na escala diária, em quase todos os postos fluviométricos, só com exceção do posto 3604500 (posto 7), o qual apresenta uma

eficiência de calibração superior com o modelo SMAP, sendo que o coeficiente de Nash Sutcliffe (N.S) obtido com o SMAP foi de 0.31 e com o modelo baseado nas hipóteses de Budyko foi de 0.32, porem não representa uma diferença muito significativa. O posto fluviométrico 3595000 (posto 6), apresentou eficiências de calibração com os dois modelos acima de 0.5, tal como se observa na Figura 37, na qual são apresentados os hidrogramas obtidos com a modelagem do Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko e com o modelo conceitual SMAP.

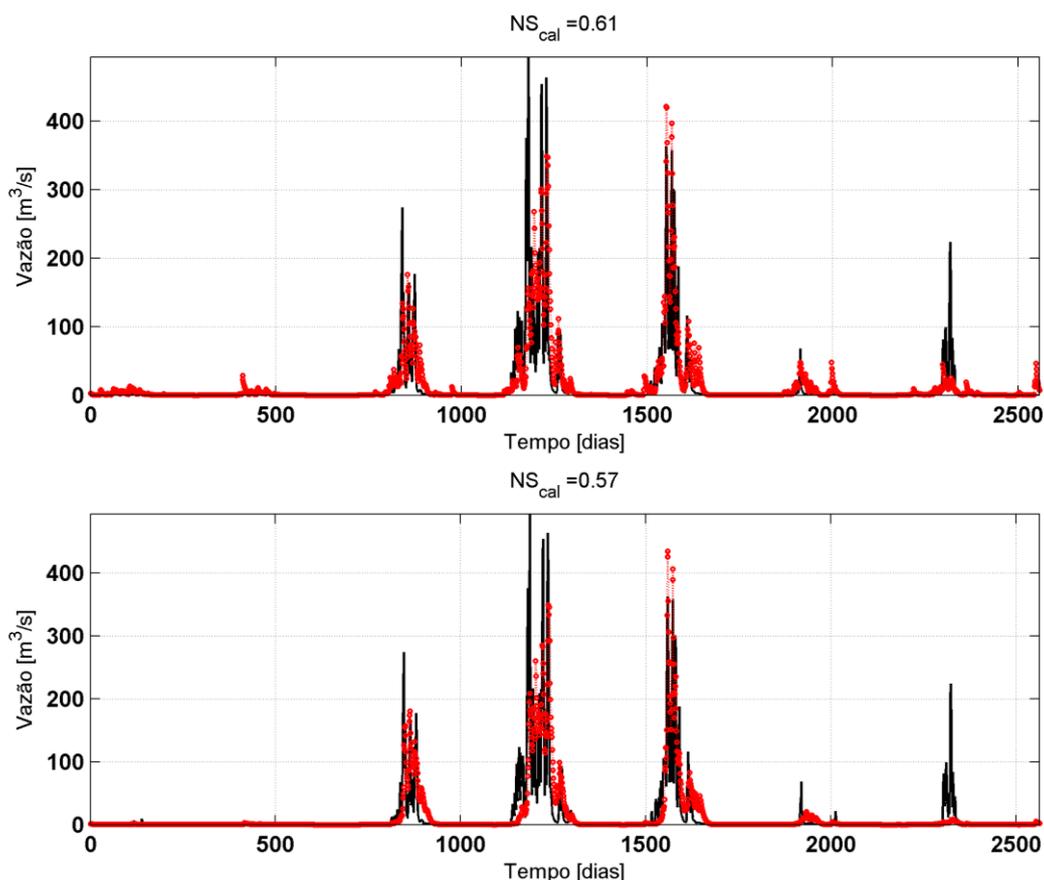


Figura 35. Posto fluviométrico 35950000 comparação dos hidrograma obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo).

Ficou claro que o desempenho obtido com o modelo baseado nas hipóteses de Budyko, na escala diária para o estado do Ceará foi inferior ao obtido com o modelo SMAP. A fim de entender um pouco melhor as diferenças entre os dois modelo, decidiu-se realizar a calibração empregando uma função objetivo que leva em consideração apenas os valores máximos de vazão em cada ano. Os resultados não são apresentados aqui, mas observou-se

que o modelo baseado em Budyko passou a apresentar desempenho mais próximo daquele obtido com o modelo SMAP. Esses resultados foram vistos como indícios de que a estratégia de modelar a geração de escoamento superficial com base nas hipóteses de Budyko poderia ser tão eficiente quanto ou até mesmo mais eficiente do que o método baseado no SCS, empregado pelo modelo SMAP.

A fim de avaliar tal hipótese, decidiu-se reescrever o código computacional do modelo SMAP, alterando a parte referente à geração de escoamento superficial, substituindo-a pela estratégia empregada pelo modelo baseado nas hipóteses de Budyko. Deu-se o nome a este modelo de Modelo Híbrido (HIBI). O modelo HIBI é exatamente igual ao modelo SMAP, com exceção da geração do escoamento superficial. O número de parâmetros é o mesmo, já que o modelo SMAP utiliza dois parâmetros para a geração do escoamento superficial, as abstrações iniciais (A_i) e a capacidade de saturação do solo (SAT), enquanto que a estratégia empregada pelo modelo baseado nas hipóteses de Budyko emprega os parâmetros S_{max} , que representa a capacidade de armazenamento da camada superficial do solo, e o parâmetro α_1 .

A Figura 36 apresenta uma comparação dos valores de eficiência de Nash-Sutcliffe obtidos no processo de calibração dos modelos SMAP e Híbrido (HIBI) no postos fluviométricos estudados na região de estudo localizada no Ceará.

Observa-se na Figura 36 que o desempenho do Modelo Híbrido (HIBI) foi melhor do que o desempenho do modelo SMAP em todos os postos fluviométricos, com exceção de dois postos onde a diferença foi quase mínima, o posto 36125000 o qual teve uma diferença nas eficiências de -0.09% e o posto 36470000 com uma diferença de 0.92%, podendo-se afirmar que houve empate entre os dois modelos. Em quase 67% dos postos, a diferença observada de desempenho foi menor do que 2%, enquanto que a máxima diferença observada foi de 24.65% para o posto 36045000 (posto7). De todo modo, pode-se afirmar que a estratégia de modelar a geração de escoamento superficial com base nas hipóteses de Budyko, pelo menos em bacias hidrográficas com comportamento semelhante ao

encontrado no semiárido cearense, é pelo menos tão eficiente quanto a tradicional e mundialmente difundida método do SCS.

