

ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA
CONTRATO Nº 22/2018

PRODUTO 02 - RELATÓRIO DA MODELAGEM DE APORTE DE SÓLIDOS E
LÍQUIDOS DA BACIA HIDROGRÁFICA

REALIZAÇÃO:



GOVERNO DO ESTADO
RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
E INFRAESTRUTURA

EXECUÇÃO:



RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
ENGENHARIA

CURITIBA - PR
MAIO/2019

ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA

CONTRATO Nº 22/2018

Emissão Inicial						
Rev.	Data	Elaborado por	Verificado por	Autorizado por	CREA Responsável Técnico	CE
0	12/04/2019	HOF; RBR	TM; AP	CSG	67059-D	VS
1	13/05/2019	HOF; RBR	LMC; AP	CSG	67059-D	AE
2	24/05/2019	HOF; RBR	LMC; AP	CSG	67059-D	AF

CE – Códigos de emissão

AE Aprovado para emissão **AF** Aprovação final **VS** Versão preliminar **CD** Cancelado

**GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA (SEMA/RS)**

Av. Borges de Medeiros, nº 261, 14º andar
Centro Histórico, Porto Alegre – RS – Brasil

Secretário de Estado do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
Artur Lemos Júnior

Fiscal titular de acompanhamento e execução do contrato
Amanda Wajnberg Fadel

Fiscal suplente de acompanhamento e execução do contrato
Fernando Comerlato Scottá

RHA ENGENHARIA E CONSULTORIA SS LTDA

Rua Voluntários da Pátria, 400 – 14º andar
CEP 80020-000 - Centro - Curitiba - PR - Brasil
Tel./Fax +55 41 3232 0732 - www.rhaengenharia.com.br

REPRESENTANTE LEGAL

Candice Schauffert Garcia

Engenheira Civil
Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental
csgarcia@rhaengenharia.com.br

EQUIPE PERMANENTE

Coordenadora Geral, Técnico e Administrativo

Eng.^a Civil, M.Sc., Candice Schauffert Garcia

Engenheiro de Recursos Hídricos 1

Eng.^o Civil, M.Sc., Laertes Munhoz da Cunha

Engenheiro de Recursos Hídricos 2

Eng.^a Civil, M.Sc., Márian da Costa Rohn

Coordenadora Executiva

Eng.^a Ambiental, Esp., Andréia Pedroso

Técnica em Sistemas de Informações Geográficas

Geógrafa Karine Krunn

Auxiliar Administrativo

Veridiana Dias da Cruz

EQUIPE COMPLEMENTAR

Físico, Dr., José Eduardo Gonçalves

Oceanógrafa, M.Sc., Tábata Fernanda Vilas Boas de Miranda

Engenheiro Ambiental, M.Sc., Hugo de Oliveira Fagundes

Engenheira Ambiental, Renata Barão Rossoni

Geógrafo, Dr., Rodrigo Marcos Souza

Eng.^a Sanitarista e Ambiental, Kássia Regina Bazzo

DADOS CONTRATUAIS

Contrato nº 22/2018 de 17 de setembro de 2018.

Número do processo administrativo eletrônico: 18/0500-0000570-8.

Ordem de Início dos Serviços nº CT-0290 de 13/11/2017.

Partes: Estado do Rio Grande do Sul, por intermédio da Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, e RHA Engenharia e Consultoria SS Ltda.

Objeto: Contratação de serviços de empresa especializada para prestação de serviços de Estudo Hidrossedimentológico do Lago Guaíba.

Vigência: 06 meses a partir da data definida na Ordem de Início dos Serviços (com aditamento de prazo de 06 meses).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática do modelo hidrológico MGB.....	11
Figura 2. Representação esquemática do modelo Hidrossedimentológico MGB-SED. Fonte: Buarque (2015).....	12
Figura 3. Mapa do modelo digital de elevação (MDE) na região hidrográfica do Guaíba	14
Figura 4. Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica	15
Figura 5. Discretização espacial da região hidrográfica do Guaíba em sub-bacias e minibacias	16
Figura 6. Discretização espacial da região hidrográfica do Guaíba em sub-bacias e minibacias	17
Figura 7. Postos Pluviométricos	19
Figura 8. DIAGRAMA DE DISPONIBILIDADE DE DADOS DE VAZÃO NA ÁREA DE INTERESSE	20
FIGURA 9. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE, PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA, NA CALIBRAÇÃO DO MODELO MGB, CONSIDERANDO AS VAZÕES DIÁRIAS.....	24
Figura 10. Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (<i>NSE</i>) para as vazões diárias simuladas e observadas para o período de 1975-2005	25
Figura 11. Valores de <i>BIAS</i> para as vazões diárias simuladas e observadas para o período de 1975-2005	26
Figura 12. Coeficiente de correlação de Pearson <i>r</i> entre para as vazões diárias simuladas e observadas para o período de 1975-2005	27
FIGURA 13. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87170000 NO PERÍODO ENTRE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005.....	29
FIGURA 14. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 NO PERÍODO ENTRE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005.....	29
FIGURA 15. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 86510000 NO PERÍODO ENTRE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005.....	30
FIGURA 16. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE, PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA, UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO MGB, CONSIDERANDO AS VAZÕES MENSAIS	31
Figura 17. Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (<i>NSE</i>) para as vazões mensais simuladas e observadas para o período de 1975-2005	32
Figura 18. Valores de <i>BIAS</i> para as vazões mensais simuladas e observadas para o período de 1975-2005	33
FIGURA 19. VALORES DE <i>r</i> PARA AS VAZÕES MENSAIS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 1975-2005	34
Figura 20. Hidrogramas mensais observado e simulado na estação 86270000 de 1975 a 2005.....	35
Figura 21. Hidrogramas mensais observado e simulado na estação 86510000 de 1975 a 2005.....	35
FIGURA 22. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE, PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA, UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO DO MODELO MGB, CONSIDERANDO AS VAZÕES DIÁRIAS.....	36
Figura 23. Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (<i>NSE</i>) para as vazões diárias simuladas e observadas para o período de 2006-2015	37
Figura 24. Valores de <i>BIAS</i> para as vazões diárias simuladas e observadas para o período de 2006-2015	38
Figura 25. Coeficiente de correlação de Pearson <i>r</i> entre para as vazões diárias simuladas e observadas para o período de 2006-2015	39
FIGURA 26. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 PARA O PERÍODO ENTRE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015.....	40
FIGURA 27. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 85735000 PARA O PERÍODO ENTRE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015.....	41

FIGURA 28. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87380000 PARA O PERÍODO ENTRE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015.....	41
FIGURA 29. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE, PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA, UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO DO MODELO MGB, CONSIDERANDO AS VAZÕES MENS AIS	42
Figura 30. Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (<i>NSE</i>) para as vazões mensais simuladas e observadas para o período de 2006-2015	43
Figura 31. Valores de <i>BIAS</i> para as vazões mensais simuladas e observadas para o período de 2006-2015	44
Figura 32. Valores de <i>r</i> para as vazões mensais simuladas e observadas para o período de 2006-2015...	45
Figura 33. Hidrogramas mensais observado e simulado na estação 85735000 de 2006 a 2015.....	46
Figura 34. Hidrogramas mensais observado e simulado na estação 87380000 de 2006 a 2015.....	46
FIGURA 35. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO MGB-SED	51
Figura 36. Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (<i>NSE</i>) para as DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS simuladas e observadas para o período de 1975-2005.....	53
Figura 37. Valores de <i>BIAS</i> para as DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS simuladas e observadas para o período de 1975-2005	54
Figura 38. Coeficiente de correlação de Pearson <i>r</i> entre para as DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS simuladas e observadas para o período de 1975-2005.....	55
FIGURA 39. SEDIMENTOGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 85900000 PARA O PERÍODO DE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005	56
FIGURA 40. SEDIMENTOGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 86510000 PARA O PERÍODO DE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005	57
FIGURA 41. SEDIMENTOGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 PARA O PERÍODO DE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005	57
FIGURA 42. SEDIMENTOGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87380000 PARA O PERÍODO DE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005	58
FIGURA 43. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO DO MODELO MGB-SED	59
Figura 44. Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (<i>NSE</i>) para as DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS simuladas e observadas para o período de 2006-2015.....	60
Figura 45. Valores de <i>BIAS</i> para as DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS simuladas e observadas para o período de 2006-2015	61
Figura 46. Coeficiente de correlação de Pearson <i>r</i> entre para as DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS simuladas e observadas para o período de 2006-2015.....	62
FIGURA 47. SEDIMENTOGRAMA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 85900000 PARA O PERÍODO DE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015.....	63
FIGURA 48. SEDIMENTOGRAMA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 86510000 PARA O PERÍODO DE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015.....	64
FIGURA 49. SEDIMENTOGRAMA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 PARA O PERÍODO DE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015.....	64
FIGURA 50. SEDIMENTOGRAMA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87380000 PARA O PERÍODO DE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015.....	65
Figura 51. Estimativa da descarga sólida total (QST) dos dados simulados (método de Yang) e dos dados observados (Método de Colby) entre janeiro/2012 e dezembro/2015 – Estação fluviométrica 85900000 (Rio Jacuí).....	68
Figura 52. Estimativa da descarga sólida total (QST) dos dados simulados (método de Yang) e dos dados observados (Método de Colby) entre janeiro/2012 e dezembro/2015 – Estação fluviométrica 86510000 (Rio Taquari).....	69

Figura 53. Estimativa da descarga sólida total (QST) dos dados simulados (método de Yang) e dos dados observados (Método de Colby) entre janeiro/2012 e dezembro/2015 – Estação fluviométrica 87270000 (Rio Caí)	69
Figura 54. Estimativa da descarga sólida total (QST) dos dados simulados (método de Yang) e dos dados observados (Método de Colby) entre janeiro/2012 e dezembro/2015 – Estação fluviométrica 87380000 (Rio dos Sinos)	70
FIGURA 55. SEDIMENTOGRAMA MENSAL PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 85900000 PARA O PERÍODO ENTRE 1975 ATÉ 2015	71
FIGURA 56. SEDIMENTOGRAMA MENSAL PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 86510000 PARA O PERÍODO ENTRE 1975 ATÉ 2015	72
FIGURA 57. SEDIMENTOGRAMA MENSAL PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 PARA O PERÍODO ENTRE 1975 ATÉ 2015	72
FIGURA 58. SEDIMENTOGRAMA MENSAL PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87380000 PARA O PERÍODO ENTRE 1975 ATÉ 2015	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estações fluviométricas.....	18
Tabela 2. Métricas de avaliação do modelo hidrológico	21
Tabela 3. Métricas de avaliação do modelo hidroSSEDIMENTOLÓGICO.....	22
Tabela 4. Resumo das métricas de performance do modelo mgb para as estações fluviométricas da região hidrográfica do Guaíba na etapa de calibração (1975-2005).....	31
Tabela 5. Resumo das métricas de performance do modelo mgb para as estações fluviométricas da região hidrográfica do Guaíba na etapa de validação (2006-2015).....	47
Tabela 6. Resultados estatísticos da calibração e validação do modelo hidrológico MGB para vazões diárias observadas e simuladas.	48
Tabela 7. Comparação da performance da modelagem hidrológica do presente estudo com OS ESTUDOS realizados por Lopes et al. (2015) e Lopes et al. (2018)	50
Tabela 8. Resumo das métricas de performance do modelo mgb-sed para as estações sedimentométricas da região hidrográfica do Guaíba na etapa de calibração	52
Tabela 9. Resumo das métricas de performance do modelo mgb-sed para as estações sedimentométricas da região hidrográfica do Guaíba na etapa de validação	59
Tabela 10. Resultados estatísticos da calibração e validação do modelo de sedimentos MGB-sed para descargas sólidas em suspensão observadas e simuladas.....	66
Tabela 11. Resultados estatísticos para as descargas sólidas totais (QST) diárias entre os valores simulados e observados	67
Tabela 12. Estatísticas calculadas para as descargas sólidas totais simuladas com o modelo MGB-SED, entre os anos de 1976 e 2015	70
Tabela 13. Taxa de erosão média estimada a partir das descargas sólidas totais.....	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	MODELAGEM HIDROLÓGICA E DE SEDIMENTOS	10
2.1	O MODELO DE GRANDES BACIAS (MGB)	10
2.2	PREPARAÇÃO DO MODELO MGB	12
2.3	DADOS HIDROLÓGICOS E CLIMATOLÓGICOS	18
2.4	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO E DE SEDIMENTOS	20
2.5	ESTIMATIVA DAS DESCARGAS SÓLIDAS TOTAIS (QST)	22
2.6	TAXA DE EROÇÃO LAMINAR TEÓRICA	23
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
3.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO	24
3.2	VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO	36
3.3	CALIBRAÇÃO X VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO – VALORES DIÁRIOS	47
3.4	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO	51
3.5	VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO	58
3.6	CALIBRAÇÃO X VALIDAÇÃO DO MODELO de sedimentos – VALORES DIÁRIOS	65
3.7	DESCARGA SÓLIDA TOTAL – 1975 ATÉ 2015	67
3.8	TAXA DE EROÇÃO MÉDIA ESTIMADA	73
4	CONCLUSÕES	74
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	APÊNDICE I: Hidrogramas diários das vazões líquidas – Calibração (1975 até 2005)	79
	APÊNDICE II: Hidrogramas diários das vazões líquidas – Validação (2006 até 2015)	86
	APÊNDICE III: Hidrogramas mensais das vazões líquidas – Calibração (1975 até 2005)	93
	APÊNDICE IV: Hidrogramas mensais das vazões líquidas – Validação (2006 até 2015)	100
	APÊNDICE V: Sedimentogramas diários das descargas sólidas em suspensão – Calibração (1975 até 2005)	107
	APÊNDICE VI: Sedimentogramas diários das descargas sólidas em suspensão – Validação (2006 até 2015)	113
	APÊNDICE VII: Sedimentogramas diários das descargas sólidas totais – Período Total (1975 até 2015)	120
	APÊNDICE VIII: Sedimentogramas mensais das descargas sólidas totais – Período Total (1975 até 2015)	127

1 INTRODUÇÃO

O estudo hidrossedimentológico da Região Hidrográfica do Guaíba, localizada no Estado do Rio Grande do Sul, visa a obtenção do conhecimento da dinâmica e transporte de sedimentos, desde a eclusa de Amarópolis até Itapuã, para a definição de diretrizes orientativas aos critérios para a mineração de areia.

Para a simulação do aporte de sólidos e líquidos inicialmente foi utilizado o modelo SWAT. Contudo, o modelo SWAT não apresentou resultados satisfatórios para a região de estudo, devido a limitações do método de modelagem, como a dificuldade de obtenção de dados de entrada e métodos simplificados de propagação do escoamento. Diante dessa situação, foi necessária a substituição do SWAT pelo Modelo de Grandes Bacias (MGB – Collischonn et al, 2007), que apresentou bons resultados em aplicações prévias realizadas em grandes bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul (e.g. Lopes et al., 2018; Munar et al., 2018; Siqueira et al., 2018; Fan et al., 2016; Collischonn et al., 2007). Com essa substituição, a aplicação do modelo MGB para a Região Hidrográfica do Guaíba apresentou resultados satisfatórios no escopo do trabalho.

O MGB é uma ferramenta computacional que permite representar, matematicamente, processos físicos observados na natureza. De acordo com a classificação proposta por Tucci (1998), o modelo hidrológico MGB pode ser considerado um modelo conceitual com forte embasamento físico, contínuo no tempo, semi-distribuído no espaço e determinístico. Por apresentar essas características, permite representar processos que ocorreram no passado e também simular cenários futuros, com diferentes condições físicas e climáticas que interferem no comportamento hidrológico da bacia.

A partir do acoplamento de um módulo de sedimentos ao modelo MGB, originou-se o modelo MGB-SED, desenvolvido por Buarque (2015), que fornece tanto informações de descargas líquidas quanto de descargas sólidas. As vantagens de utilizar o MGB-SED é que a principal forçante do modelo - o escoamento superficial nas encostas da bacia - é um dado que pode ser obtido diariamente a partir do MGB. Dessa forma, o objetivo do presente relatório é apresentar os resultados de modelagem hidrológica e hidrossedimentológica para a Região Hidrográfica do Guaíba, contemplando o período de calibração entre 1975 e 2005 e de validação entre 2006 e 2015, utilizando o modelo MGB-SED para 13 estações fluviométricas localizadas na bacia. No presente estudo, são apresentados os hidrogramas simulados diários e mensais de descarga líquida e descarga sólida, bem como estatísticas de performance do modelo. Os hidrogramas e sedimentogramas apresentados nesse trabalho serão utilizados como condições de contorno da modelagem hidrodinâmica das descargas líquidas e sólidas no Módulo II - Modelagem hidrodinâmica de sedimentos do Baixo Jacuí.

2 MODELAGEM HIDROLÓGICA E DE SEDIMENTOS

Para realizar a modelagem hidrológica e hidrossedimentológica, foi utilizado o Modelo de Grandes Bacias (MGB). Os capítulos a seguir são divididos em: (1) considerações sobre o modelo MGB; (2) etapas de preparação do modelo, como discretização e outras informações; (3) dados de entrada utilizados no modelo; (4) calibração e validação do modelo hidrológico e hidrossedimentológico; e (5) cálculo das estimativas de descarga sólida total.

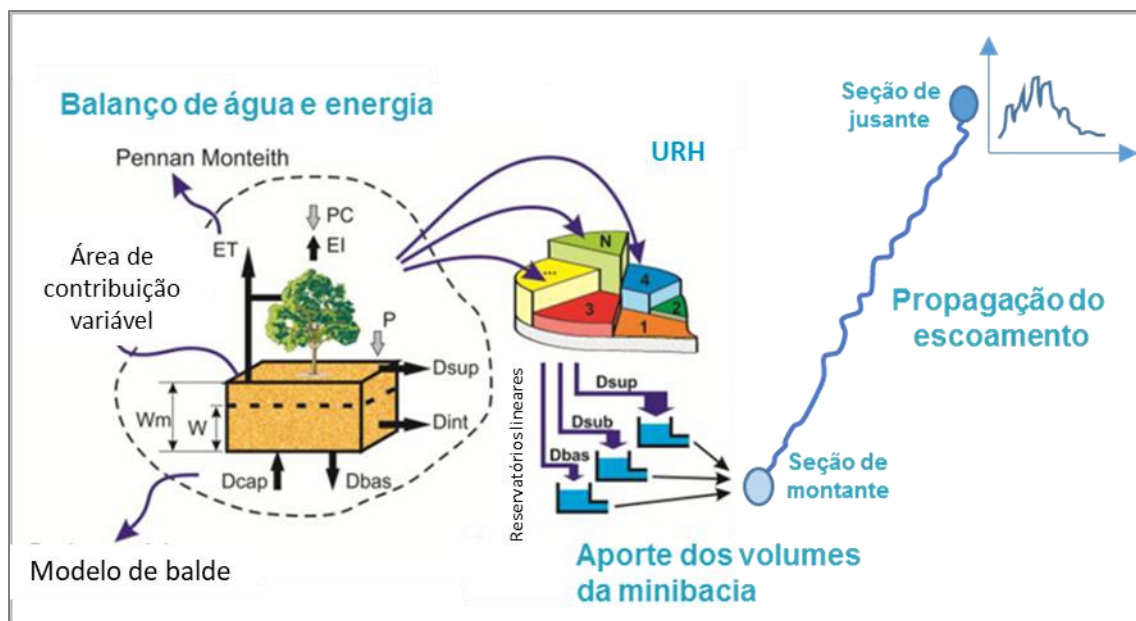
2.1 O MODELO DE GRANDES BACIAS (MGB)

O modelo MGB foi desenvolvido por Collischonn et al. (2007) para representar os processos físicos relacionados ao ciclo hidrológico. Por ser um modelo semi-distribuído no espaço, permite considerar a heterogeneidade das características fisiográficas e climatológicas presentes na bacia e como essas influenciam localmente os processos hidrológicos.

Os processos considerados na modelagem são: balanço de água no solo, precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos, além do armazenamento de água no solo (Collischonn et al., 2007). No MGB, o escoamento superficial é gerado seguindo a abordagem Dunneana e a evapotranspiração é calculada pela equação de Penman-Monteith. A propagação do escoamento na rede de drenagem pode ser feita pelo método de Muskingum-Cunge (MC), como apresentado na versão desenvolvida por Collischonn et al., 2007, pelo método que considera as equações completas de Saint Venant (Paiva et al., 2011) ou pelo método inercial (Pontes et al., 2015).

A aplicação do modelo MGB passa por uma etapa de pré-processamento onde são definidas as características físicas/espaciais da bacia, como o Modelo Digital de Elevação (MDE), a geração da rede de drenagem, delimitação das sub-bacias e minibacias e definição das Unidades de Resposta Hidrológica (URH). A Figura 1 mostra uma representação esquemática dos processos simulados no modelo MGB. Mais detalhes podem ser conferidos em Collischonn et al. (2007).

FIGURA 1. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO HIDROLÓGICO MGB

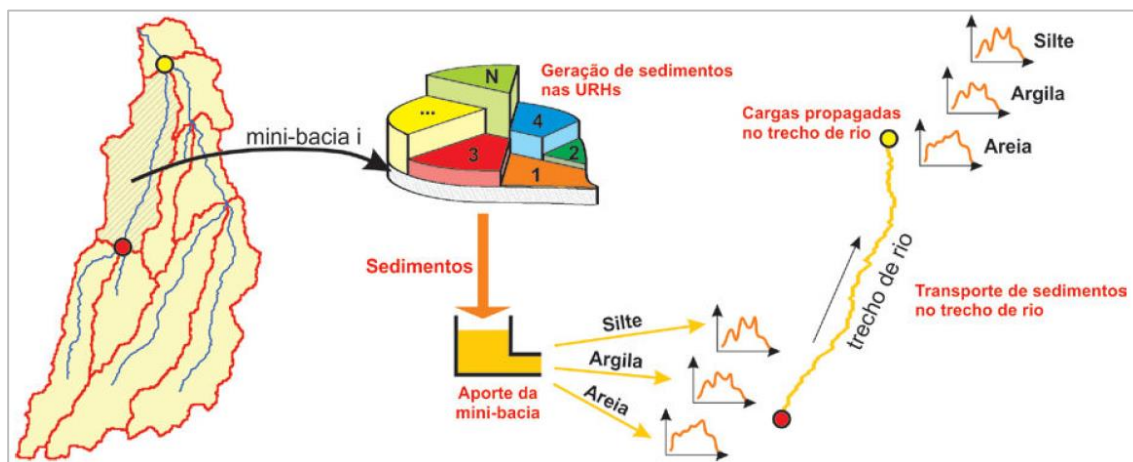


O modelo MGB-SED (Buarque, 2015) é um modelo que representa os processos de erosão laminar e em sulcos nas encostas e o transporte de sedimentos no canal. A discretização espacial do modelo, em sub-bacias e minibacias, é a mesma utilizada para o MGB e em cada URH são computados os volumes de sedimentos. Esses volumes são gerados a partir da Equação Universal de Perda de Solos Modificada - MUSLE (Williams, 1975) – Equação 1, apresentada a seguir, aplicada pixel a pixel. Posteriormente, os volumes de sedimentos são somados para cada minibacias e transferido das encostas para o canal por meio de reservatórios lineares. No canal, a propagação dos sedimentos em suspensão (frações de silte e argila) é feita utilizando a equação de difusão-advecção. A propagação da carga de leito (areia) foi realizada utilizando a equação da continuidade de sedimentos (Equação de Exner) e a fórmula de Yang (Yang, 1973; 1984) para calcular a capacidade de transporte do escoamento, e assim também se considerou os processos de erosão de leito e deposição no canal. Um esquema dos funcionamento do modelo MGB-SED é apresentado na Figura 2. Mais detalhes sobre a estrutura, métodos e equacionamento do modelo podem ser conferidos em Buarque (2015).

$$Sed = \alpha \cdot (Q_{sup} \cdot q_{pico} \cdot A)^{\beta} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \quad (1)$$

em que Sed [t/dia] é a produção de sedimentos, Q_{sup} [mm/ha] é o volume de escoamento superficial, q_{pico} [m³/s] é a taxa de pico do escoamento superficial, A [ha] é a área superficial, K [0,013.t.m².h./m³.t.cm] é o fator erodibilidade do solo, C [-] é fator de cobertura e manejo do solo, P [-] é o fator de práticas conservacionistas, LS [-] é o fator topográfico, α e β são coeficientes de ajuste, proposto por Williams (1975) como sendo 11,8 e 0,56, respectivamente, mas que foram calibrados no presente trabalho.

FIGURA 2. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO MGB-SED. FONTE: BUARQUE (2015).



2.2 PREPARAÇÃO DO MODELO MGB

O MDE utilizado (Figura 3) foi o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizado pelo Grupo Consultivo sobre Pesquisa Agrícola Internacional (CGIAR), no endereço eletrônico <http://srtm.csi.cgiar.org/>, com resolução espacial de 90 m e resolução vertical de 1 m. Foi utilizado um MDE de 90 m ao invés de um de 30 m por duas razões: (i) o custo computacional de processamento para uma área de grandes dimensões, utilizando um MDE, com resolução espacial de 30 m é bem mais elevado que a de 90 m; (ii) as incertezas presentes na modelagem hidrológica são maiores do que as incertezas associadas às diferentes resoluções espaciais do MDE, sendo as incertezas minimizadas no processo de calibração do modelo. O pré-processamento foi realizado com o uso do pacote de ferramentas *IPH-Hydro Tools*, que é apresentado em Siqueira et al. (2016). As URH (Figura 4) foram obtidas do mapa de URH da América do Sul (Fan et al., 2015), elaborado com base no mapa de tipos de solo, da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2003), e no mapa de usos e cobertura vegetal, da GlobCover (Arino et al., 2012). As URH representam regiões que possuem o mesmo comportamento hidrológico e, junto com as sub-bacias, são usadas como base na etapa de calibração do modelo.

A discretização espacial da bacia, em unidades menores, é uma etapa importante, pois as sub-bacias são utilizadas como unidades que possuem os mesmos parâmetros calibráveis e as minibacias são as unidades em que os volumes de águas de cada URH são computados. A bacia foi discretizada em 17 sub-bacias e 1512 minibacias, que são apresentadas na Figura 5 e Figura 6.

Na etapa de pré-processamento do modelo MGB-SED são definidos os parâmetros da MUSLE. Os valores de Q_{sup} e q_{pico} são estimados a partir do modelo MGB (Buarque, 2015). O valor de P

adotado é igual a 1 (um), pois, segundo Beskow et al. (2009), esse é o valor utilizado nos casos onde não há prática conservacionista. O pior caso foi adotado, uma vez que não há informações sobre as práticas de manejo na bacia em grande escala, como ocorre na Região Hidrográfica do Guaíba. O fator LS é a combinação dos fatores comprimento da rampa L e declividade S e representam a contribuição do escoamento superficial no processo de erosão hídrica. O cálculo do fator LS proposto por Buarque (2015) é feito com uma abordagem bidimensional e é calculado para cada pixel do MDE.

O volume de sedimentos total produzido nas minibacias não chega à rede de drenagem no mesmo instante, sofrendo, portanto, um retardo. Para representar esta situação, Buarque (2015) considerou que cada fração dos sedimentos passa por um reservatório linear simples. A Equação 2 representa esse processo.

$$QS_{i,j}^t = \frac{VSED_{i,j}^t}{TKS_i} \quad (2)$$

em que QS [t/s] é a descarga de sedimentos que sai do reservatório; $VSED$ [t] é o volume de sedimentos no reservatório; e TKS [s] é o tempo de retardo do reservatório linear.

FIGURA 3. MAPA DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE) NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA

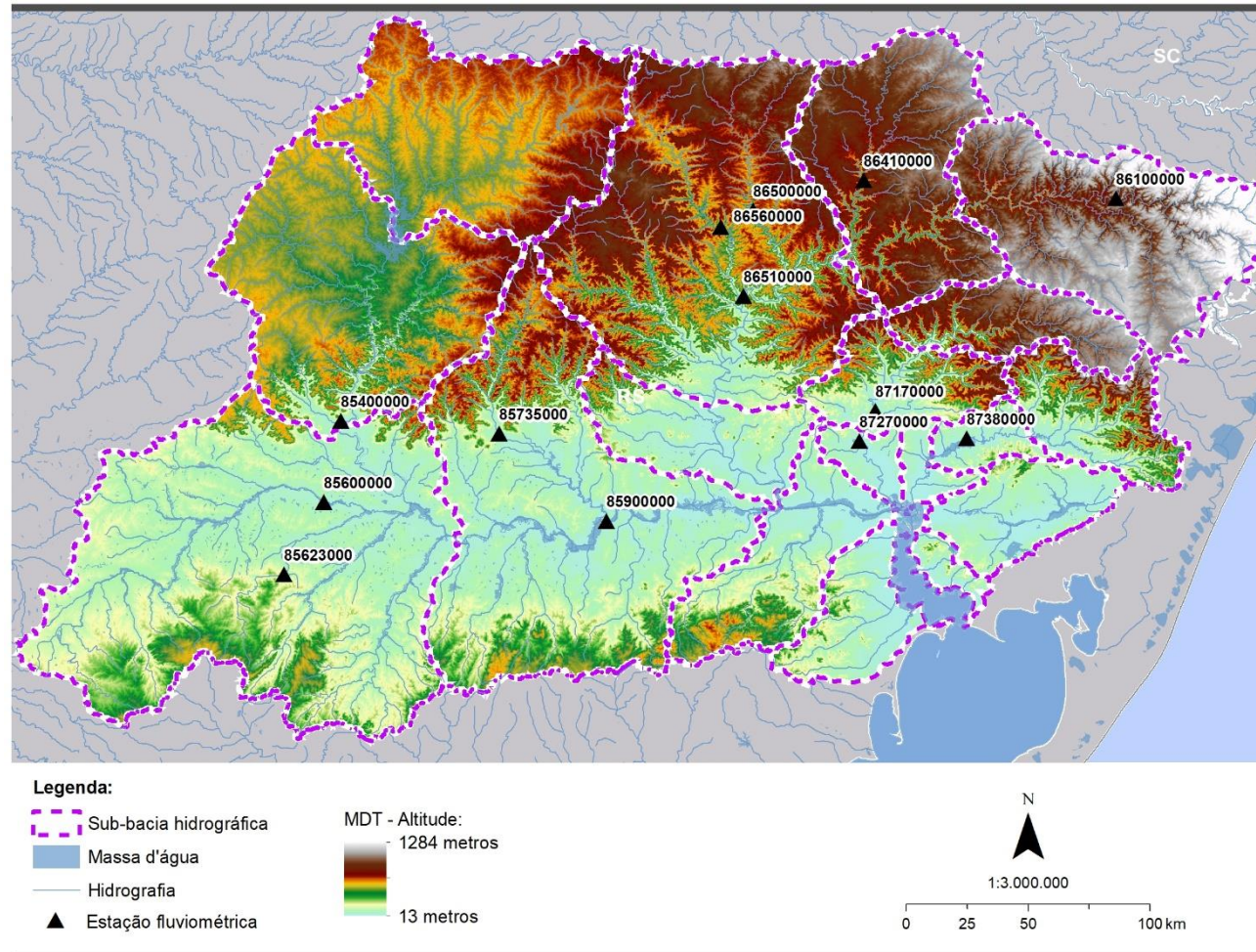


FIGURA 4. MAPA DE UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA

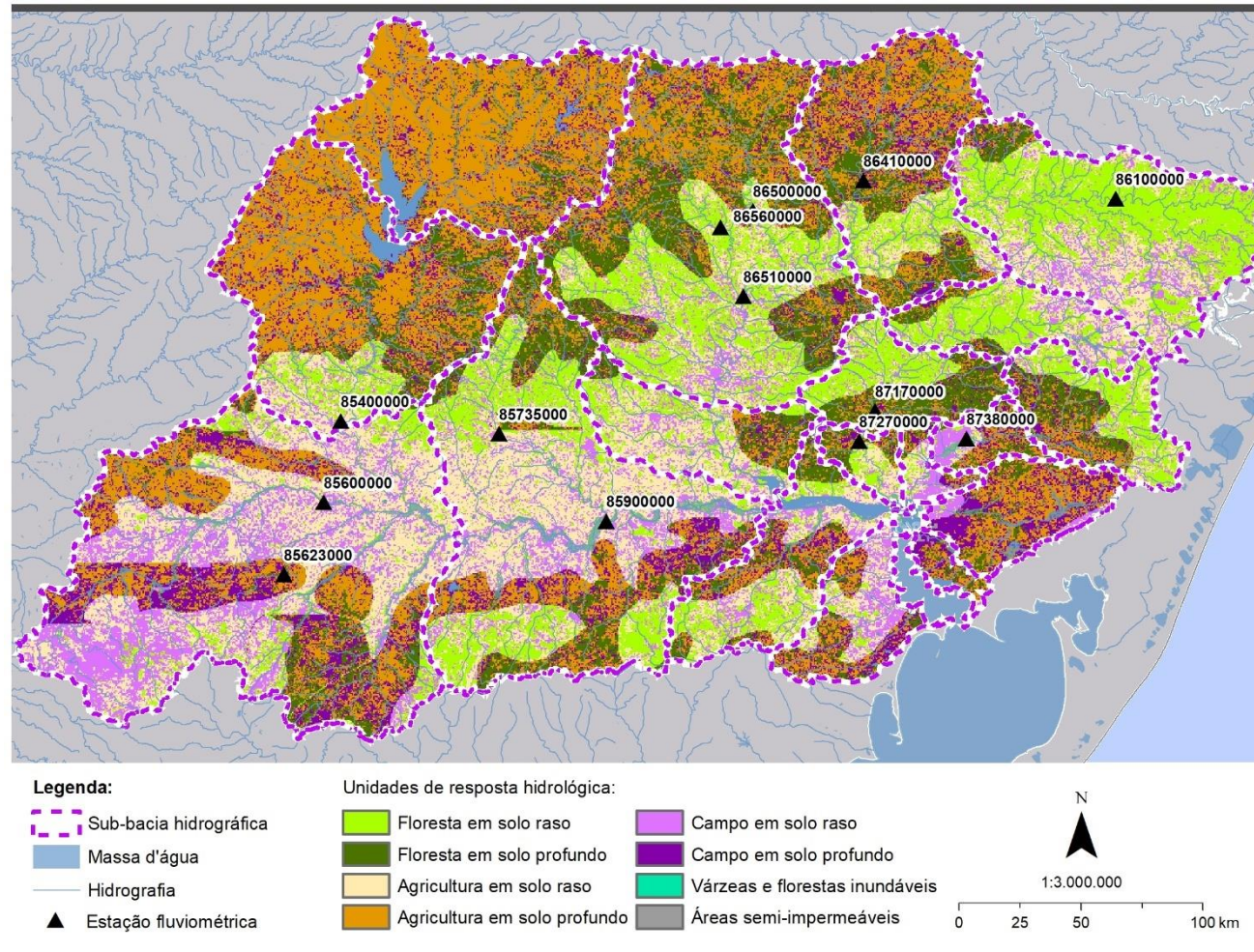


FIGURA 5. DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA EM SUB-BACIAS E MINIBACIAS