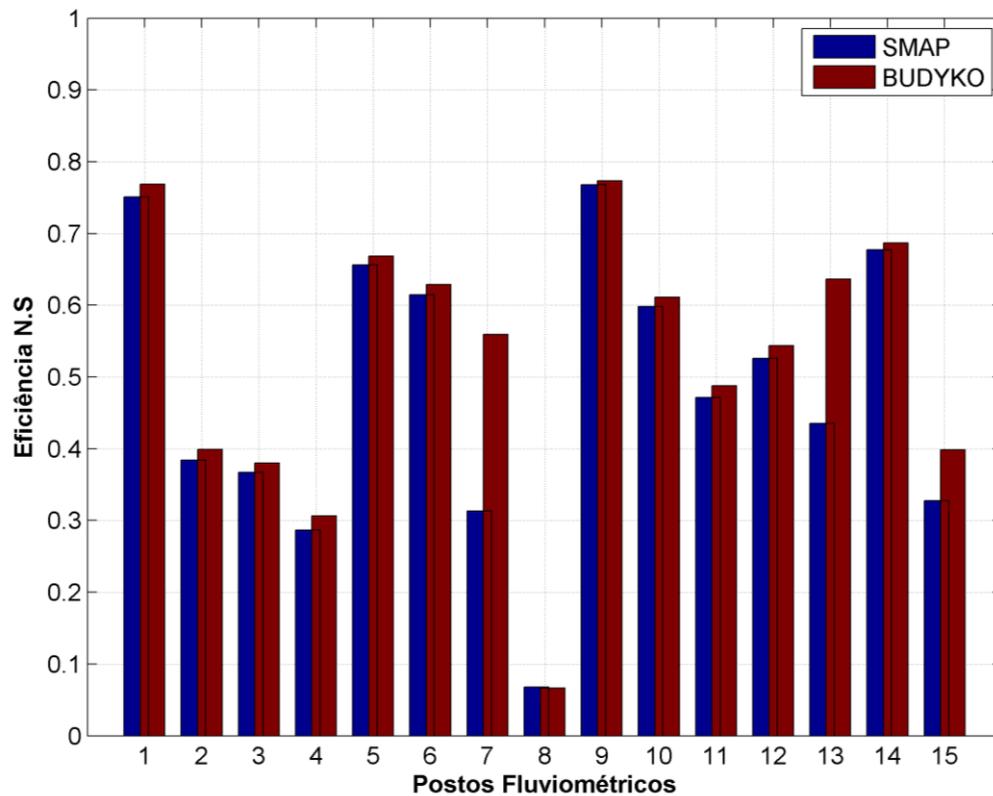


Figura 36. . Comparação dos valores de eficiência de Nash-Sutcliff obtidos no estudo de calibração dos modelos SMAP e o modelo híbrido (HIBI), na escala diária, para os postos fluviométricos localizados na região estado do Ceará.

Evidencia-se que as eficiências de Nash-Sutcliff são maiores apresentam na média uma eficiência de calibração de 52.76% para o modelo híbrido (HIBI) em comparação com o modelo SMAP que apresenta uma eficiência de calibração média de 48.28%.

A seguir vão ser expostos os hidrogramas obtidos na escala diária para 3595000 (posto 6) e o posto 36210000 (posto 10), os quais apresentaram bons resultados na modelagem feita para escala mensal no estado do Ceará . Na Figura 37 está sendo apresentados os resultados obtidos a modelagem com o modelo híbrido conceitual (HIBI) e com o modelo conceitual SMAP, na escala diária.

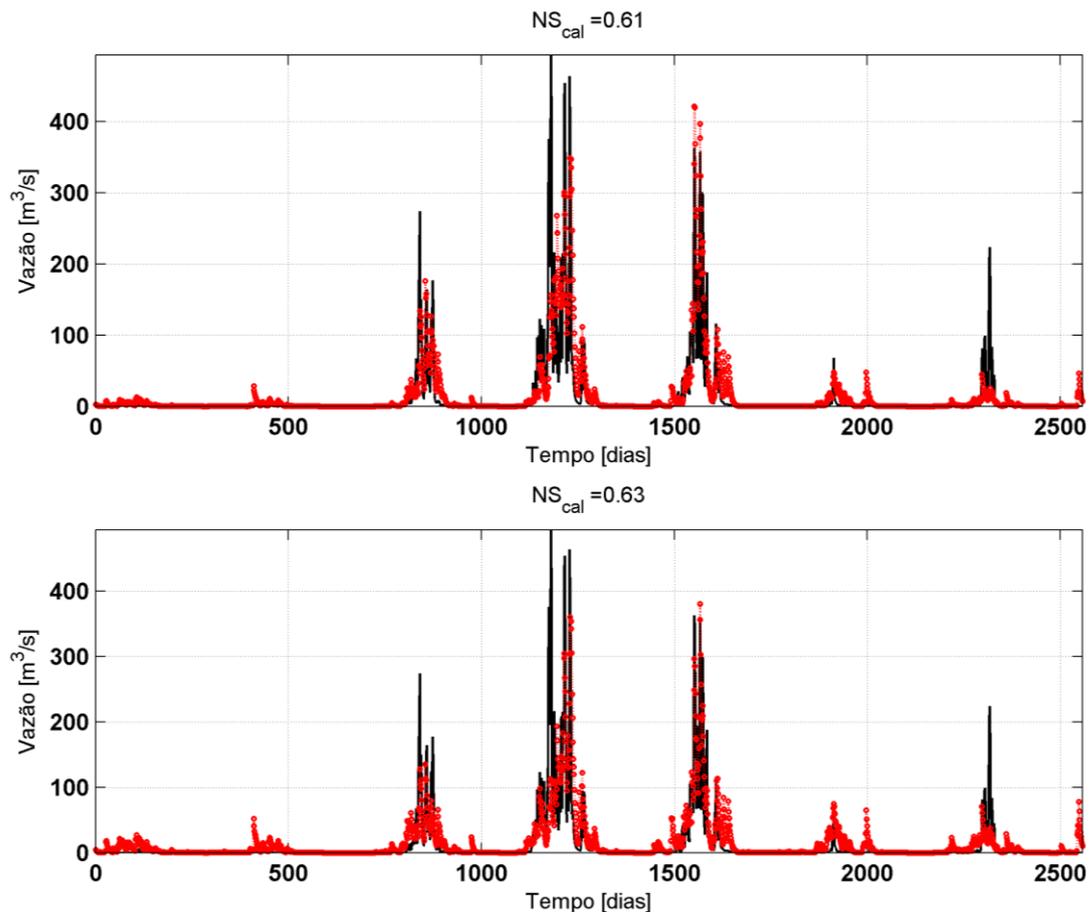


Figura 37. Posto fluviométrico 35950000 comparação dos hidrograma obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada)

A forma dos hidrograma apresentados na Figura 37, mostram que o desempenho dos dois modelos conceituais é quase similar nos dois postos fluviométricos. Em alguns picos dos hidrograma os dois modelos superestimam e em outros subestimam o valor da vazão. Ao realizar uma inspeção visual dos hidrograma simulados pelos dois modelos, na maioria das vezes, apesar das diferenças numéricas observadas na eficiência de Nash-Sutcliffe, não se observaram diferenças significativas nas séries de vazão, como pode ser observado no Anexo 7 e na Figura 37, que apresenta as séries simuladas pelos dois modelos, assim como a série observada na estação 35950000 (posto 6). Na Figura 38, são apresentados os hidrogramas para o posto fluviométrico 36210000 (posto 10)