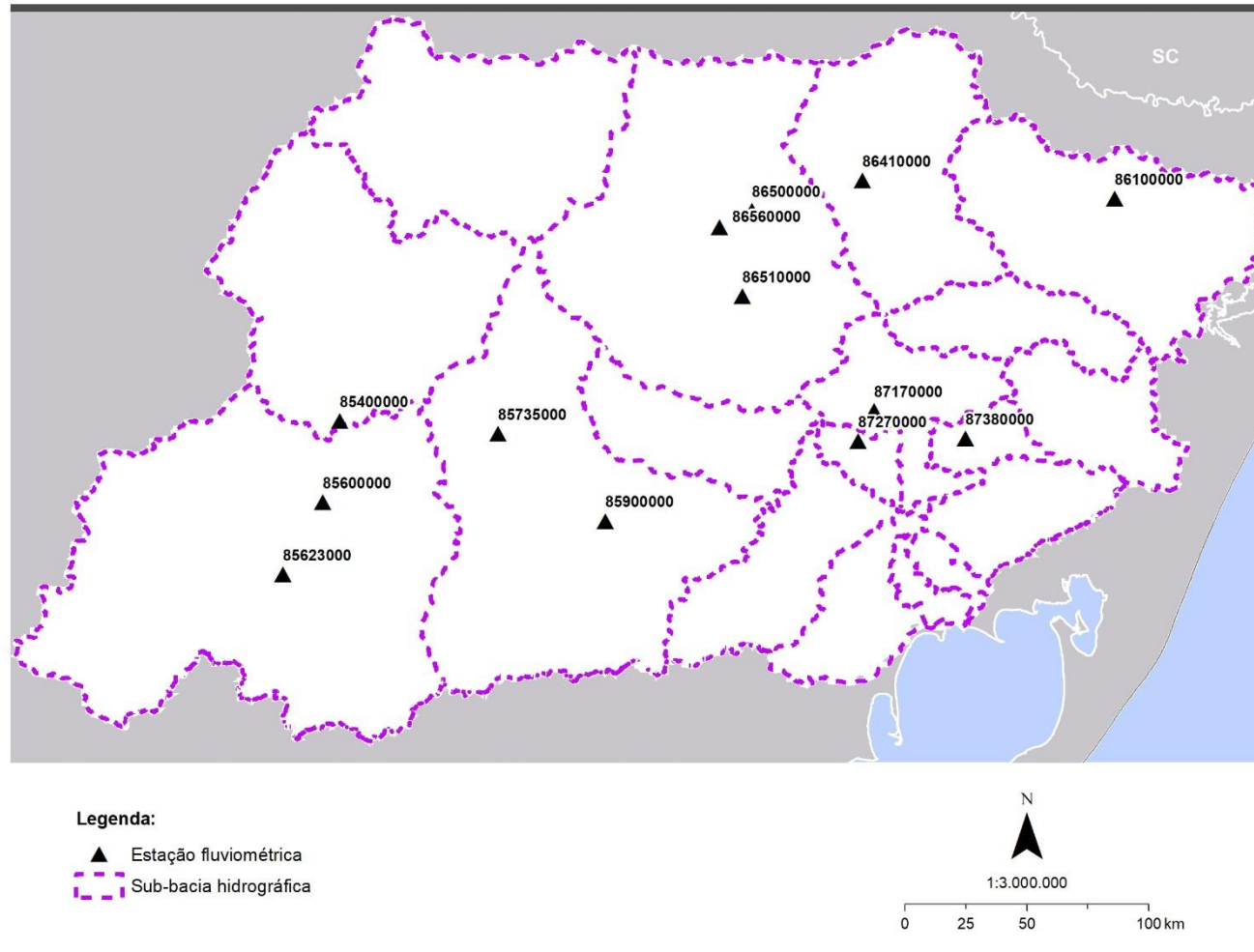
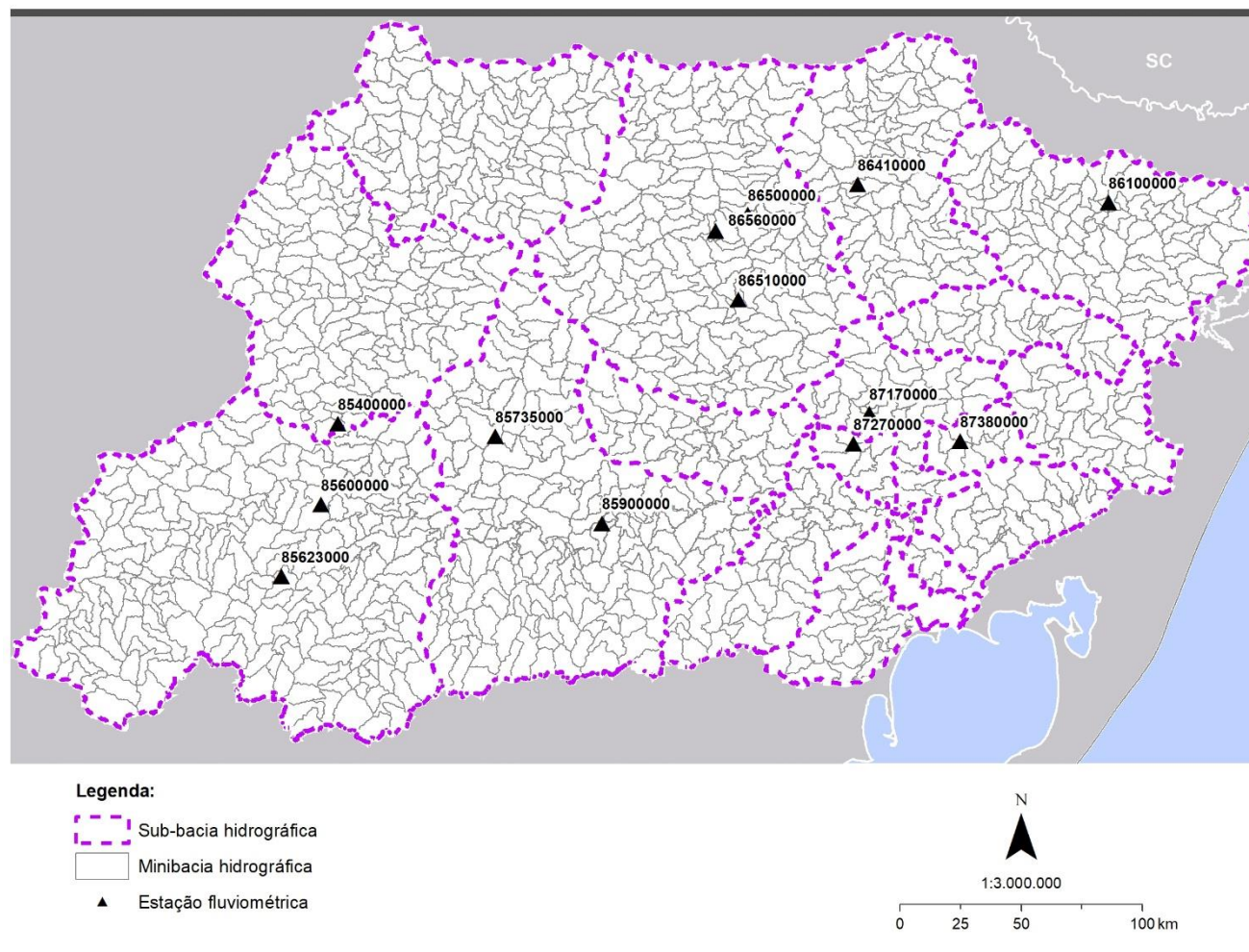


FIGURA 6. DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA EM SUB-BACIAS E MINIBACIAS



Com o modelo MGB-SED, estimou-se as descargas sólidas em suspensão diárias e posteriormente foi aplicado o Método Simplificado de Colby (1957) para estimar as descargas sólidas totais. O método de Colby utiliza ábacos e dados de descarga líquida, velocidade média, profundidade média, largura da seção e concentração de sedimentos em suspensão, todas informações prontamente fornecidas pelo modelo MGB-SED.

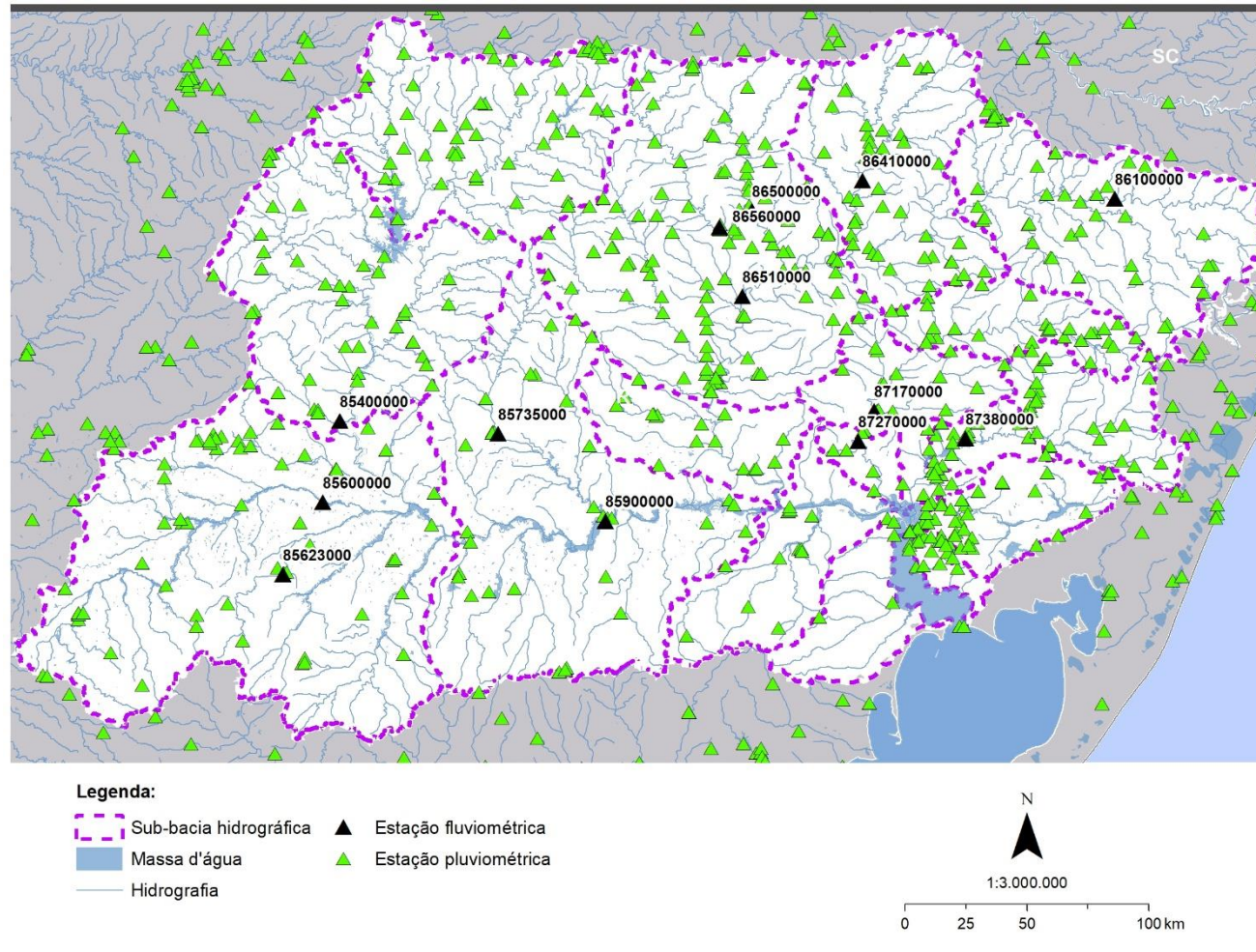
2.3 DADOS HIDROLÓGICOS E CLIMATOLÓGICOS

Os dados de chuva foram obtidos a partir de 813 postos pluviométricos (Figura 7), disponibilizados no portal HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA), no endereço eletrônico <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>. Esses dados são utilizados para gerar, através de interpolação, a chuva média diária em cada minibacia do modelo. Além disso, os dados de descarga líquida e sólida utilizados foram obtidos de 13 estações fluviométricas da ANA. Essas estações foram escolhidas por possuírem dados tanto de vazão quanto de concentração de sedimentos em suspensão, para o período de calibração e/ou validação. A Tabela 1 apresenta as estações utilizadas no estudo. Foram utilizados dados climatológicos de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação que estão disponíveis no banco de dados interno do modelo MGB, obtidos das normais climatológicas do INMET (Fan e Collischonn, 2014). Esses dados são utilizados como entrada do modelo, para calcular a evapotranspiração diária.

TABELA 1. ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

Código da estação	Nome da estação	Nome do rio	Área de drenagem (km ²)	Período de dados	
85400000	Dona Francisca	Rio Jacuí	14000	1978	2015
85600000	Passo das Tunas	Rio Vacacaí	6780	1986	2018
85623000	São Sepé - Montante	Rio São Sepé	690	1985	2018
85735000	Candelária - Montante	Rio Pardo	1340	2002	2018
85900000	Rio Pardo	Rio Jacuí	38700	1998	2018
86100000	Passo do Gabriel	Rio das Antas	1820	2001	2018
86410000	Passo Barra do Guaiaveira	Rio Turvo	2820	1979	2018
86500000	Passo Carreiro	Rio Carreiro	1820	1979	2018
86510000	Muçum	Rio Taquari	16000	1979	2018
86560000	Linha Colombo	Rio Guaporé	2030	1979	2018
87170000	Barca do Caí	Rio Caí	3030	2009	2018
87270000	Passo Montenegro	Rio Caí	4360	1986	2014
87380000	Campo Bom	Rio dos Sinos	2900	1986	2018

FIGURA 7. POSTOS PLUVIOMÉTRICOS



2.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO E DE SEDIMENTOS

A calibração do modelo hidrológico foi realizada de forma manual, por tentativa e erro, baseada em Lopes et al. (2018), comparando os dados de vazões diárias simuladas pelo modelo MGB com as vazões geradas nas estações fluviométricas da ANA. O período de calibração é de 1975 a 2005 e o período de validação é de 2006 a 2015. A disponibilidade de dados para cada estação pode ser observada na Figura 8. Essas estações foram escolhidas por possuírem dados tanto de vazão quanto de concentração de sedimentos em suspensão, para o período de calibração e/ou validação. Assim, optou-se por utilizar as mesmas estações para a calibração do modelo hidrológico e hidrossedimentológico, embora existam outras estações com disponibilidade de dados de vazão para o mesmo período.

FIGURA 8. DIAGRAMA DE DISPONIBILIDADE DE DADOS DE VAZÃO NA ÁREA DE INTERESSE

Código da estação	Nome da estação	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
85400000	DONA FRANCISCA																																						
85600000	PASSO DAS TUNAS																																						
85623000	SÃO SEPÊ - MONTANTE																																						
85735000	CANDELÁRIA MONTANTE																																						
85900000	RIO PARDO																																						
86100000	PASSO DO GABRIEL																																						
86410000	PASSO BARRA DO GUAIAVEIRA																																						
86500000	PASSO CARREIRO																																						
86510000	MUÇUM																																						
86560000	LINHA COLOMBO																																						
87170000	BARCA DO CAÍ																																						
87270000	PASSO MONTENEGRO																																						
87380000	CAMPO BOM																																						

Legenda:

- 12 meses com dados diários
- 11 meses com dados diários
- 10 meses com dados diários
- menos de 10 meses com dados diários
- Sem informação

Para avaliar a calibração, foram feitas análises qualitativas dos hidrogramas diários gerados pelo modelo, nas respectivas estações, com os hidrogramas diários das vazões observadas. Considerando o objetivo do estudo, torna-se mais relevante ter os picos de vazão bem representados para a posterior aplicação do modelo hidrossedimentológico. Assim, buscou-se com a calibração dar prioridade para uma boa representação dos picos de vazão. Além disso, foi realizada uma análise quantitativa, considerando três métricas de desempenho: coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e o erro relativo médio percentual ($BIAS$).

O r descreve o grau de colinearidade entre os dados simulados e observados, variando entre -1 e +1. O valor de r igual a zero significa que não há relação linear existente entre os dados observados e os dados simulados. Quando igual a -1 ou +1, significa que há uma correlação linear perfeita, negativa ou positiva, respectivamente (Moriassi et al., 2007).

$$r = \frac{\sum(x - X) \cdot (y - Y)}{\sqrt{\sum(x - X)^2 \cdot \sum(y - Y)^2}} \quad (1)$$

onde, x e y são os valores das amostras; X e Y são as médias das amostras.

O *NSE* é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual comparada à variância dos dados observados (Moriasi et al., 2007). O coeficiente *NSE* pode ser calculado a partir da Equação 2:

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

O *BIAS* mede a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores do que os dados observados. O valor zero ($BIAS = 0$) seria considerado ótimo e quanto menor a magnitude deste coeficiente, maior seria a acurácia do modelo. Valores positivos indicam que o modelo superestima os dados simulados em relação aos dados observados. Valores negativos significam que o modelo subestima os valores simulados em relação aos observados (Gupta et al., 1999 apud Moriasi et al., 2007). O *BIAS* pode ser calculado de acordo com a Equação 3.

$$BIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \cdot (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (3)$$

As análises da qualidade da performance do modelo foram suportadas pelo trabalho de Moriasi et al. (2007), que apresenta faixas indicativas de valores satisfatórios e insatisfatórios para modelos com passo de tempo mensal. A qualidade de performance do modelo foi avaliada considerando os valores apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Avaliação	<i>r</i>	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i> (%)
Muito Bom	1,0 – 0,8	1,0 – 0,75	$BIAS < \pm 10$
Bom	0,8 – 0,6	0,75 – 0,65	$\pm 10 \leq BIAS \leq \pm 15$
Satisfatório	0,6 – 0,4	0,65 – 0,5	$\pm 15 \leq BIAS \leq \pm 25$
Insatisfatório	$\leq 0,4$	$\leq 0,5$	$BIAS \geq \pm 25$

A calibração do módulo de sedimentos foi realizada através da calibração manual, por tentativa e erro, dos parâmetros K (fator de erodibilidade do solo) e C (fator de cobertura e uso do solo) para cada URH de cada sub-bacia de acordo com Rossoni (2018). O valor do parâmetro K foi calibrado a partir de estimativas iniciais de texturas de solo, disponibilizadas pelo mapa de tipos de solo do IBGE (IBGE, 2000). Os valores de C foram calibrados de acordo com dados de literatura (Carvalho, 2008; Farinasso

et al., 2006; Frizzarim et al., 2015; Martins et al., 2010). Após, realizou-se uma calibração de forma automática para obter maior acurácia dos resultados, seguindo a abordagem usada por Fagundes et al. (2019). Dessa forma, utilizou-se o algoritmo de otimização MOCOM-UA (Yapo et al., 1998) para calibrar o modelo MGB-SED, variando os coeficientes α (3,0-8,0) e β (0,2-1,2) e o parâmetro de retardo do escoamento superficial *TKS*, a partir de um coeficiente multiplicativo que variou entre 0,2 e 4,0. As faixas de variação dos três parâmetros calibráveis foram definidas com base na análise de sensibilidade apresentada por Fagundes et al. (2019). Foram utilizados até 100 conjuntos de parâmetros (NS) e o número de iterações máximas (Imaxgen) do algoritmo entre 50 e 100. Para avaliar a performance do modelo, foram usadas as mesmas métricas usadas na calibração do modelo hidrológico, e os resultados finais foram avaliados de acordo com a Tabela 3.

Os dados relativos aos sedimentos em suspensão (CSS), utilizados para calibração do modelo MGB-SED, também foram obtidos no portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA). Das 13 estações apresentadas na Tabela 1, apenas a estação 87170000 não possuía dados de sedimentos em suspensão no período de calibração, sendo os dados usados apenas na etapa de validação do modelo. Os períodos de calibração e validação do modelo hidrossedimentológico foram os mesmos adotados para a calibração do modelo hidrológico. Cabe destacar que a calibração manual do modelo foi realizada comparando dados de concentração (mg/L) e descarga sólida em suspensão (QSS - t/dia) observadas e simuladas, enquanto a calibração automática do modelo foi realizada comparando os dados de descargas sólidas em suspensão (QSS - t/dia) observadas com as simuladas.

TABELA 3. MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DO MODELO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO

Avaliação	<i>r</i>	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i> (%)
Muito Bom	1,0 – 0,8	1,0 – 0,50	<i>BIAS</i> < ± 15
Bom	0,8 – 0,6	0,50 – 0,25	± 15 ≤ <i>BIAS</i> ≤ ± 30
Satisfatório	0,6 – 0,4	0,25 – 0,00	± 30 ≤ <i>BIAS</i> ≤ ± 55
Insatisfatório	≤ 0,4	≤ 0,00	<i>BIAS</i> ≥ ± 55

2.5 ESTIMATIVA DAS DESCARGAS SÓLIDAS TOTAIS (QST)

Após a calibração e validação do modelo hidrossedimentológico, utilizou-se a QSS e a descarga sólida de leito, estimadas pelo MGB-SED, para calcular a descarga sólida total (QST). Isso foi realizado somando as duas descargas, em suspensão e de leito.

Além disso, foram estimadas QST a partir de dados observados. Embora não haja dados de descarga sólida de leito medidos em campo, utilizou-se o método de Colby para estimar as descargas sólidas totais dos dados observados, que necessita das informações de concentração de sedimentos em

suspensão e dados obtidos a partir da medição da descarga líquida, como velocidade média do fluxo na seção, largura da seção, profundidade d'água e vazão. Esses dados foram obtidos das estações fluviométricas da ANA.

As descargas sólidas totais estimadas pelo modelo MGB-SED foram comparadas com as descargas sólidas totais estimadas por Colby. As estatísticas das descargas sólidas totais – como média, desvio padrão, descarga sólida total de 50% do tempo, QST máxima e QST mínima – foram calculadas para os dados simulados com o modelo MGB-SED, excluindo-se o primeiro ano de simulação – 1975 – do cálculo, pois é considerado o período de aquecimento do modelo.

2.6 TAXA DE EROÇÃO LAMINAR TEÓRICA

Para calcular a taxa de erosão laminar teórica, foram utilizados os valores da descarga sólida total obtida através do modelo MGB-SED. Dessa forma, foi calculada a média anual da produção de sedimentos nas estações fluviométricas de interesse, excluindo-se o primeiro ano de simulação – 1975 – do cálculo, que é considerado o período de aquecimento do modelo, totalizando 40 anos de dados simulados. Além disso, foi utilizado o valor de 2,65 g/cm³ para a densidade média dos sedimentos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

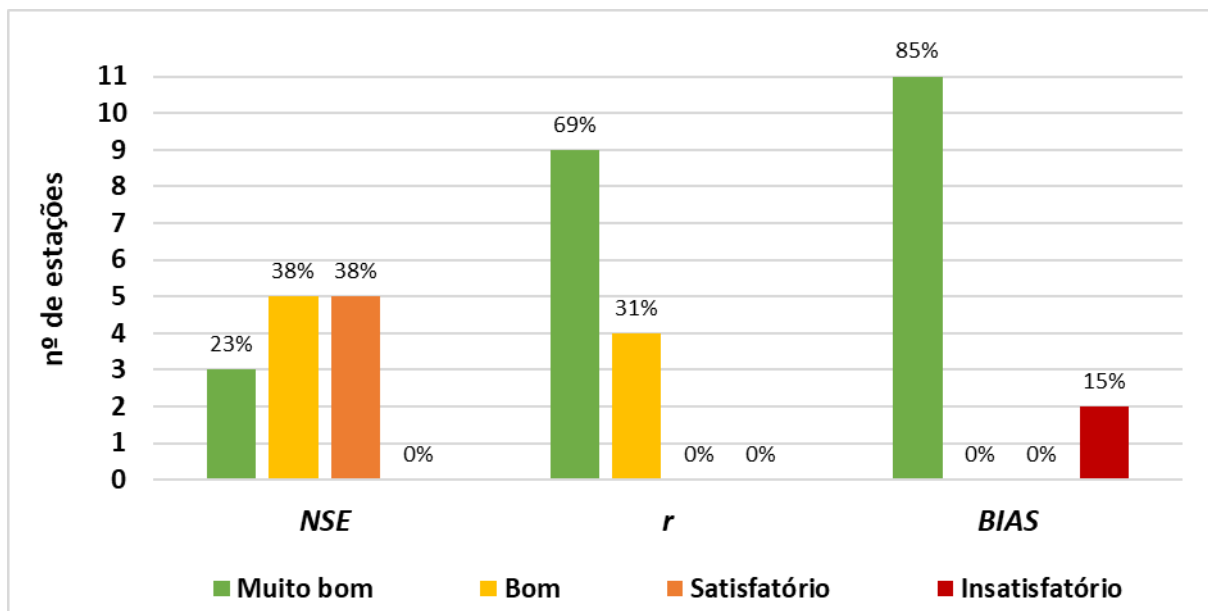
A seguir, são apresentados os resultados referentes à calibração do modelo hidrológico. Os resultados foram separados em: (1) resultados diários, sendo os dados utilizados para a calibração efetiva do modelo, e (2) resultados mensais.

3.1.1 Calibração Hidrológica: Resultados Diários

Na Figura 9, são apresentados os resultados do *NSE*, calculado entre os dados diários observados nas estações fluviométricas e os correspondentes dados simulados com o modelo MGB. Os resultados da Figura 9 mostram que 61% das estações apresentaram valores superiores a 0,65 (bons ou muito bons) e nenhuma estação apresentou resultado insatisfatório.

Na Figura 9, também, são apresentados os valores de *r*. Os resultados mostrados indicam que 69% e 31% das estações apresentaram valores considerados muito bons e bons, respectivamente. Já em relação aos valores de *BIAS*, para as vazões diárias observadas e simuladas, nota-se que 85% das estações fluviométricas apresentaram resultados considerados muito bons e apenas duas (15%) estações, a 87380000 (Rio dos Sinos) e a 87270000 (Rio Caí), apresentaram resultados insatisfatórios.

FIGURA 9. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE, PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA, NA CALIBRAÇÃO DO MODELO MGB, CONSIDERANDO AS VAZÕES DIÁRIAS



A Figura 10, Figura 11 e Figura 12 apresentam, de forma espacial, a performance do modelo para cada uma das métricas *NSE*, *BIAS* e *r*, respectivamente.

FIGURA 10. COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH E SUTCLIFFE (NSE) PARA AS VAZÕES DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 1975-2005

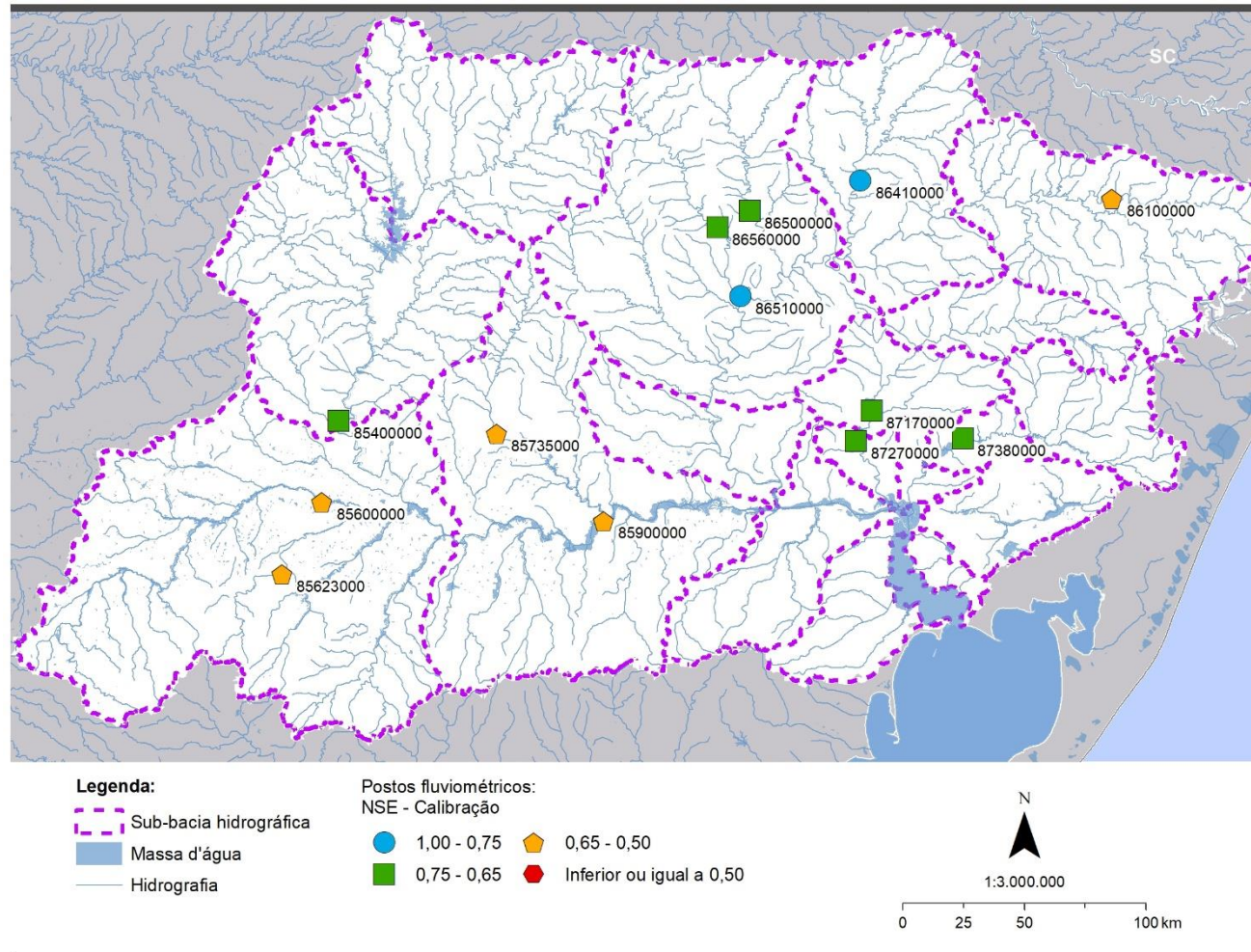


FIGURA 11. VALORES DE BIAS PARA AS VAZÕES DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 1975-2005

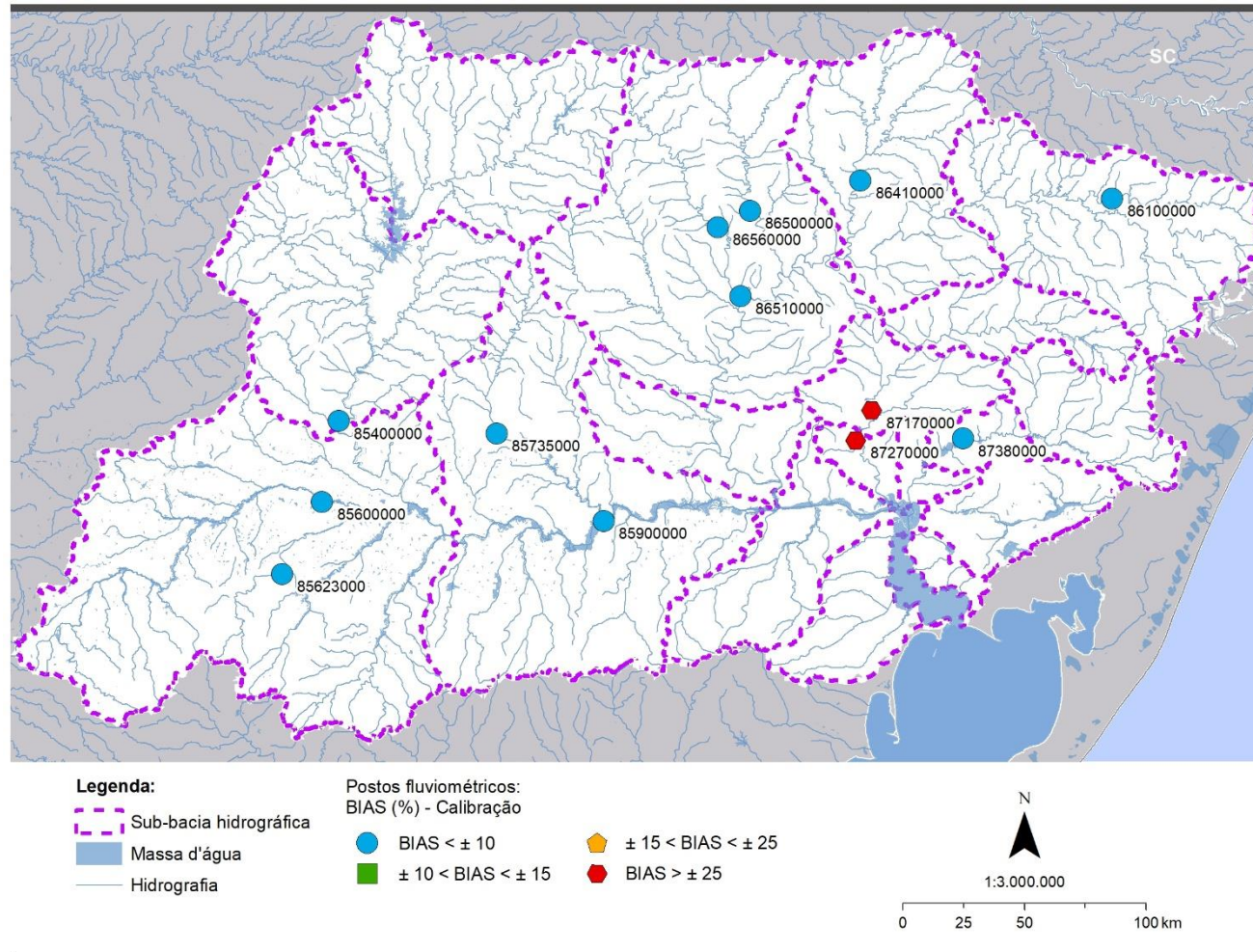
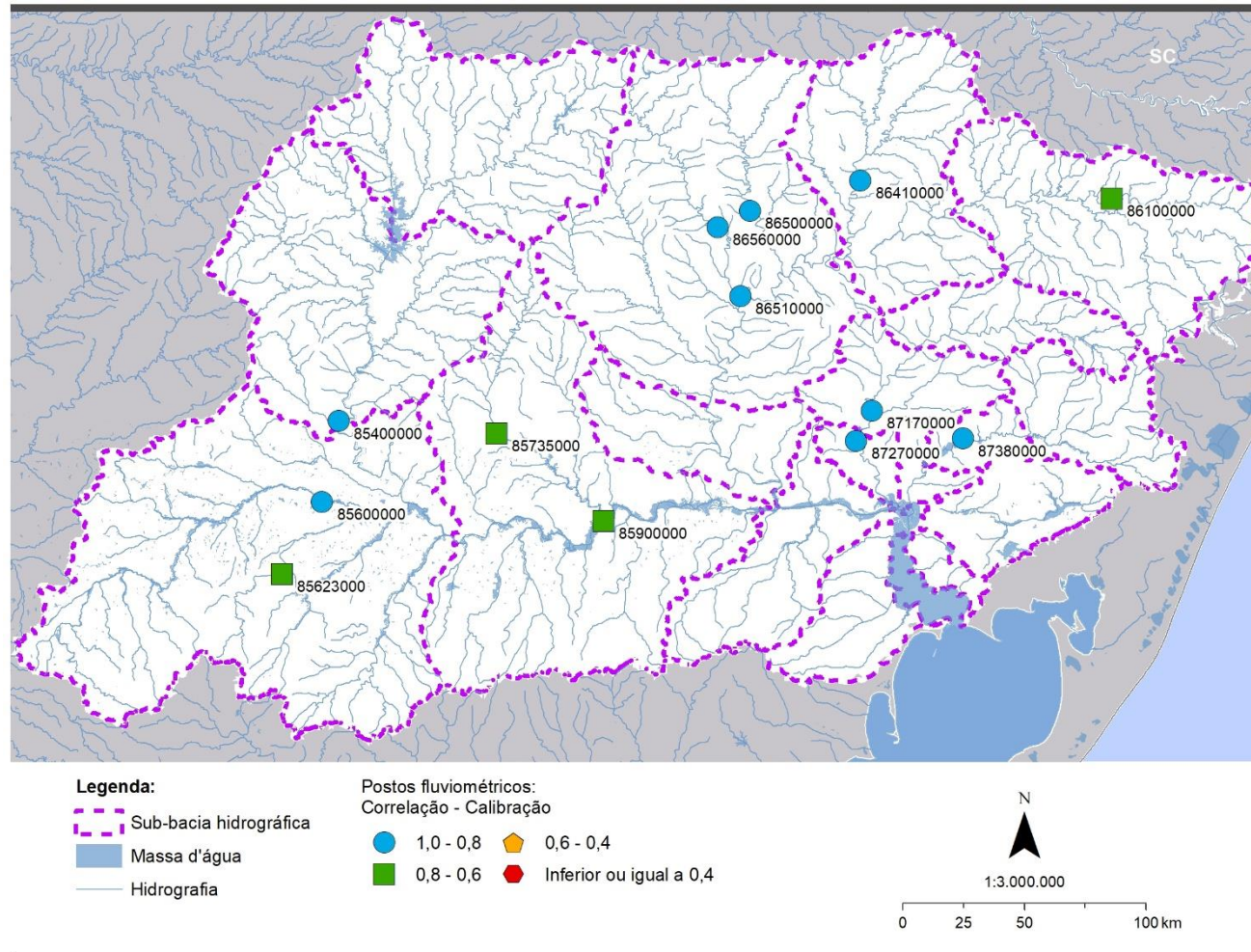


FIGURA 12. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON r ENTRE PARA AS VAZÕES DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 1975-2005



Apesar das estações 87170000 ($BIAS=49\%$) e a 87270000 ($BIAS=34\%$), ambas localizadas no rio Caí, terem apresentado resultados insatisfatórios de $BIAS$, seus valores de NSE e r foram considerados bons e muito bons, respectivamente. Como já mencionado anteriormente, durante o processo de calibração optou-se por priorizar a concordância dos dados simulados e observados para os picos dos hidrogramas, que são os eventos que irão gerar escoamento superficial nas encostas, com maior produção de sedimentos. Dessa forma, nessas duas estações, ocorreu uma superestimativa das vazões, principalmente, de maiores permanências na estação 87170000 (Figura 13), e ora para vazões de maiores permanências e ora de menores permanências na estação 87270000 (Figura 14). Além disso, esse fato pode estar relacionado a diversos fatores, como a dificuldade de uma fiel representação da chuva na região, que possui um relevo complexo (Figura 3), com altas declividades nas cabeceiras e planícies de inundação nas regiões de jusante.

Observa-se, na Figura 14, que o modelo Muskingun-Cunge possui simplificação, na sua representação dos processos hidrológicos, uma vez que a atenuação real de cheias não é adequadamente representada, ocasionando no hidrograma simulado picos superiores ao hidrograma observado, como também pode ser verificado em Lopes et al. (2015). É importante destacar ainda que a estação 87270000 está a jusante da estação 87170000, sendo que, em alguns períodos, a vazão da primeira é menor do que a vazão da segunda. Os hidrogramas observados nessas duas estações indicam, assim como o relevo da região (Figura 3), que os processos hidrológicos estão muito relacionados com as planícies de inundação. Dessa forma, as vazões menores observadas na estação 87270000 podem estar relacionadas com o extravasamento da calha, armazenamento nas planícies e posterior evapotranspiração, sem retornar, portanto, para a calha do rio.