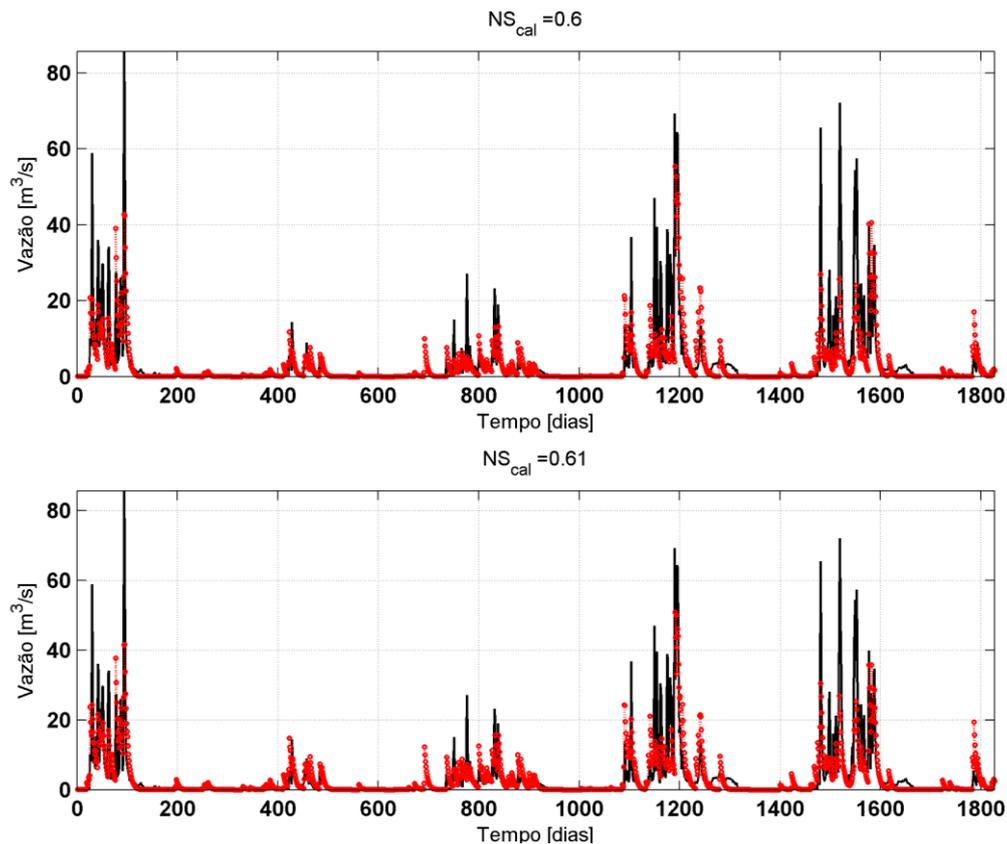


Figura 38. Posto fluviométrico 36210000 comparação dos hidrograma obtidos com os modelos conceituais: SMAP (acima) e o Modelo Conceitual baseado nas hipóteses de Budyko (embaixo). Vazão Observada (linha preta) e Vazão simulada (linha pontilhada)

O posto 36210000 apresentado na Figura 38, caracteriza-se por apresentar indicadores de eficiências acima de 80% do Nash Suttcliff quando foram desenvolvidas simulações na escala mensal (seção 5.2). Vale a pena ressaltar esse posto, já que de acordo ao que foi relatado na simulação mensal feita com o modelo baseado nas hipóteses de Budyko, esse modelo tende a superestimar a vazão nos picos, Observa-se na mesma figura, como houve uma melhora das séries simuladas, sendo que o modelo HIBI, tem um desempenho quase similar com o Modelo Conceitual SMAP.

Analogamente, foi feita uma análise do comportamento das outras métricas que foram exploradas com o Algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) que foram testadas é dizer, a correlação (CORR), BIAS e o erro quadrático médio (RSME) nessa modelagem na escala

diária ao longo dos 15 postos fluviométricos localizados no Estado do Ceará, está resumido na Figura 39 e Figura 40.

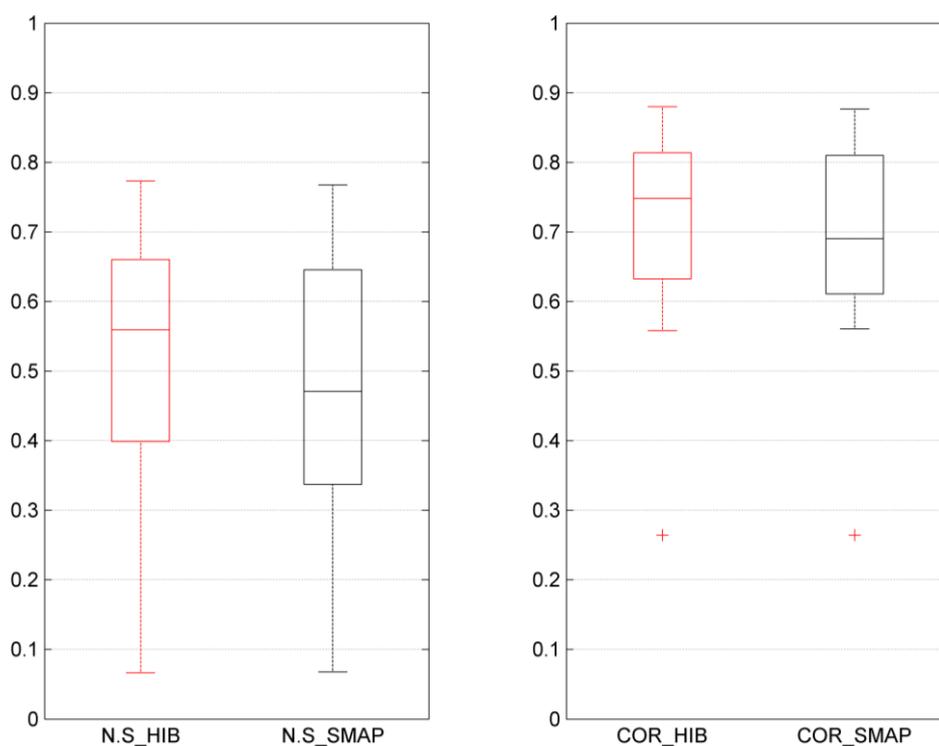


Figura 39. Análise dos comportamentos do Nash-Suttcliffe e da Correlação nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Híbrido (HIBI) no estado do Ceará.

Na Figura 39, observa-se nos diagramas de caixas da métrica Nash-Sutcliff como a eficiência obtida com esse índice com o modelo híbrido apresenta um grau de dispersão menor em comparação com o modelo SMAP. No caso do modelo (HIBI), tem-se que a variação do coeficiente Nash-Sutcliff vai desde 0.07 até 0.77, no caso do modelo SMAP a variação está entre 0.06 até 0.77, sendo assim pode ser afirmado que o comportamento com essa métrica é muito similar. Além disso, a linha central do diagrama de caixa que representa o modelo híbrido está localizada acima de 0.5, e no caso do modelo SMAP está localizada aproximadamente em 0.45. Sendo assim, pode ser afirmado que o modelo híbrido (HIBI) apresenta melhores eficiências de calibração com Nash-Suttcliff, aspecto já tinha sido ressaltado ao observar o diagrama de eficiências apresentado na Figura 36.