FIGURA 13. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87170000 NO PERÍODO ENTRE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005

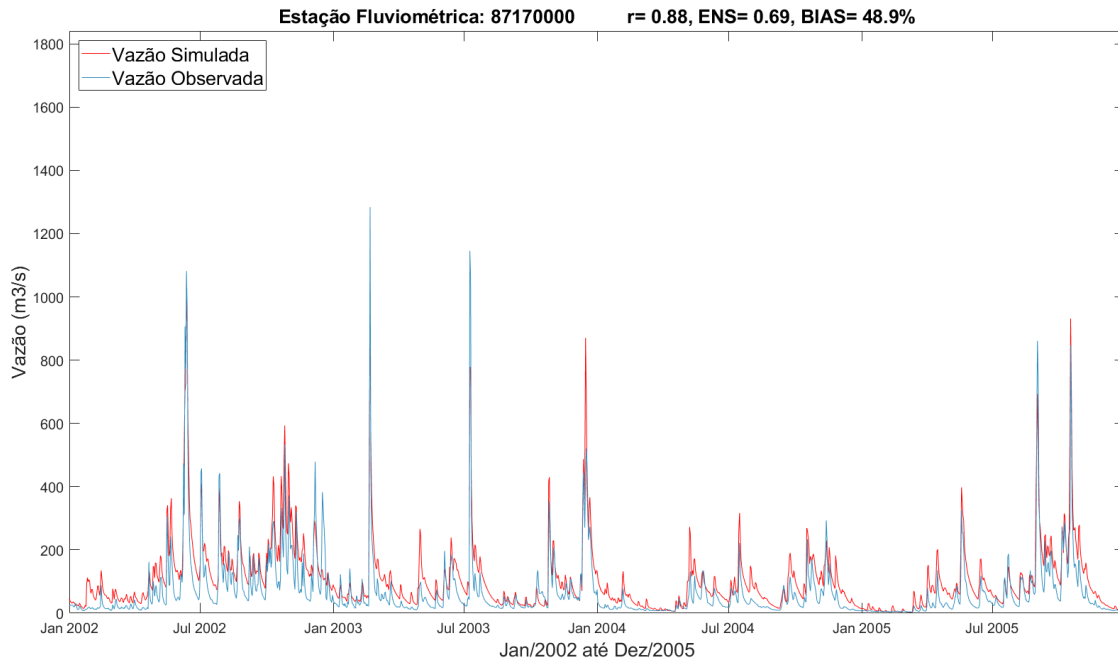
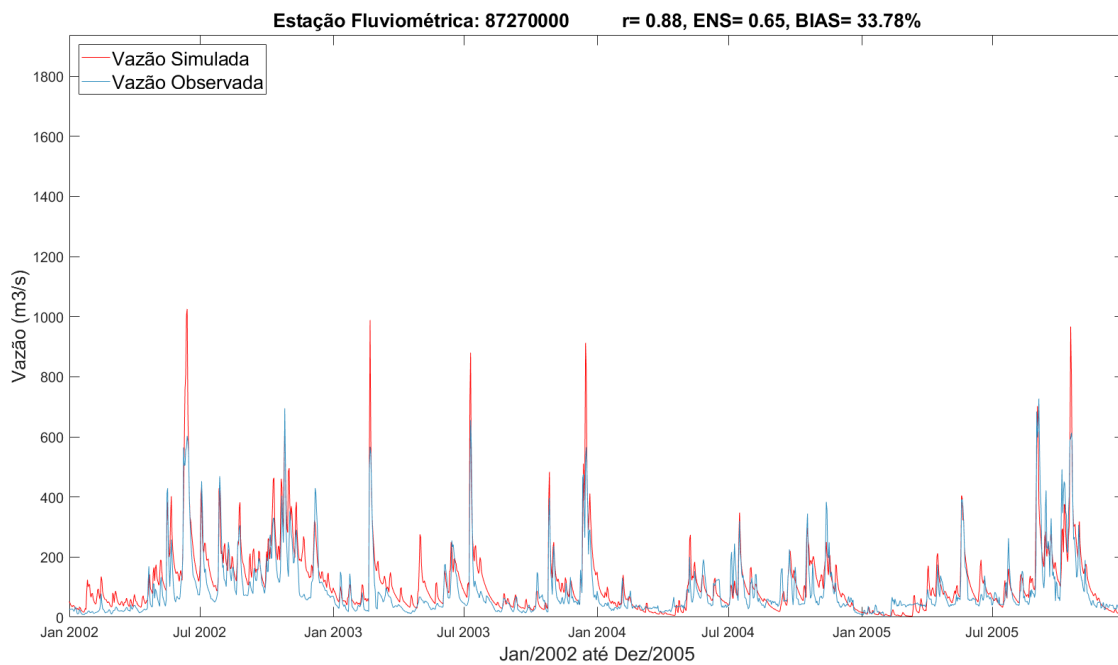
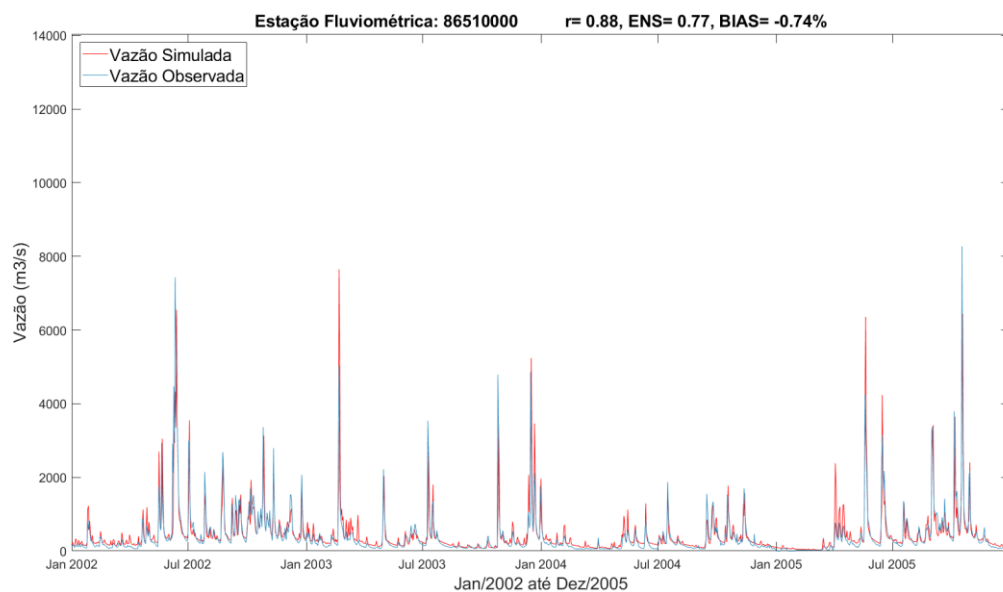


FIGURA 14. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 NO PERÍODO ENTRE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005



Os melhores resultados foram encontrados para estações localizadas em regiões onde o relevo é mais acidentado, como é o caso da estação 86510000 (rio Taquari; Figura 15). Os piores resultados de *NSE*, *r* e *BIAS* são, no geral, para as estações localizadas em regiões caracterizadas por planícies de inundação, que são melhor representadas quando utilizada uma propagação do tipo hidrodinâmica. O Apêndice I apresenta os hidrogramas com passo de tempo diário para todas as estações de interesse do presente estudo, para a etapa de calibração do modelo hidrológico, entre os anos de 1975 e 2005.

FIGURA 15. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 86510000 NO PERÍODO ENTRE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005



3.1.2 Calibração Hidrológica: Resultados Mensais

Além dos valores de descarga líquida diários, são apresentadas também as vazões médias mensais simuladas e observadas. Os valores de *NSE*, *r* e *BIAS* para as estações fluviométricas, considerados os valores mensais de descarga líquida, são apresentados na Figura 16 e especialmente na Figura 17, Figura 18 e Figura 19, respectivamente. A partir da Figura 16, observa-se que 77%, 15% e 8% das estações apresentaram *NSE* muito bons ($>0,75$), bons (0,65-0,75) e satisfatórios (0,50-0,65), respectivamente. Nota-se que todos os postos apresentaram $r > 0,80$ e são, portanto, considerados muito bons. Também observa-se que 85% das estações apresentaram valores de *BIAS* considerados muito bons e 15% considerados insatisfatórios. Esses resultados são equivalentes àqueles encontrados para os valores diários de vazões. Isso é esperado, uma vez que o *BIAS* considera a soma de todos os valores de cada série. A fim de exemplificar e comparar com os hidrogramas diários, na Figura 20 e Figura 21 são apresentados os hidrogramas mensais dos valores simulados e observados para as estações 87270000 (rio Caí) e 86510000 (rio Taquari), respectivamente. Na Tabela 4 apresenta-se um resumo das métricas encontradas no período de calibração para os valores diários e mensais observados e simulados com o

MGB para cada estação fluviométrica. O Apêndice III apresenta os hidrogramas para todas as estações de interesse do presente estudo, com passo de tempo mensal, para o período de calibração do modelo, entre os anos de 1975 e 2005.

FIGURA 16. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE, PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA, UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO MGB, CONSIDERANDO AS VAZÕES MENSAIS

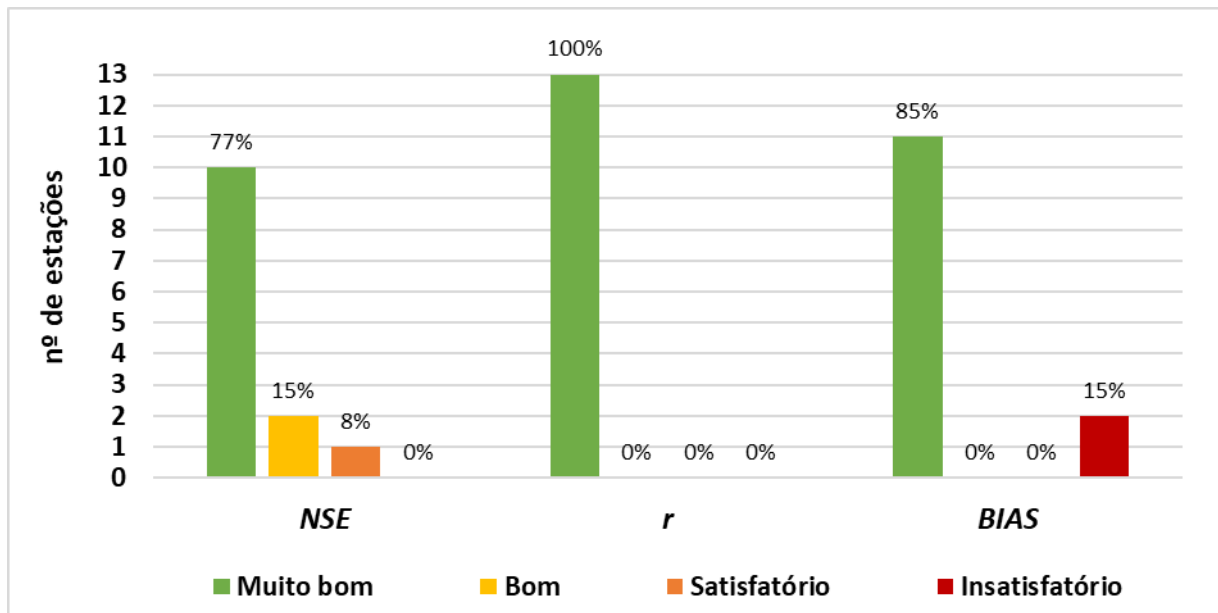


TABELA 4. RESUMO DAS MÉTRICAS DE PERFORMANCE DO MODELO MGB PARA AS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA NA ETAPA DE CALIBRAÇÃO (1975-2005)

Estação/ Rio	Área de drenagem (km ²)	r		NSE		BIAS (%)	
		Diário	Mensal	Diário	Mensal	Diário	Mensal
85400000/ Jacuí	14000	0,85	0,93	0,71	0,84	-1,07	-0,81
85600000/ Vacacaí	6780	0,80	0,91	0,64	0,83	-3,40	-3,34
85623000/ São Sepé	690	0,76	0,93	0,52	0,86	-4,86	-4,92
85735000/ Pardo	1340	0,79	0,93	0,62	0,83	-6,11	-6,19
85900000/ Jacuí	38700	0,77	0,97	0,55	0,93	4,44	4,60
86100000/ Antas	1820	0,73	0,82	0,52	0,68	-3,52	-3,43
86410000/ Turvo	2820	0,90	0,96	0,80	0,92	0,45	0,58
86500000/ Carreiro	1820	0,85	0,96	0,72	0,91	-3,76	-3,70
86510000/ Taquari	16000	0,88	0,97	0,77	0,92	-0,74	-0,57
86560000/ Guaporé	2030	0,86	0,94	0,72	0,88	-1,09	-1,02
87170000/ Caí	3030	0,88	0,93	0,69	0,53	48,90	49,13
87270000/ Caí	4360	0,88	0,94	0,65	0,67	33,78	33,84
87380000/ dos Sinos	2900	0,87	0,92	0,75	0,81	-9,23	-9,44

FIGURA 17. COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH E SUTCLIFFE (NSE) PARA AS VAZÕES MENSAIS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 1975-2005

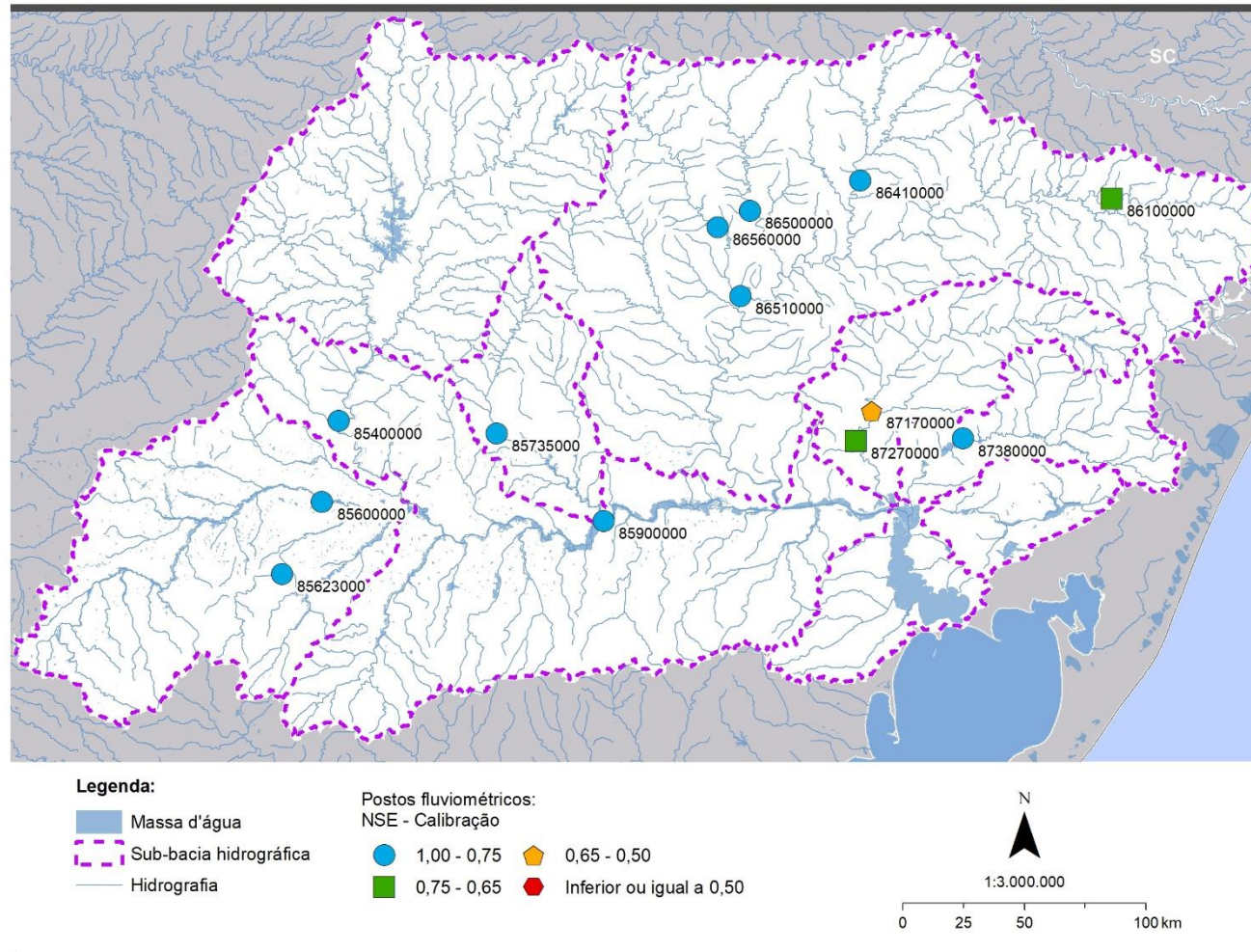


FIGURA 18. VALORES DE *BIAS* PARA AS VAZÕES MENSAIS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 1975-2005

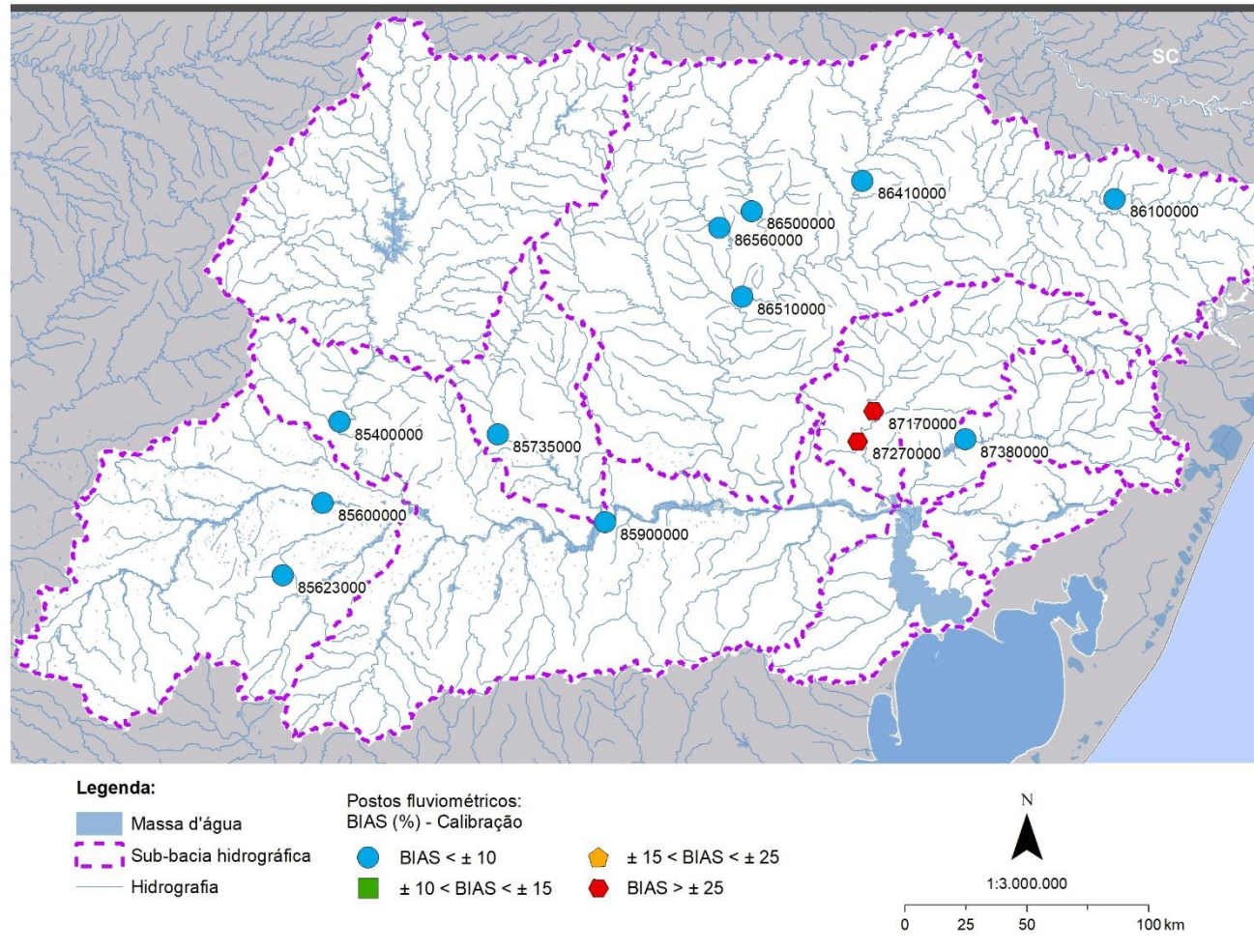


FIGURA 19. VALORES DE r PARA AS VAZÕES MENSAIS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 1975-2005

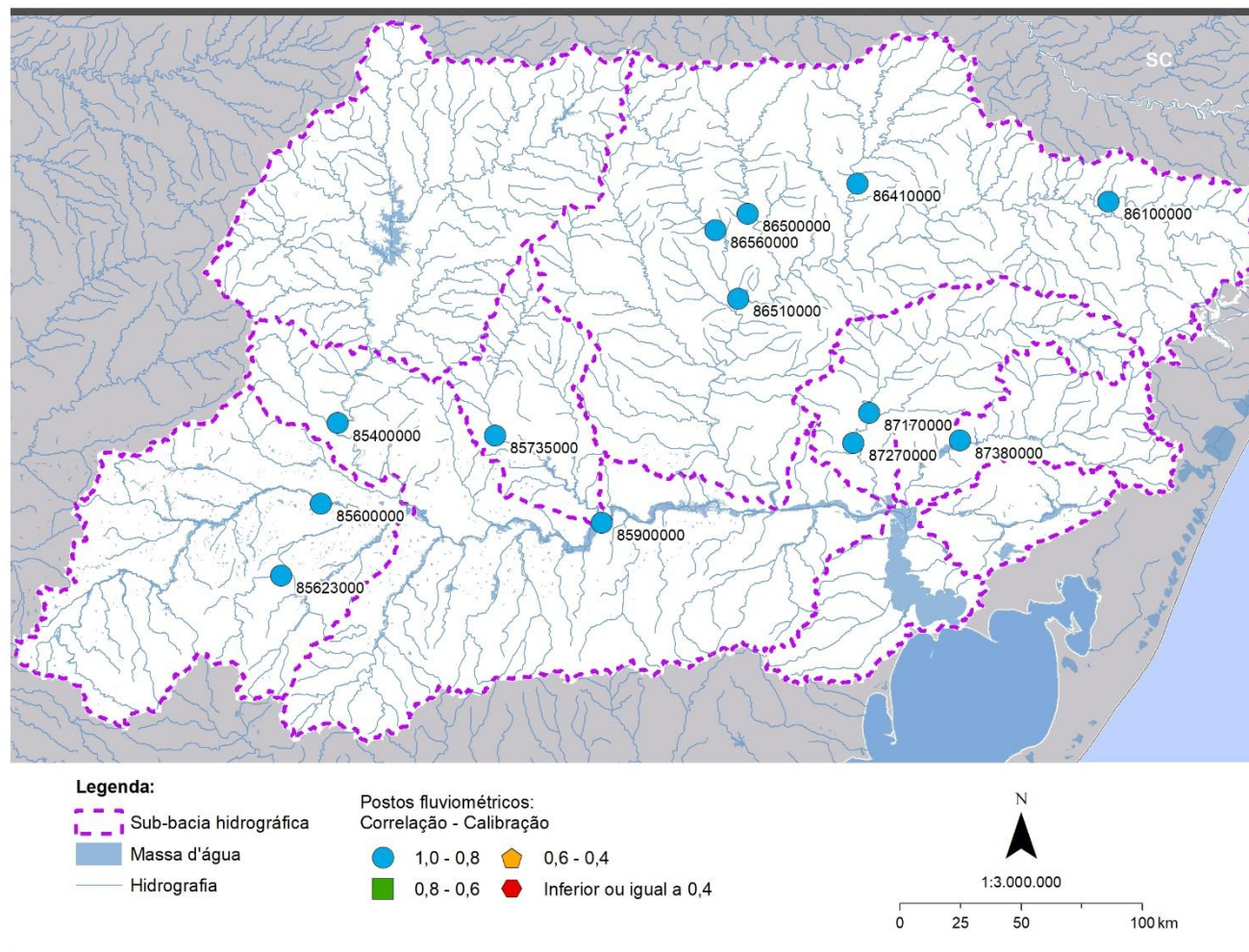


FIGURA 20. HIDROGRAMAS MENSAIS OBSERVADO E SIMULADO NA ESTAÇÃO 86270000 DE 1975 A 2005

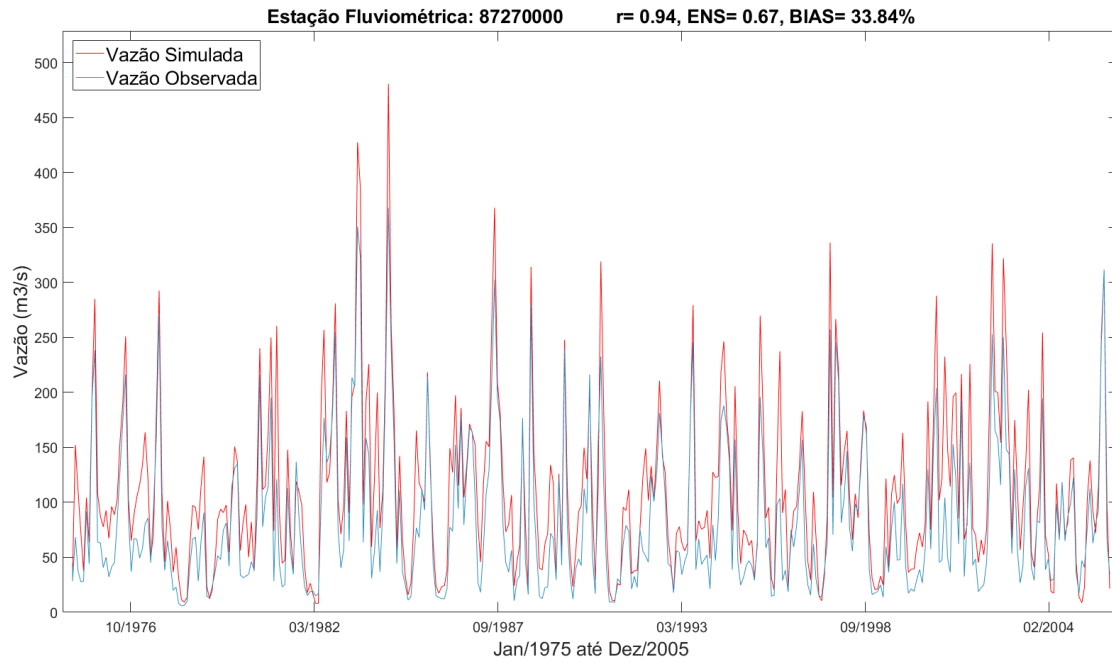
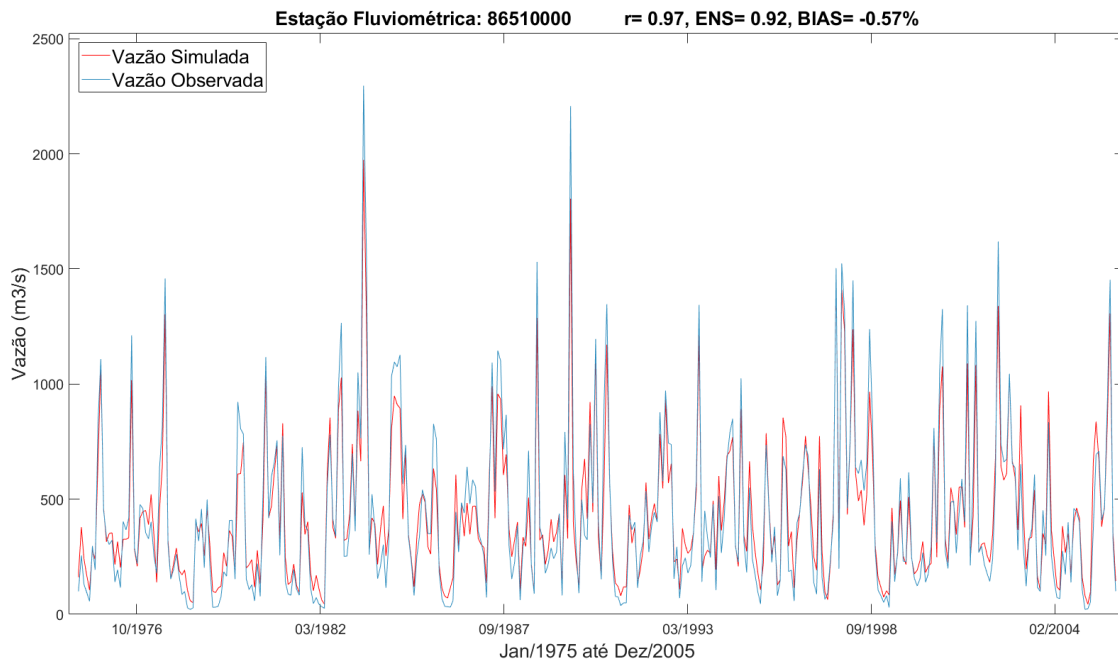


FIGURA 21. HIDROGRAMAS MENSAIS OBSERVADO E SIMULADO NA ESTAÇÃO 86510000 DE 1975 A 2005



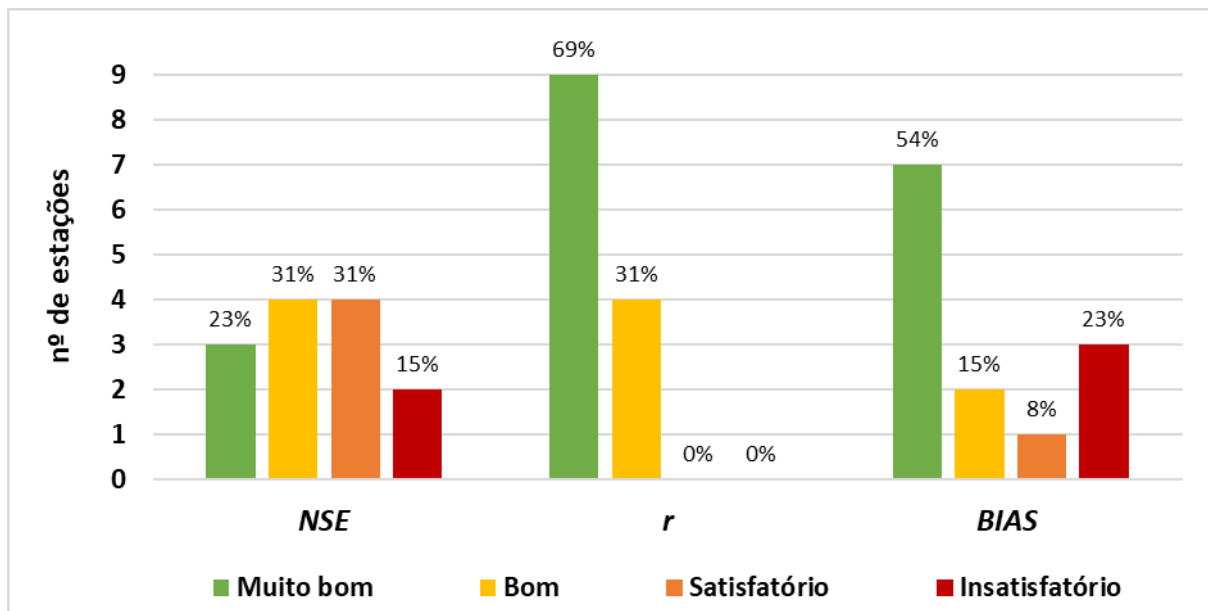
3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Para etapa de validação, são apresentados os resultados para: (1) valores diários de descarga líquida simulada e observada; e (2) valores mensais de descarga líquida simulada e observada.

3.2.1 Validação Hidrológica: Resultados Diários

Os resultados do *NSE*, *BIAS* e *r* calculados entre as vazões diárias observadas e aquelas simuladas com o modelo hidrológico MGB são apresentados de forma resumida na Figura 22 e, especialmente, na Figura 23, Figura 24 e Figura 25, respectivamente. Da Figura 22, nota-se que 54% das estações apresentaram valores de *NSE* superiores a 0,65 (bons ou muito bons), 31% apresentaram resultados satisfatórios (0,50-0,65), e 15% - as estações 85735000 (rio Pardo, *NSE*= 0,42) e 85900000 (rio Jacuí, *NSE*=0,48) - apresentaram resultados insatisfatórios. Pode-se também observar, na Figura 22, que 69% das estações apresentaram resultados de *r* considerados muito bons e 31% considerados bons, resultados equivalentes àqueles observados na etapa de calibração. A Figura 22 mostra ainda que 54%, 15%, 8% e 23% apresentaram resultados do *BIAS* considerados, respectivamente, muito bons, bons, satisfatórios e insatisfatórios.

FIGURA 22. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE, PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA, UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO DO MODELO MGB, CONSIDERANDO AS VAZÕES DIÁRIAS



O Apêndice II apresenta os hidrogramas com passo de tempo diário para todas as estações de interesse do presente estudo para o período de validação do modelo, entre os anos 2006 até 2015.

FIGURA 23. COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH E SUTCLIFFE (NSE) PARA AS VAZÕES DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 2006-2015

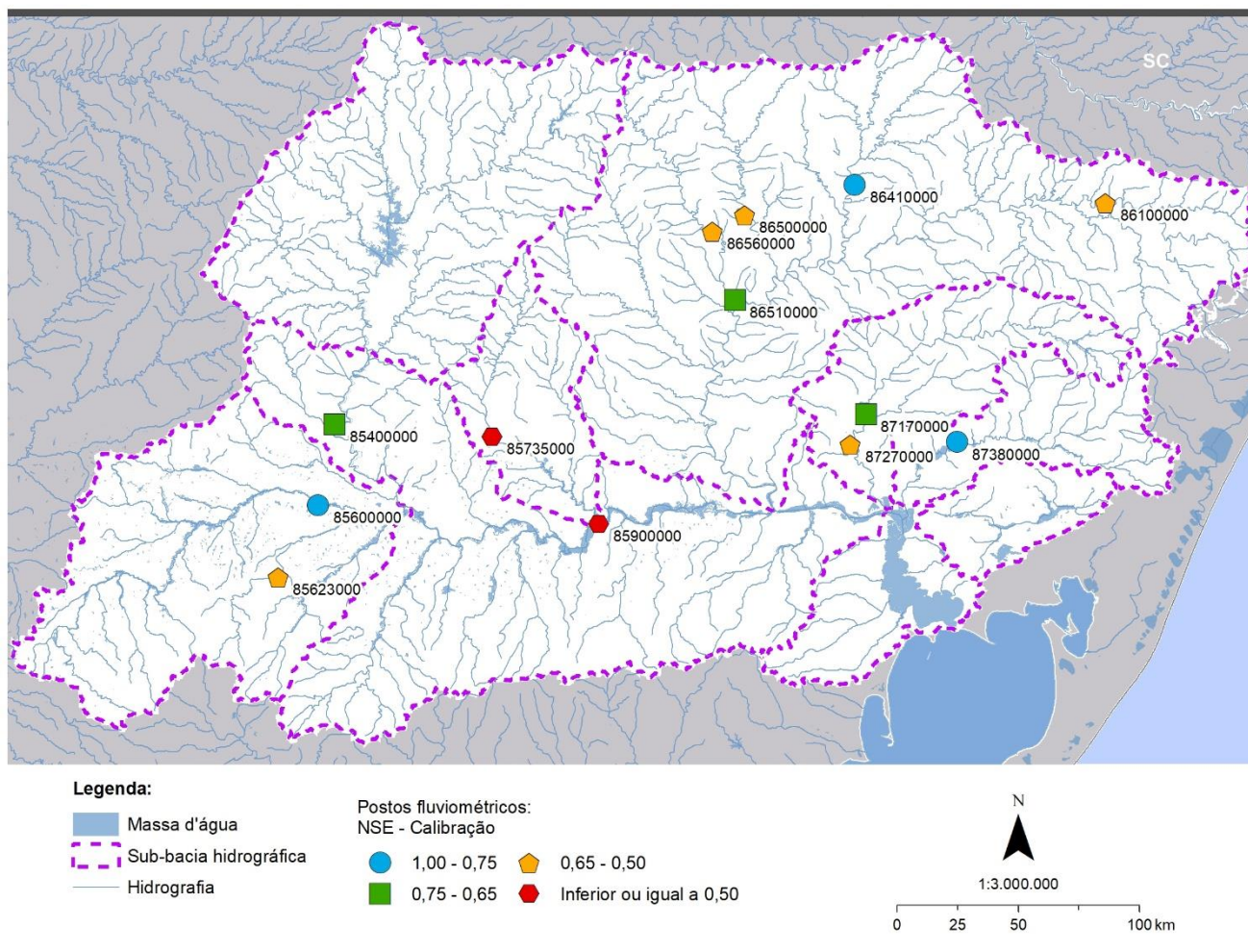


FIGURA 24. VALORES DE *BIAS* PARA AS VAZÕES DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 2006-2015