No caso do coeficiente de correlação (Ver Figura 39), tem-se uma mediana de 0.7481 para o modelo híbrido (HIBI) e no caso do modelo SMAP de 0.71, sendo assim pode ser afirmado que os dois modelos apresentam um grau de correlação quase similar quando são comparados com as vazões observadas, ao longo dos quinze (15) postos fluviométricos. Na Figura 40 apresenta-se a variação de outras métricas, tais como a raiz quadrada do erro médio RMSE e o BIAS; para o modelo híbrido conceitual (HIBI) e para o modelo SMAP.

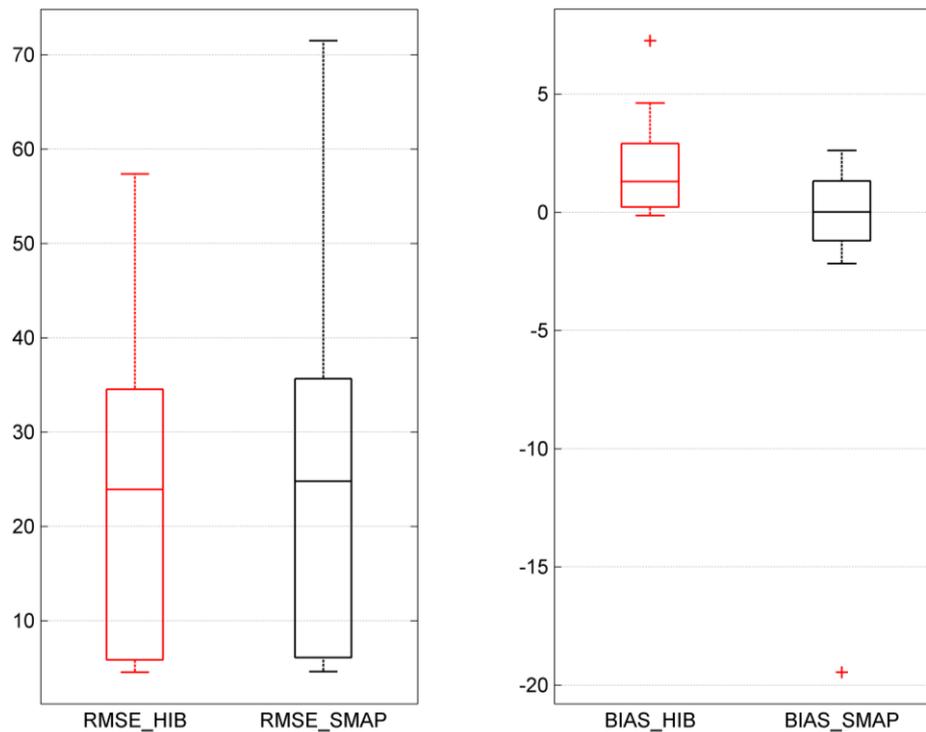


Figura 40. Análise dos comportamentos do RMSE e do BIAS nas simulações feitas com o Modelo SMAP e o Modelo Baseado nas hipóteses de Budyko na escala diária. Aplicado ao Estado do Ceará.

Ao observar a Figura 40, observa-se como a raiz do erro quadrático médio tem uma maior dispersão nas simulações feitas com o modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, embora as linhas centrais das duas caixas de Diagramas de Caixas estejam quase alinhadas, o qual quer dizer que o erro dos dois modelos com respeito às vazões observadas é quase similar, esse fato está confirmado com a média obtida com o modelo Híbrido = 23.12 em comparação com a média obtida com o modelo SMAP, =24.50, sendo que a segunda média é maior, verificando o fato que o erro

obtido nas simulações com o modelo híbrido apresentaram um melhor ajuste aos dados observados ao longo dos postos fluviométricos.

No caso do BIAS (Ver Figura 40), os dois modelos, apresentam um desempenho quase similar, o modelo híbrido (HIBI) apresenta valores acima de 0 em todos os postos fluviométricos, com uma média de $\bar{BIAS}_{HIBI} = 1.84$, e o modelo SMAP apresenta valores negativos em vários postos, sendo que a média do BIAS com esse modelo fica $\bar{BIAS}_{SMAP} = -1.12$. O posto que apresentou o menor valor de BIAS foi o posto 3629000 (posto 13), o qual possui uma área de 12680 km^2 , é um número de dias de calibração similar a outros postos de calibração que apresentaram BIAS acima de zero. (Ver Anexo 7)

Com a finalidade de avaliar se o desempenho do modelo híbrido (HIBI) apresentado é estatisticamente superior ao modelo SMAP na escala diária nos postos fluviométricos estudados no estado do Ceará, foi realizado um Teste de Hipóteses supondo que a eficiência de calibração para cada posto no Ceará é igual nos dois modelos. Calculou-se a diferença do coeficiente de Nash Sutcliff para cada posto como os dois modelos

(Ver Anexo 10). Com uma amostra formada por quinze valores, $n = 15$, e supondo que essa amostra se distribui normalmente, então a média das diferenças calculadas foi de $\bar{D} = 0.04$, e o desvio padrão das diferenças $\sigma_D = 0.07$. A hipótese nula (H_0) considera que a média das diferenças de eficiência de calibração é igual a zero ($\bar{D} = 0$), enquanto a hipótese alternativa declara que o desempenho do modelo híbrido é maior do que o do modelo SMAP, de forma que o teste estatístico ficou assim:

H_0 :

H_1 :

Utilizando a distribuição *t-student*, devido a que uma amostra com número de dados menor do que 30, e utilizando um nível de significância $\alpha = 0.05$, o valor de referencia para rejeitar o aceitar a hipótese, para uma amostra com $n=15$ de observações, seria igual $t_{\alpha/2, n-1}$, e assim a decisão a tomar seria como segue:

: Aceita-se H_0

: Rejeita-se H_0

Onde _____, ao substituir os valores de e definidos anteriormente, obtém-

se que _____, ou seja há evidências suficiente para rejeitar a hipótese H_0 , podendo-se afirmar que o desempenho do modelo híbrido é estatisticamente superior ao do modelo SMAP. Assim como alertado no caso da avaliação a nível mensal, as diferenças de desempenho observadas é relativamente pequena, apesar de ser estatisticamente significativa. Do ponto de vista prático, devido às pequenas diferenças de desempenho, ambos os modelos são capazes de modelar as vazões diárias no estado do Ceará.

Em conclusão, com o observado nessa seção, é válido afirmar que o modelo híbrido (HIBI), proposto em este estudo apresenta bons resultados, quando é comparado com outros modelos conceituais aplicados na região do Ceará, como é o caso do Modelo SMAP. Foram inspecionados as formas do hidrogramas produzidos e o comportamento de diversas métricas que permitem avaliar a acurácia das simulações feitas. Embora exista uma superioridades do modelo HIBI, em comparação com o SMAP essa diferença não é muito significativa, sendo que nos quase 67% dos postos analisados, da ordem de 1%, Na avaliação das métricas que foram exploradas (CORR, RMSE e BIAS) junto como o indicador de eficiência Nash-Sutcliff, o modelo híbrido (HIBI) apresenta bons resultados, sendo superior especialmente em aspectos como a variabilidade dessas métricas ao longo dos quinze (15) postos fluviométricos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesse trabalho foi realizada uma modelagem de processos hidrológicos por meio da implementação de um modelo baseado nas hipóteses de Budyko, nas escalas mensal e diária, que foram aplicados em duas regiões diferentes do Brasil, uma com 25 postos fluviométricos localizados no Distrito Federal e Entorno, e uma segunda que contempla 15 postos fluviométricos localizados no Estado do Ceará.