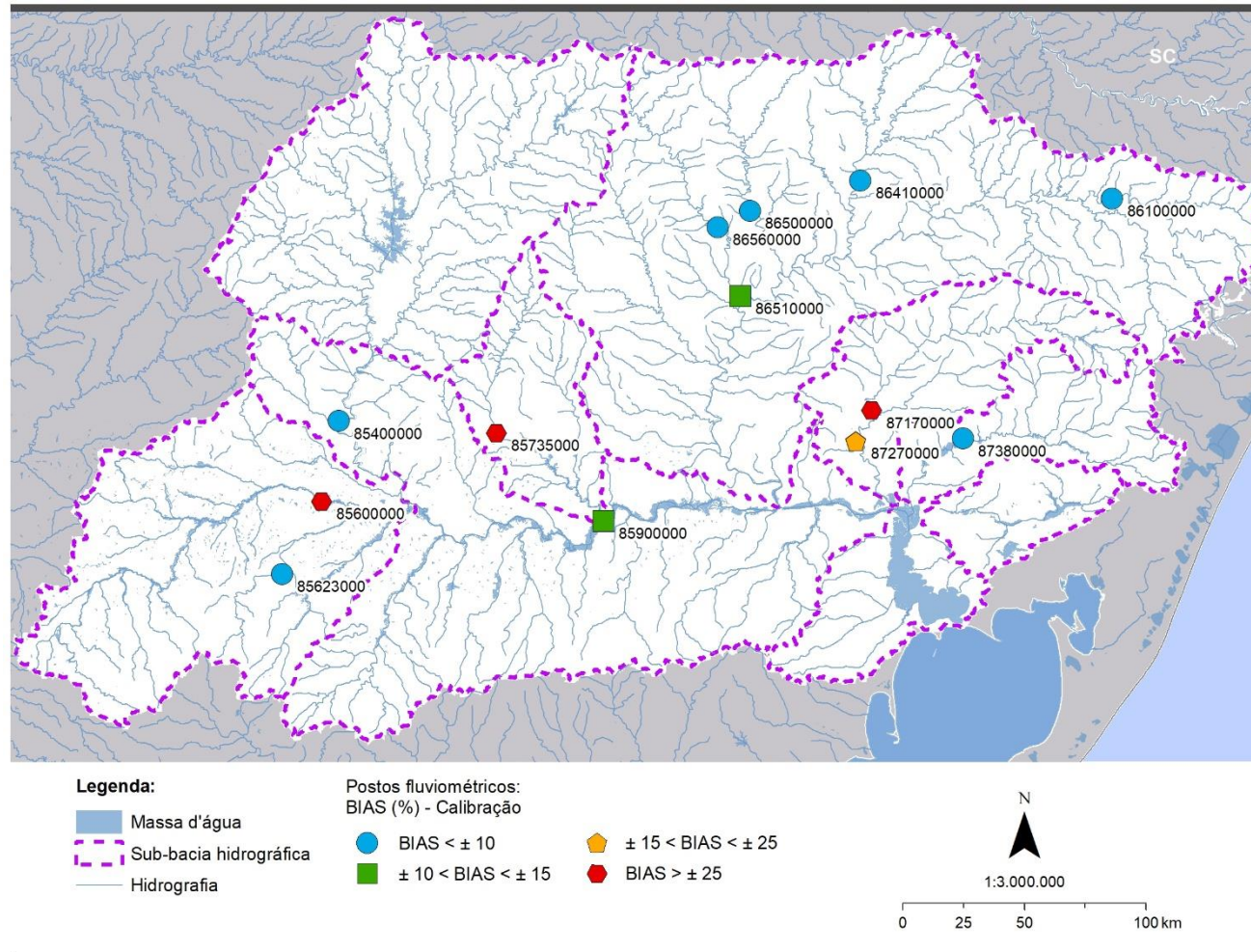
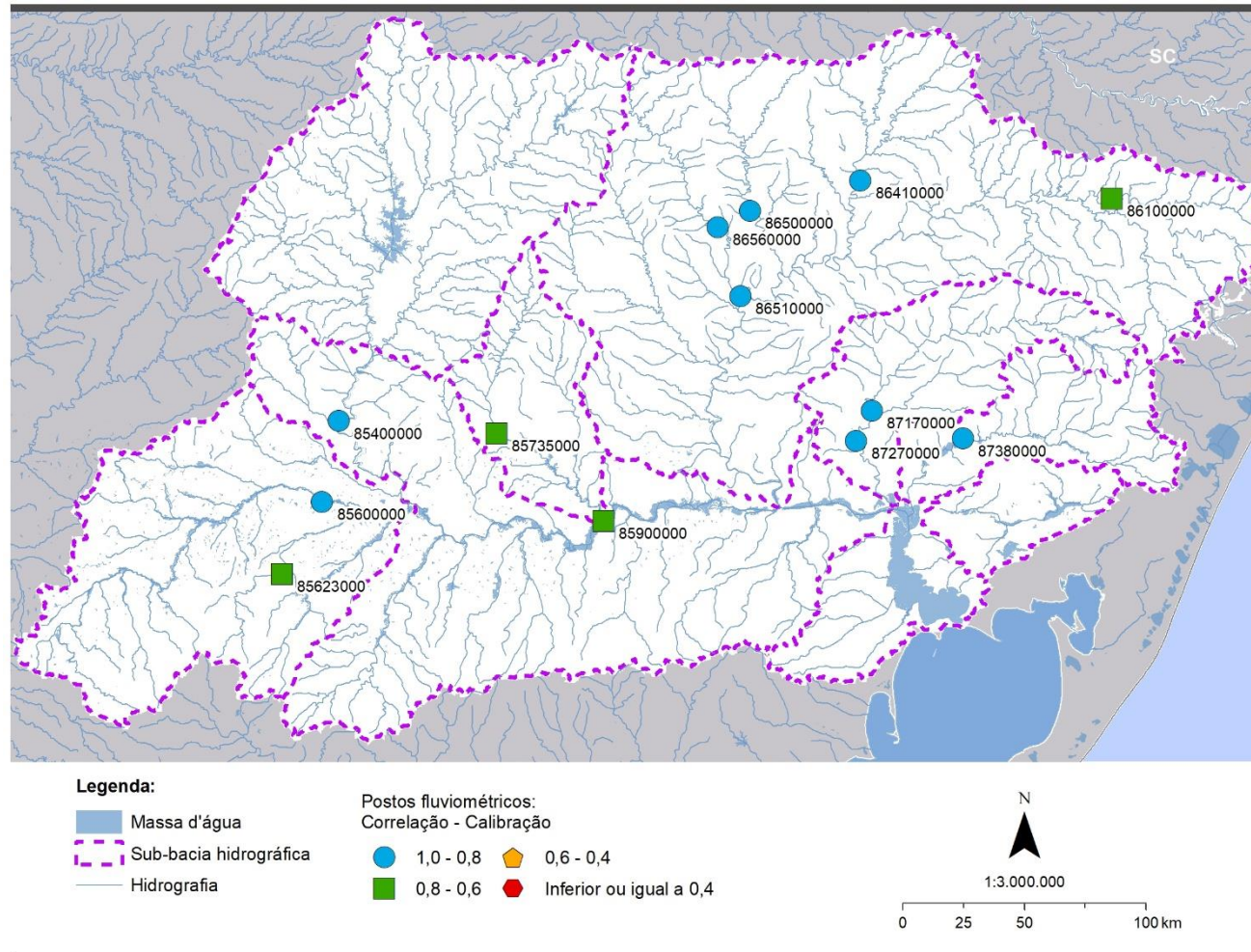


FIGURA 25. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON r ENTRE PARA AS VAZÕES DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 2006-2015



Percebe-se que para as métricas *NSE* e *BIAS*, no geral, os resultados foram piores na etapa de validação se comparada à etapa de calibração. Essa situação é comum, no âmbito da modelagem hidrológica, visto que os parâmetros são modificados buscando a aproximação do comportamento geral da série disponível, no período de calibração. Contudo, o comportamento geral da dinâmica das vazões de um rio pode sofrer variações ao longo do tempo, seja por pequenas alterações climáticas ou mesmo em decorrência de alterações fisiográficas, que não conseguem ser captadas mesmo por modelos como o MGB, que são calibrados levando em consideração o tipo e cobertura do solo.

Destaca-se que a estação 87270000 (rio Caí), que apresentou um *BIAS* insatisfatório no período de calibração, apresentou um *BIAS* satisfatório no período de validação (Figura 26). A estação 85600000 (rio Vacacaí), que apresentou um valor de *NSE* satisfatório na etapa de calibração, apresentou um valor muito bom na etapa de validação. Com relação às estações 85735000 (rio Pardo) e 85900000 (rio Jacuí), elas apresentam comportamentos bem distintos, uma vez que a primeira possui uma área de drenagem menor e é menos influenciada por planícies de inundação. Como ambas encontram-se dentro da mesma sub-bacia, priorizou-se acertar os picos dos hidrogramas da estação 85735000 (rio Pardo) na etapa de calibração, sem deixar de observar os resultados da estação 85900000 (Rio Jacuí). Apesar dos resultados das métricas para a estação 85735000 (rio Pardo), observa-se na Figura 27 que os resultados simulados com o MGB representam bem o comportamento da dinâmica das vazões observadas. Esse fato reforça a importância da análise quantitativa e qualitativa dos resultados da modelagem hidrológica.

FIGURA 26. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 PARA O PERÍODO ENTRE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015

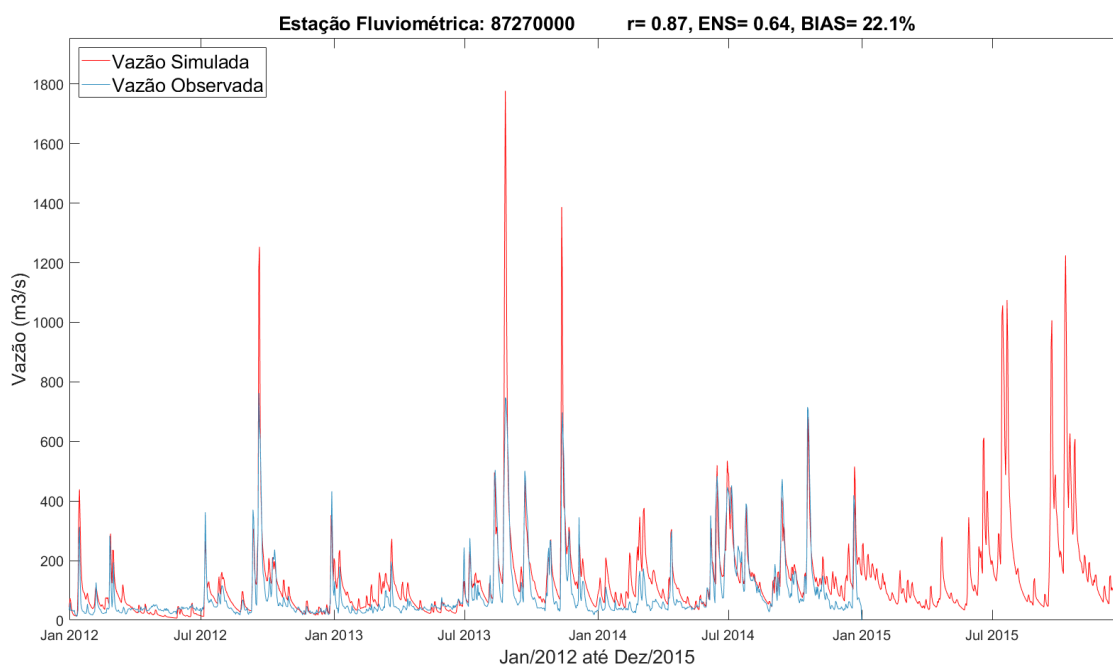
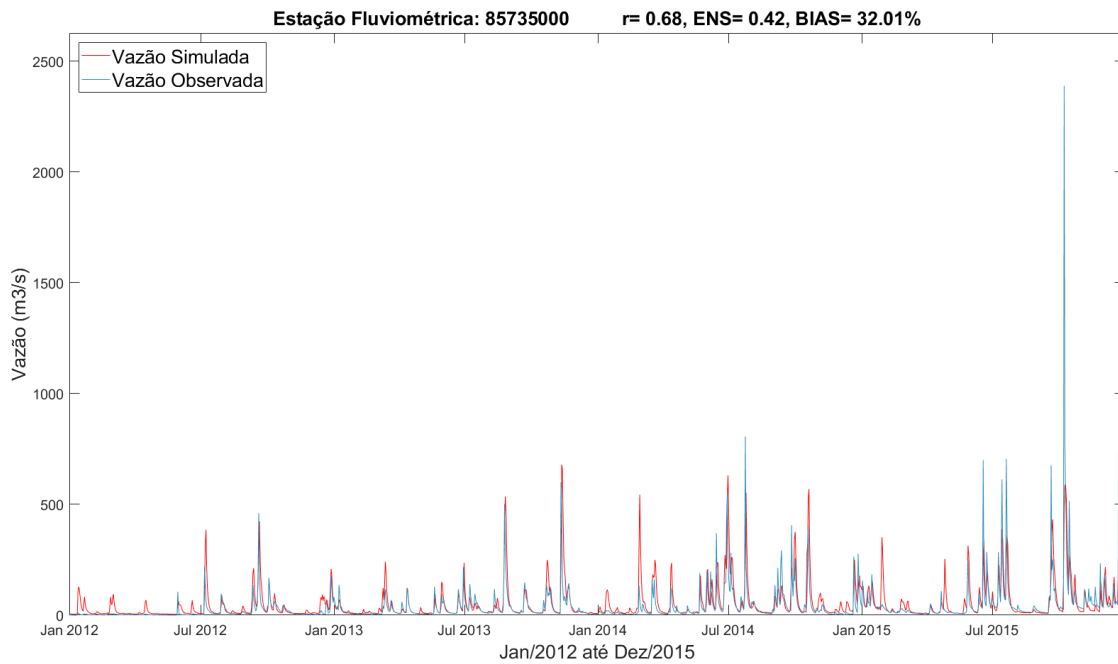
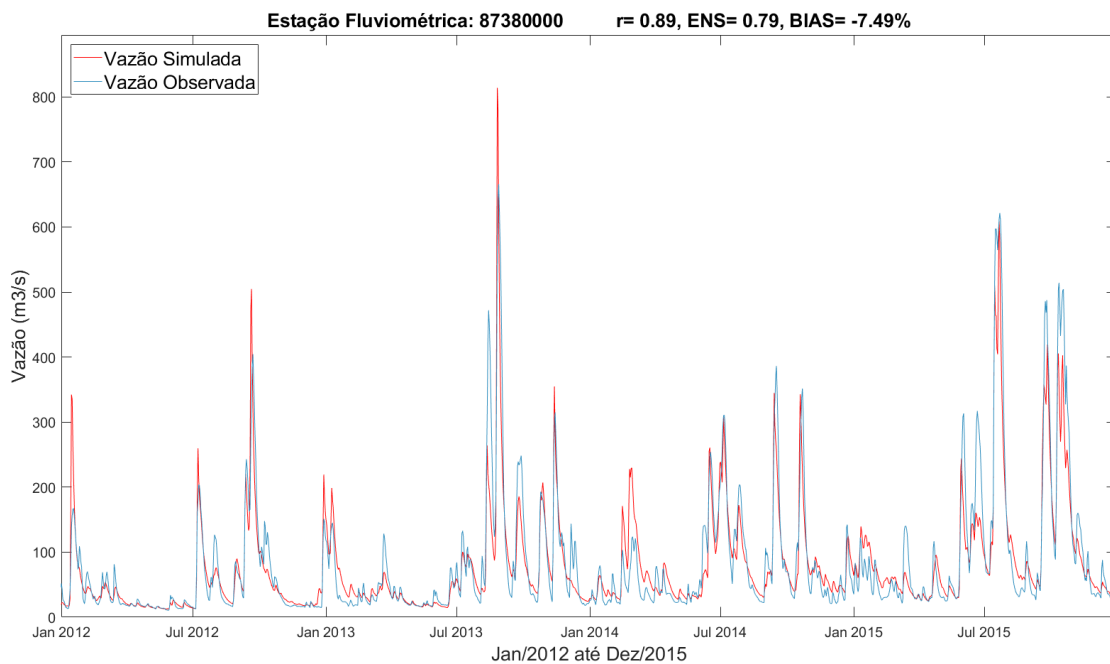


FIGURA 27. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 85735000 PARA O PERÍODO ENTRE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015



Um dos melhores resultados na etapa de validação foi encontrado na estação 87380000 (rio dos Sinos) e o hidrograma dessa estação é apresentado na Figura 28.

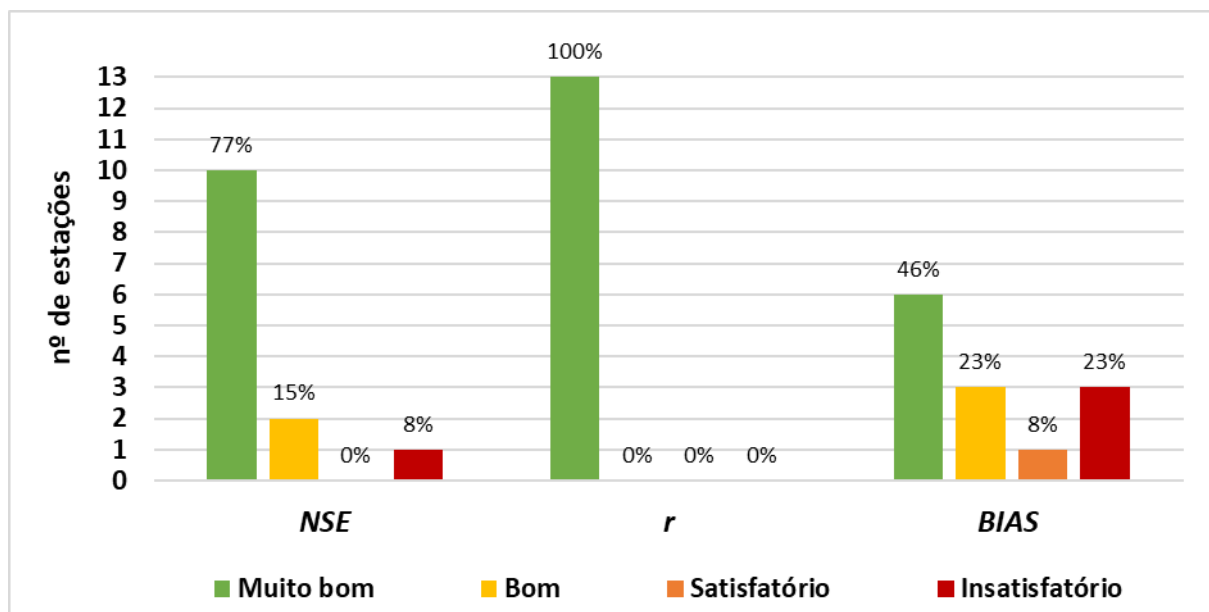
FIGURA 28. HIDROGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87380000 PARA O PERÍODO ENTRE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015



3.2.2 Validação Hidrológica: Resultados Mensais

Os valores de *NSE*, *r* e *BIAS* para as vazões mensais, nas estações fluviométricas, são apresentados, na Figura 29, de forma gráfica e especialmente na Figura 30, Figura 31 e Figura 32, respectivamente. A partir da Figura 29, observa-se que apenas a estação 87170000 (rio Caí) apresentou resultado insatisfatório e que 64% das estações apresentaram resultados considerados muito bons (>0,75). Todos os postos apresentaram $r > 0,80$ e são, portanto, considerados muito bons (Figura 29). Esta figura ainda mostra que 69% das estações apresentaram valores de *BIAS* considerados muito bons ou bons e 23% considerados insatisfatórios. Na Figura 33 e na Figura 34, são apresentados os hidrogramas mensais simulados e observados para as estações 85735000 (rio Pardo) e 87380000 (rio dos Sinos) como exemplos demonstrativos dos resultados obtidos. Na Tabela 5, apresenta-se um resumo das métricas encontradas no período de validação para os valores diários e mensais observados e simulados com o MGB para cada estação fluviométrica.