A finalidade do presente trabalho foi avaliar a aplicabilidade de um modelo conceitual do tipo chuva-vazão baseado nas hipóteses de Budyko. Esse modelo foi inicialmente aplicado, a nível mensal, a bacias Australianas, com áreas compreendidas entre 50 e 2000 km², as quais pertenciam a diferentes regiões climáticas, tendo a metodologia sido descrita por Zhang et al. (2008). O trabalho Zhang et al. (2008) pode ser resumido como uma teoria inovadora, que resgata parte do trabalho proposto por Budyko na década dos anos 50's para bacias europeias, em estudos de longo prazo, trazendo modificações importantes que permitem o desenvolvimento de modelos hidrológicos que possam ser aplicados em escalas temporais menores, ou seja, mensal e diária.

O objetivo principal das simulações feitas foi avaliar o modelo conceitual proposto por Zhang et al. (2008) na modelagem diária e mensal da geração do escoamento superficial e consequentemente na simulação de vazões nas escalas mensal e diária, em dois diferentes locais do Brasil com características distintas. Para dar subsídio a essa análise, o desempenho do modelo foi comparado com o desempenho do modelo hidrológico SMAP, que tem sido amplamente empregado no Brasil.

Na escala mensal, os resultados mostraram, de uma forma geral, que o desempenho do modelo baseado nas hipóteses de Budyko foi similar ao desempenho do modelo SMAP, embora tenham sido observadas diferenças de desempenho nas duas regiões. No postos localizados na região do DF e entorno, observou-se um desempenho melhor do modelo SMAP em praticamente todos os 23 postos fluviométricos utilizados, entretanto, as diferenças foram relativamente pequenas. A diferença média em termos do coeficiente de

Nash-Sutcliff foi de 0,06 ($NS_{BUD} = 0,64$ e $NS_{SMAP} = 0,70$), tendo sido verificado que os hidrogramas simulados pelos dois modelos são bastante similares. A realização de um teste de hipóteses formal mostrou que o desempenho do modelo SMAP na região foi estatisticamente superior ao do modelo baseado nas hipóteses de Budyko para um nível de significância de 5%. Apesar de estatisticamente superior, as diferenças, em termos do coeficiente de Nash-Sutcliff são relativamente pequenas, o que indica que do ponto de vista prático, os modelos possuem desempenho semelhante. Os resultados para o estado do Ceará mostram que o modelo baseado nas hipóteses de Budyko possui desempenho tão bom quanto o do modelo SMAP. A diferença média em termos do coeficiente de Nash-Sutcliff foi de apenas 0,01 ($NS_{BUD} = 0,75$ e $NS_{SMAP} = 0,74$). Um teste formal de hipóteses concluiu que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de que o modelo baseado nas hipóteses de Budyko possui desempenho igual ao do modelo SMAP.

Os resultados na escala diária foram obtidos apenas para os postos fluviométricos localizados no estado do Ceará. Ficou claro que o desempenho do modelo SMAP foi bastante superior ao do modelo baseado nas hipóteses de Budyko. Entretanto, quando os modelos foram calibrados empregando uma função objetivo que foca nos máximos valores anuais de vazão, o desempenho dos dois modelos foram mais próximos. Esse resultado foi visto como um indício de que a estratégia de modelagem do escoamento superficial, adotada pelo modelo baseado nas hipóteses de Budyko, poderia ser tão ou mais eficiente do que o modelo baseado no popular e mundialmente utilizado método do SCS. Para verificar essa hipótese, decidiu-se fazer uma modificação no código do modelo SMAP, alterando exatamente a maneira pela qual o escoamento superficial é calculado, introduzindo a estratégia de Budyko. Esse novo modelo foi chamado de modelo híbrido. Os resultados mostraram que o desempenho do modelo híbrido foi superior ao do modelo SMAP em todos os postos fluviométricos do estado do Ceará, embora a diferença observada tenha sido pequena. Por exemplo, em 2/3 dos postos estudados, a diferença foi de aproximadamente 2%. A diferença média de desempenho entre os dois modelos, em termos do coeficiente de Nash-Sutcliff foi de 0,04. Um teste de hipóteses foi realizado e concluiu-se que o desempenho do modelo híbrido era estatisticamente superior ao desempenho do modelo SMAP. Apesar da significância estatística, do ponto de vista prático, a diferença de desempenho foi apenas marginal. De todo modo, foi possível mostrar que a estratégia de modelagem de escoamento superficial na modelagem diária,

baseada nas hipóteses de Budyko, é tão ou mais eficiente do que a tradicional e mundialmente empregada metodologia do SCS.

Tanto na escala mensal, quanto na diária, verificou-se uma diferença significativa de desempenho do modelo baseado nas hipóteses de Budyko para os diferentes postos fluviométricos empregados no estudo. Como recomendação ao trabalho futuro, é necessário fazer uma análise de longo prazo das áreas de estudo com a finalidade de confirmar as conexões que possam existir entre características climatológicas das bacias e a dinâmica do balanço hídrico em escalas mensais e diárias. Além disso, é importante verificar se existe alguma relação dos parâmetros do modelo proposto por Zhang *et al.* (2008) com aspectos morfológicos e climáticos das bacias, tais como tipo de uso e coberturas do solo, vegetação, intensidade das chuvas, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandre, A. M. B., Martins, E. S., Clarke, R. T., & Reis Jr, D. S. (2005). Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos. Anais do XVI Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos.
- Araújo, Neto, J. R. De; Palácio, H. A. De Q.; De Andrade, E. M.; Dos Santos, J. C. N.; Pinheiro, E. A. R. (2012). "Otimização do Número de Curva (CN-SCS) Para Diferentes Manejos Na Região Semiárida, Ceará, Brasil" Irriga, Botucatu, Edição Especial, p. 264 – 279
- Arora, V. K. (2002). "The use of aridity index to access climate range effect on annual runoff". Journal of Hydrology, 265, 164-177.
- Barry, R. G (2008). "Mountain, Weather and Climate". Third Edition. Cambridge University Press. 532 pp. New York.
- Block, P. J.; Souza Filho F. A.; Sun, L.; Kwon H. H. (2009). "A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models". Journal of the American Water Resources Association. Vol 45, N 4, 828-843.
- Budyko M. (1974), Climate and Life, Translate from the Russian by D.H. Miller, San Diego. California. pp 330-350.
- Cabus, P. (2008). "River flow prediction through rainfall-runoff modeling with probability-distributed model". Agricultural Water Management, 95,859-868.
- Caponi G. R.; da Silva B. C.; Santos A. H.; (2011). "Calibração automática de um modelo chuva-vazao mensal por algoritmos genéticos". XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18p.
- Carrillo, O. J. B. (2007). "Algoritmo híbrido para avaliação da integridade estrutural: uma abordagem heurística". Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 152 pp
- Castanharo, G. et al., (2007). "Previsão de vazões na bacia do Rio Iguaçu, baseada no Modelo SMAP e com a incorporação de informações de precipitação". RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 12, n 3, 57-68.
- Chow, V. T.; Maidment D. R.; Mays L. W. (1988). "Applied Hydrology". McGraw-Hill.
- Collischon, W.; Tucci C. E. M.; (2003). "Ajuste multiobjectivo dos parâmetros de um modelo hidrológico." RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol 8, nº3, 5-15.
- Cuartas L. A (2008). " Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma micro-bacia em floresta não perturbada na Amazônia Central." Tese de Doutorado.

Programa de Pós-graduação em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Sao Jose dos Campos, SP, 236p.

- Da Silva P. H.; Júnior, E. L. (2004). "Metodologia para seleção de pontos de Monitoramento de Pressão na calibração de redes hidráulicas". IV SEREA-Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água João Pessoa (Brasil).
- Damé, R. C. F.; Teixeira, C. F. A.; Terra V. S. S. e Rosskoff J. L. C. (2009). "Hidrograma de projeto em função da metodologia utilizada na obtenção da precipitação". Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 14, 46-54.
- de Groen, M. M. (2002). "Modelling Interception and Transpiration at Monthly Time Steps: Introducing Daily Variability Thourgh Markov Chains". Swets and Zeitlinger, Lisse, Netherlands.
- de Groen, M. M., and H. H. G. Savenije (2006). "A monthly interception equation based on the statistical characteristics of daily rainfall" Water Resources. Research., 42, 10p.
- Devore, J. (2004). Probability and statistics for engineers and scientists. California.
- Donohue, R. J.; Roderick, M. L.; Vicar, T. R. (2009). "Can dynamic vegetation information improve the accuracy of Budyko's Hydrological Model?". Journal of Hydrology, 390, 23-34.
- Donohue, R. J.; Roderick, M. L.; Vicar, T. R. (2011). "Assessing the differences in sensitivities of runoff to changes in climatic conditions across a large basin". Journal of Hydrology, 406, 234-244.
- Dooge, J. C. I.; Bruen, M.; Parmentier, B. (1999). "A simple model for estimating the sensitivity of runoff to long-term changes in precipitation without changes in precipitation without a change in vegetation". Advances in Water Ressources, 23, 153-163.
- Eli, R. N.; Lamont, S. J. (2010). "Curve numbers and urban runoff modeling – Aplications and Limitations". Low impact development 2010, 405-418.
- Ferket, B. V. A.; Samain, B.; Pauwels, V. R. N. (2010). "Internal validation of conceptual rainfall-runoff models using baseflow separation" Journal of Hydrology.381, 158-173.
- Folhes, M. T (2007). "Modelagem da Evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos." Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São Jose dos Campos, SP, 186p.

- Gerrits, A. M. J.; H. H. G. Savenije, E. J. M.; Veling, e Pfister L. (2009). "Analytical derivation of the Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple evaporation model". *Water Resources Research*, 45, 15p.
- Gupta H. V; Beven K. J.; Wagener T. (2005). "Model Calibration and Uncertainty Estimation". John Wiley & Sons, 142, 1-17
- Kawashita, K. L. (2013). "Calibração do modelo hidrológico SMAP para a região do Distrito Federal e entorno". Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 46 p.
- Kay, A. L.; Davies, H. N (2008). " Calculating potential evaporation from climate data: A source of uncertainty for hydrological climate change impacts." *Journal of Hydrology*, 358, 221-239.
- Kay, A. L.; Davies, H. N.; Bell, V.A.; R. G. Jones (2009). "Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: Flood frequency in England". *Climate Change*, 92, 41-63.
- Lopes, J. E.G. (1999). "Manual do programa de simulação hidrológica SMAP". . p. 9. (Cedido pelo autor).
- Moore, R. J. (1985). "The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales". *Hydrology and Earth System Sciences*. 30, 273-297.
- Moore, R.J (2007). "The PDM rainfall-runoff model". *Hydrology and Earth System Science*, 11, 483-499.
- Moradkani H.; Sorooshian S.; Gupta V.; Houser R. (2005). "Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter". *Advances in Water Resources* 28 (2005) 135-147
- Nelder, J. A; Mead R. (1965) "A Simplex Method for function minimization.". *Computer journal* 7(4): 308-313.
- Otsuki, R. G.; Costa, M.E.; Reis, D.S. (2012). "E possível estimar séries anuais de vazão em bacias não monitoradas utilizando equações baseadas nas hipóteses de Budyko?", XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.
- PGIRH/DF (2012). "Revisão e Atualização do Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal", Diagnóstico – Volume 01. Abril, 2012.
- Piringer M., Jovre S, Baklanov, A, Christen, A, Deserti, M, De Ridder K., Emeis S., Mestayer, P., Tombrou, M., Middleton, D, Baumann-Stanzer, K., Dandou A., Karppinen, A., Burzynski J., The surface energy balance and the mixing height in urban areas– activities and recommendations of COST-Action 715 (2007), *Boundary-Layer Meteorology* (124), 3-24.

- Piringer, M.; Grimmond, C.S.B.; Joffre, S. M., Mestayer, P.; Middleton, D. R.; Rotach, M. W.; Baklanov, A.; De Ridder, K.; Ferreira, J.; Guilloteau, E.; Karppinen A.; Martilli A.; Masson V.; Tombrou M.; (2002) "Investigating the surface energy balance in urban areas- Recent advances and futures needs". *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* (2), 1-16.
- Ponce, V. M.; Hawkins, R. H. (1996). "Runoff curve number: Has it reached maturity?" *Journal of Hydrologic Engineering*, 1, 11-16.
- Porporato, A.; Daly, E.; Rodriguez-Iturbe, I. (2004). Soil water balance and ecosystem response to climate change. *American Naturalist* 164 (5), 625–632.
- Potter, N. J.; Zhang, L.; (2009). "Internnual variability of catchment water balance in Australia". *Journal of Hydrology* 369: 120-129.
- Rawis W. J.; Ahuja, L. R.; Brakensiewk, D. L.; Shimohamadi A. (1993). "Chapter 5: Infiltration and Soil Water Movement". In *Hanbook of Hydrology*, ed D.R Maidment, McGraw Hill, New York.
- Renner M.; Seppelt R.; Bernofer C. (2011). "A simple water-energy balance framework to predict the sensitivity of streamflow to climate change". *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 8793-8830.
- Sartori, A.; Hawkins R. H.; Genovez, M.; (2011). "Reference curve numbers and behavior for sugarcane on highly weathered tropical soils". *Journal of irrigation and drainage engineering*, 137, 705-711.
- Shuttleworth, W. J. (1993). "Chapter 4: Evaporation". In *Hanbook of Hydrology*, ed D.R Maidment, McGraw Hill, New York.
- Soil Conservation Service (1972). "Urban hydrology for small watersheds". Tech. Rel. No 55. U.S. Department of Agriculture. Washington D.C
- Stewart D.; Canfield, E.; Hawkins, R.; "Curve number determination methods and uncertainty in Hydrologic soils groups from semiarid watershed data". *Journal Hydrologic Engineering*, 17, 1180-1187.
- Su, Z.(2002). "The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of Turbulent Heat Fluxes", *Hydrology and Earth System Sciences* 6(1), 85-99.
- Thomas, G. E.; Stamnes, K. (1999). "Radiative transfer in the Atmosphere and Ocean". Cambridge University Press, First Edition. 546 pp. New York.
- Vieira, V. P. P. B (1996). "Recursos Hídricos e desenvolvimento sustentável do semi-arido nordestino", *RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol 1, 89-107.

- Vrugt, J. A. W.; Bouten, H.; Gupta V.; Sorooshian S. (2002), "Toward improved identifiability of hydrologic model parameters" *Water Resources Research*, 38(12), 1312,
- Wagener T.; Weather H. S.; Gupta H. V. (2004). "Rainfall-Runoff Modelling in gauged and ungauged catchments". Imperial College Press, 306 pp.
- Yang, D.; Sun, F.; Liu, Z.; Cong, Z.; Lei, Z.; (2006). "Interpreting the complementary relationship in non-humid environments based on the Budyko and Penman hypotheses." *Geophysical Research Letters.*, 33.
- Zhang, L.; Potter, N.; Hickel, K.; Zhang, Y.; Shao Q. (2008), Water Balance Modeling Over Variable Time Scales Based on the Budyko Framework. *Model Development and Testing, Journal of Hydrology* 360: 117-131

ANEXOS

Anexo 1. Valores das métricas testadas com o algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) na calibração do Modelo Conceitual baseado nas Hipóteses de Budyko, passo mensal. Caso de estudo. Distrito Federal

ID	N.S	RMSE	BIAS	CORR
60435000	0.7455	0.6782	-0.0085	0.8682
60435100	0.655	0.142	-0.0006	0.8253
60435150	0.4681	0.0902	0.0056	0.6952
60435300	0.5847	0.1078	0.0014	0.7753
60435400	0.651	0.444	-0.0105	0.8199
60477600	0.5624	0.7113	0.0226	0.7504
60474100	0.8555	0.4822	0.0032	0.9258
60490000	0.8028	9.1202	0.1096	0.8966
60500000	0.7104	23.3336	-0.246	0.8498
60430000	0.6633	12.6404	-1.6094	0.8398
60432000	0.3627	3.4407	0.0734	0.6036
60445000	0.5331	60.8837	-4.5777	0.7691
60510000	0.643	90.509	-9.1084	0.8292
60540000	0.5501	22.7565	-4.4591	0.8259
60545000	0.6661	124.0191	-13.8078	0.8353
60020000	0.7317	26.9506	-4.6159	0.8716
60030000	0.7573	48.673	-0.5538	0.8738
20050000	0.7372	53.6074	-0.2875	0.8609
20090000	0.5908	101.3388	-19.4211	0.7999
42460000	0.6021	25.3137	-0.4209	0.7783
42490000	0.587	35.083	1.7568	0.7672
42540000	0.6413	45.7699	0.5981	0.8023
42600000	0.7134	54.9217	-8.6182	0.8573

Anexo 2. Valores das métricas testadas com o algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) na calibração do Modelo SMAP, passo mensal. Caso de estudo. Distrito Federal

ID	N.S	RMSE	BIAS	CORR
60435000	0.8018	0.5985	-0.019	0.8976
60435100	0.6938	0.1337	-0.0096	0.8496
60435150	0.576	0.0806	0.0002	0.7589
60435300	0.589	0.1073	-0.0001	0.7698
60435400	0.7382	0.3846	-0.0016	0.8593
60477600	0.5804	0.6965	0.0077	0.7633
60474100	0.8555	0.4822	0.0032	0.9258
60490000	0.8539	7.8511	0.1878	0.9243
60500000	0.7761	20.515	0.3671	0.8811
60430000	0.7047	11.8388	-1.0649	0.8501
60432000	0.4766	3.118	-0.0691	0.6906
60445000	0.6132	55.4211	0.8657	0.7846

ID	N.S	RMSE	BIAS	CORR
60510000	0.6811	85.5482	-4.6386	0.8433
60540000	0.6587	19.8213	1.9821	0.8192
60545000	0.7313	111.2459	-9.9318	0.8623
60020000	0.785	24.1239	-0.3508	0.8861
60030000	0.8042	43.7164	-1.567	0.897
20050000	0.828	43.3725	1.9038	0.9101
20090000	0.6637	91.8712	3.452	0.8154
42460000	0.614	24.9331	-0.1621	0.7836
42490000	0.7091	29.4451	1.3443	0.8427
42540000	0.7186	40.5441	-0.12	0.8484
42600000	0.8133	44.3307	-1.9006	0.9021

Anexo 3. Valores das métricas testadas com o algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) na calibração do Modelo Conceitual baseado nas Hipóteses de Budyko, passo mensal. Caso de estudo. Estado do Ceará.

ID	N.S	RMSE	BIAS	CORR
34750000	0.9253	10.3027	-1.2815	0.9627
35210000	0.5715	4.9796	0.1105	0.7563
35650000	0.6784	2.1563	0.2187	0.8255
35760000	0.654	2.2523	0.7708	0.8306
35880000	0.82	4.2234	-0.1048	0.9061
35950000	0.8614	11.0995	0.0269	0.9294
36045000	0.7379	1.3843	0.016	0.8591
36125000	0.7674	7.067	-0.0831	0.8765
36160000	0.718	20.8603	0.7958	0.8476
36210000	0.8833	1.5355	-0.075	0.9401
36250000	0.4534	3.658	-0.4656	0.6832
36270000	0.5556	21.4431	0.1377	0.7462
36290000	0.8564	28.3257	0.5421	0.9255
36470000	0.8593	17.3472	-0.8373	0.9271
36520000	0.7549	13.0328	-0.194	0.8689

Anexo 4. Valores das métricas testadas com o algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) na calibração do Modelo SMAP, passo mensal. Caso de estudo. Estado do Ceará

ID	N.S	RMSE	BIAS	CORR
34750000	0.9213	10.5798	0.7532	0.96
35210000	0.7959	3.4367	0.1291	0.8939
35650000	0.807	1.6705	0.1271	0.899
35760000	0.706	2.076	0.1907	0.8426
35880000	0.5872	6.3948	1.0252	0.775
35950000	0.8812	10.2756	1.6651	0.9403
36045000	0.3108	2.2449	0.03	0.5577

ID	N.S	RMSE	BIAS	CORR
36125000	0.864	5.4037	0.0129	0.9295
36160000	0.8096	17.1382	1.1676	0.901
36210000	0.8242	1.8849	0.1772	0.9108
36250000	0.5389	3.3597	0.1277	0.7345
36270000	0.625	19.6993	2.0483	0.793
36290000	0.892	24.5642	5.1938	0.9471
36470000	0.9357	11.7265	3.1394	0.9694
36520000	0.7786	12.3865	2.9451	0.8893

Anexo 5. Valores das métricas testadas com o algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) na calibração do Modelo conceitual baseado nas hipóteses de Budyko, passo diária. Caso de estudo. Estado do Ceará

ID	N.S	RMSE	BIAS	CORR
34750000	0.5562	33.1609	-4.0115	0.762
35210000	0.2286	9.956	-0.4193	0.4814
35650000	0.2088	6.1993	-0.4014	0.5008
35760000	0.2432	4.7552	0.9451	0.6197
35880000	0.4559	12.6701	-0.1114	0.6755
35950000	0.5716	26.1234	1.5777	0.7925
36045000	0.3254	5.7271	-0.2563	0.5727
36125000	0.0303	58.271	1.2821	0.1778
36160000	0.4593	50.2369	-3.6363	0.6867
36210000	0.1552	6.7324	-0.071	0.4117
36250000	0.076	9.2806	-0.6172	0.2879
36270000	0.3456	41.6486	-1.3128	0.5958
36290000	0.2738	81.0741	-7.9255	0.5453
36470000	0.4076	52.3771	3.1493	0.6757

Anexo 6. Valores das métricas testadas com o algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) na calibração do Modelo SMAP, passo diária. Caso de estudo. Estado do Ceará

ID	N.S	RMSE	BIAS	CORR
34750000	0.7506	24.8564	-2.1635	0.8673
35210000	0.3839	8.8977	-0.4002	0.6207
35650000	0.3674	5.5433	0.017	0.6075
35760000	0.2866	4.617	0.9321	0.6507
35880000	0.6558	10.0775	0.127	0.8102
35950000	0.6143	24.7852	2.614	0.8096
36045000	0.3131	5.7791	-0.2012	0.5607
36125000	0.0675	57.1414	1.4596	0.2642
36160000	0.7676	32.9364	1.9961	0.8767
36210000	0.5984	4.6418	-0.2706	0.7749
36250000	0.4711	7.0216	0.0583	0.6866
36270000	0.5258	35.4553	-1.478	0.726

ID	N.S	RMSE	BIAS	CORR
36290000	0.4355	71.4805	-19.4524	0.6902
36470000	0.6774	38.6513	1.5624	0.8286
36520000	0.3274	35.7206	-1.7214	0.5734

Anexo 7. Valores das métricas testadas com o algoritmo Simplex (Nelder & Mead, 1965) na calibração do Modelo Híbrido conceitual (HIBI) passo diária. Caso de estudo. Estado do Ceará

ID	N.S	RMSE	BIAS	CORR
34750000	0.7689	23.9306	1.3044	0.8772
35210000	0.3988	8.7894	0.2717	0.6319
35650000	0.38	5.488	-0.0326	0.6266
35760000	0.3062	4.5531	0.383	0.5583
35880000	0.6683	9.8936	0.2065	0.8176
35950000	0.6286	24.3216	3.313	0.8006
36045000	0.5593	4.6292	-0.1346	0.7481
36125000	0.0666	57.1705	3	0.2642
36160000	0.7733	32.5261	2.2208	0.8799
36210000	0.6111	4.5676	0.1778	0.7822
36250000	0.4878	6.9101	0.2629	0.6989
36270000	0.5433	34.7924	2.152	0.7382
36290000	0.6364	57.3695	7.2574	0.8022
36470000	0.6866	38.0966	4.6179	0.8348
36520000	0.3986	33.7774	2.6649	0.634

Anexo 8. Cálculo das diferença de eficiência de calibração com os modelos SMAP e o Modelo Conceitual Baseado nas Hipoteses de Budyko, passo mensal. Distrito Federal e Entorno. Teste de Hipóteses.

ID	N.S _{BUD}	N.S _{SMAP}	Dif
60435000	0.7455	0.8018	-0.0563
60435100	0.655	0.6938	-0.0388
60435150	0.4681	0.576	-0.1079
60435300	0.5847	0.589	-0.0043
60435400	0.651	0.7382	-0.0872
60477600	0.5624	0.5804	-0.018
60490000	0.8028	0.8539	-0.0511
60500000	0.7104	0.7761	-0.0657
60430000	0.6633	0.7047	-0.0414
60432000	0.3627	0.4766	-0.1139
60445000	0.5331	0.6132	-0.0801
60510000	0.643	0.6811	-0.0381
60540000	0.5501	0.6587	-0.1086
60545000	0.6661	0.7313	-0.0652
60020000	0.7317	0.785	-0.0533

ID	N.S_{BUD}	N.S_{SMAP}	Dif
60030000	0.7573	0.8042	-0.0469
20050000	0.7372	0.828	-0.0908
20090000	0.5908	0.6637	-0.0729
42460000	0.6021	0.614	-0.0119
42490000	0.587	0.7091	-0.1221
42540000	0.6413	0.7186	-0.0773
42600000	0.7134	0.8133	-0.0999

Anexo 9. Cálculo das diferenças de eficiência de calibração com os modelos SMAP e o Conceitual Baseado nas Hipóteses de Budyko, passo mensal. Postos fluviométricos localizado no Estado do Ceará. Teste de Hipóteses.

ID	N.S_{BUD}	N.S_{SMAP}	Dif
34750000	0.9253	0.9213	-0.004
35210000	0.5715	0.7959	0.2244
35650000	0.6784	0.807	0.1286
35760000	0.654	0.706	0.052
35880000	0.82	0.5872	-0.2328
35950000	0.8614	0.8812	0.0198
36045000	0.7379	0.3108	-0.4271
36125000	0.7674	0.864	0.0966
36160000	0.718	0.8096	0.0916
36210000	0.8833	0.8242	-0.0591
36250000	0.4534	0.5389	0.0855
36270000	0.5556	0.625	0.0694
36290000	0.8564	0.892	0.0356
36470000	0.8593	0.9357	0.0764
36520000	0.7549	0.7786	0.0237

Anexo 10. Cálculo das diferenças de eficiência de calibração com os modelos SMAP e o modelo híbrido conceitual (HIBI) passo diário. Postos Fluviométricos Localizados no Estado do Ceará. Teste de Hipóteses.

ID	N.S_{SMAP}	N.S_{HIB}	Dif.
34750000	0.7506	0.7689	0.0183
35210000	0.3839	0.3988	0.0149
35650000	0.3674	0.38	0.0126
35760000	0.2866	0.3062	0.0196
35880000	0.6558	0.6683	0.0125
35950000	0.6143	0.6286	0.0143
36045000	0.3131	0.5593	0.2462
36125000	0.0675	0.0666	-0.0009
36160000	0.7676	0.7733	0.0057

ID	N.S_{SMAP}	N.S_{HIB}	Dif.
36210000	0.5984	0.6111	0.0127
36250000	0.4711	0.4878	0.0167
36270000	0.5258	0.5433	0.0175
36290000	0.4355	0.6364	0.2009
36470000	0.6774	0.6866	0.0092
36520000	0.3274	0.3986	0.0712