FIGURA 29. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE, PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA, UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO DO MODELO MGB, CONSIDERANDO AS VAZÕES MENSAIS



O Apêndice IV apresenta os hidrogramas mensais das vazões líquidas para o período de validação do modelo, entre os anos de 2006 e 2015.

FIGURA 30. COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH E SUTCLIFFE (NSE) PARA AS VAZÕES MENSAIS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 2006-2015

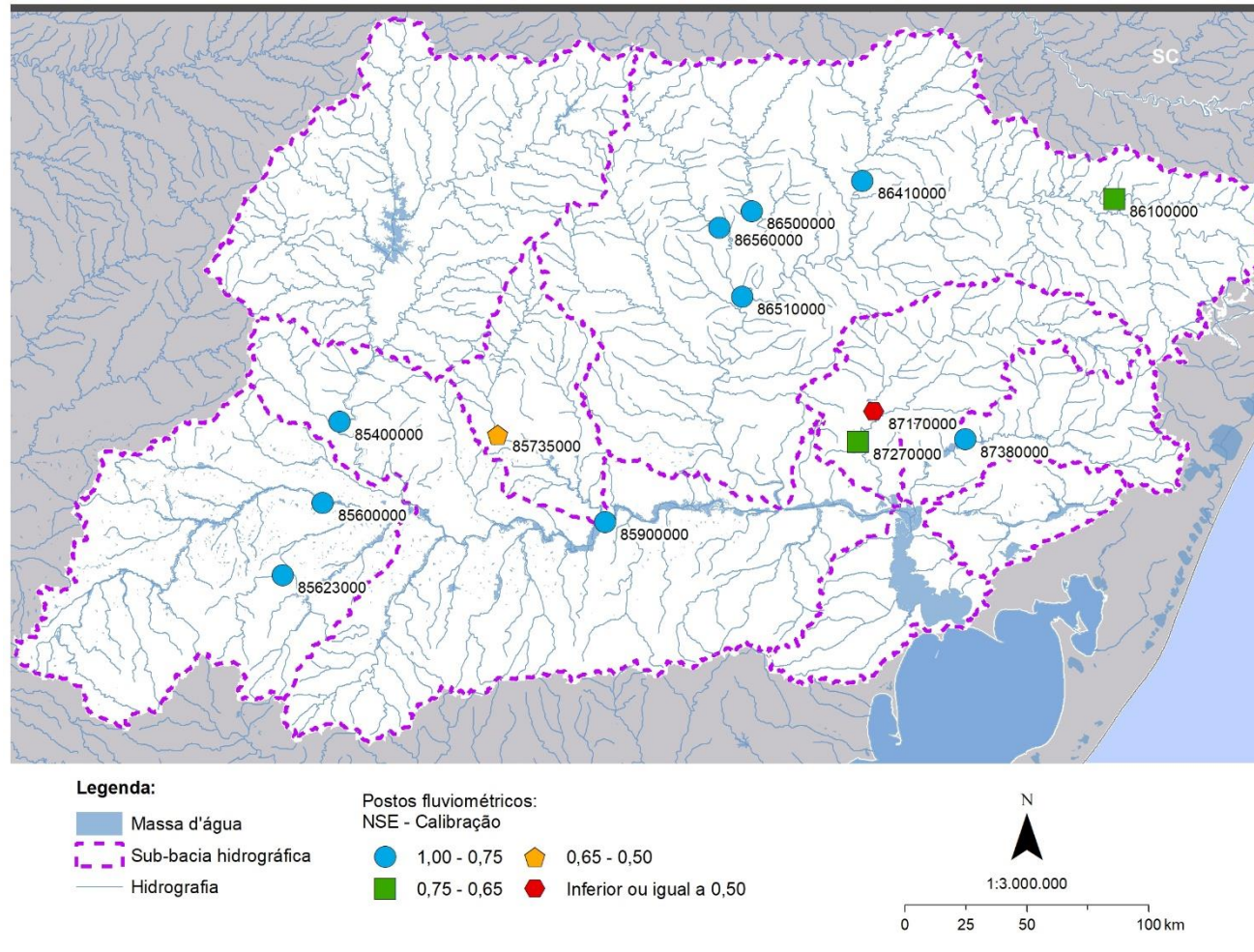


FIGURA 31. VALORES DE *BIAS* PARA AS VAZÕES MENSAIS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 2006-2015

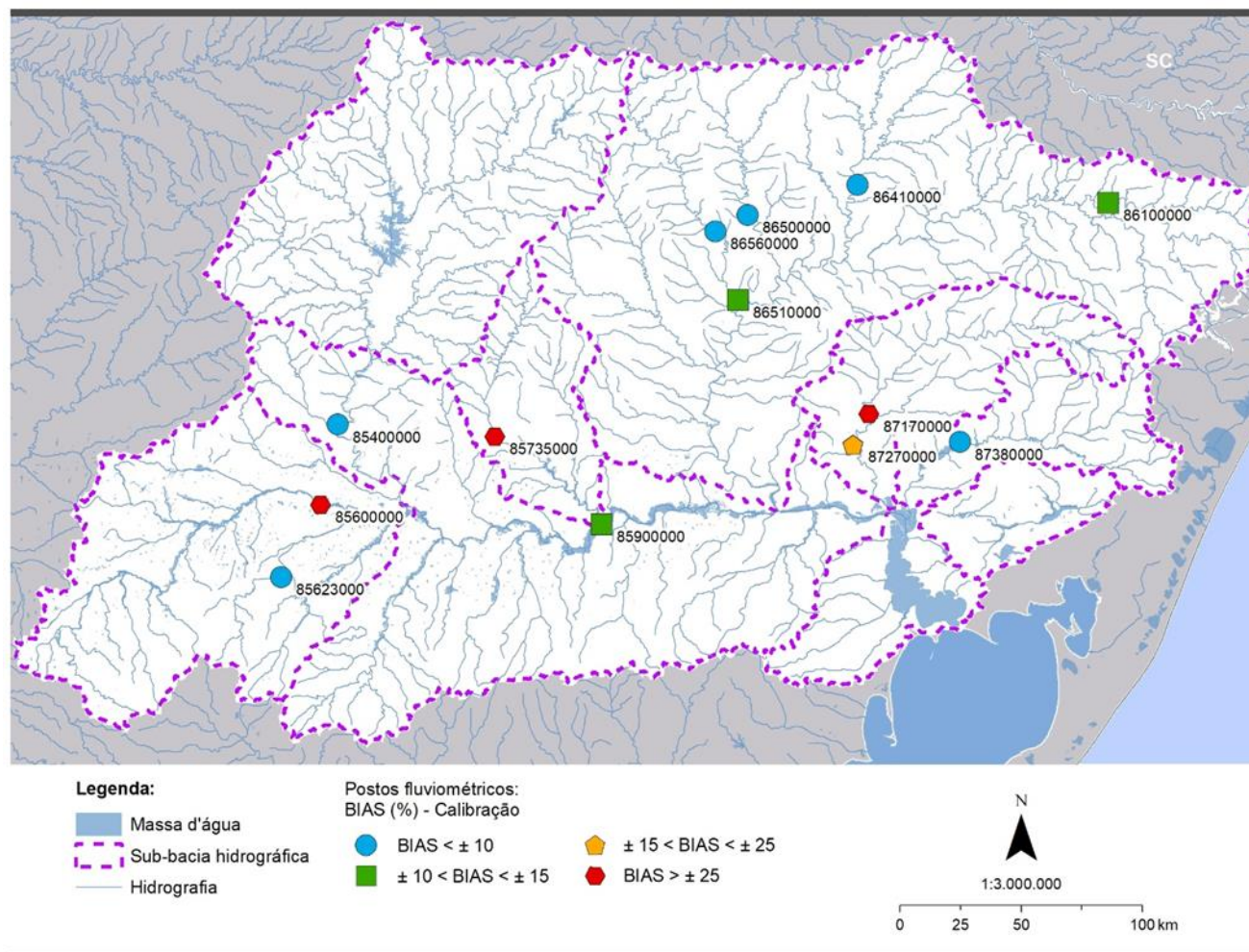


FIGURA 32. VALORES DE r PARA AS VAZÕES MENSAIS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 2006-2015

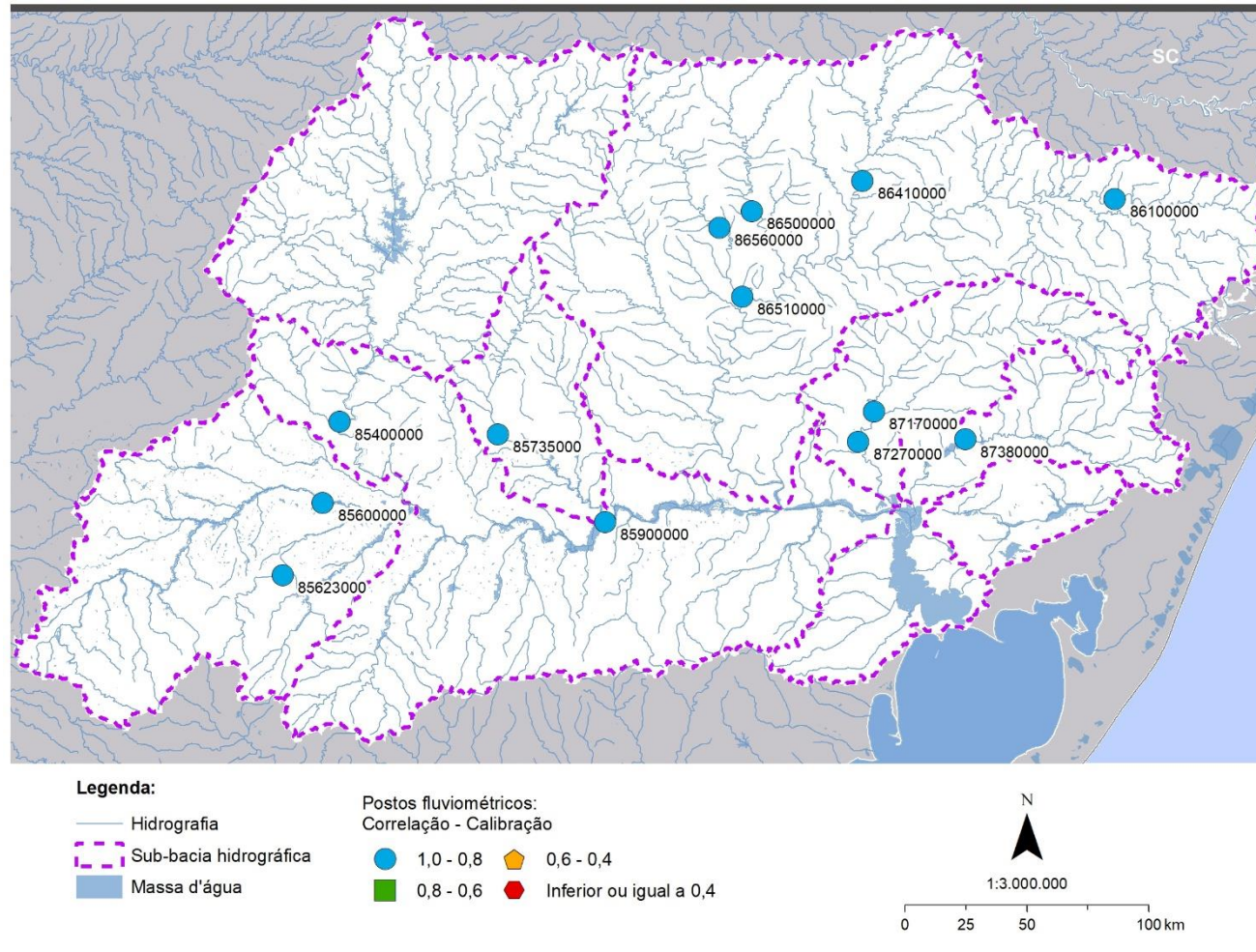


FIGURA 33. HIDROGRAMAS MENSAIS OBSERVADO E SIMULADO NA ESTAÇÃO 85735000 DE 2006 A 2015

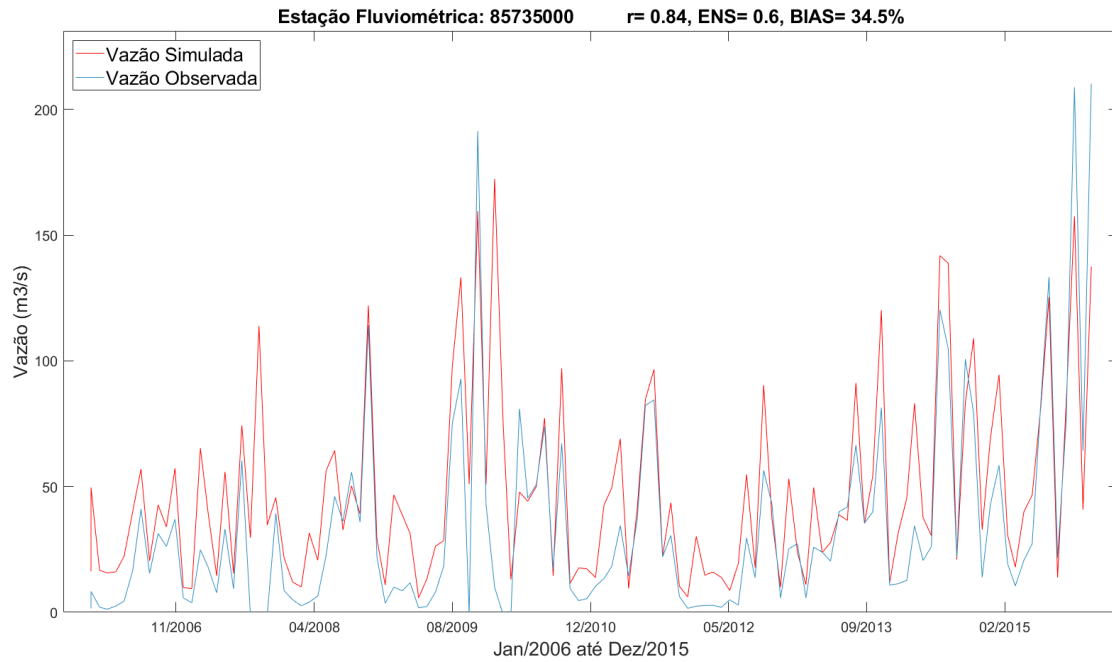


FIGURA 34. HIDROGRAMAS MENSAIS OBSERVADO E SIMULADO NA ESTAÇÃO 87380000 DE 2006 A 2015

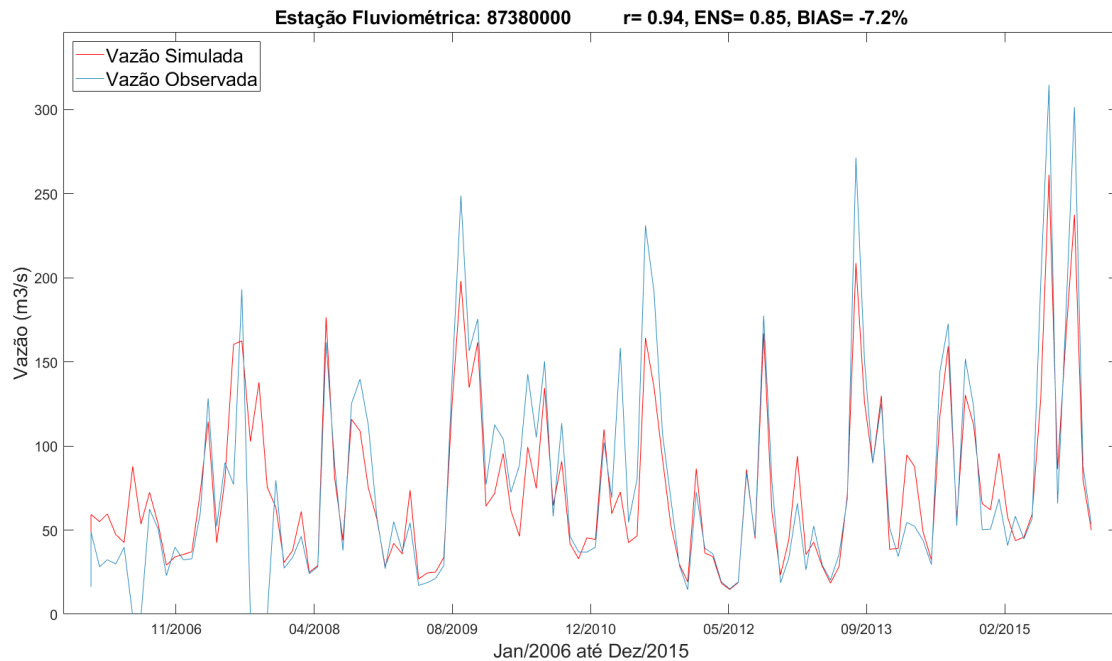


TABELA 5. RESUMO DAS MÉTRICAS DE PERFORMANCE DO MODELO MGB PARA AS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA NA ETAPA DE VALIDAÇÃO (2006-2015)

Estação/ Rio	Área de drenagem (km ²)	<i>r</i>		<i>NSE</i>		<i>BIAS</i> (%)	
		Diário	Mensal	Diário	Mensal	Diário	Mensal
85400000/ Jacuí	14000	0,84	0,92	0,71	0,84	3,17	3,13
85600000/ Vacacaí	6780	0,90	0,97	0,76	0,88	26,03	26,67
85623000/ São Sepé	690	0,76	0,95	0,55	0,90	5,32	5,71
85735000/ Pardo	1340	0,68	0,84	0,42	0,60	32,01	34,50
85900000/ Jacuí	38700	0,77	0,94	0,48	0,86	12,43	12,39
86100000/ Antas	1820	0,76	0,86	0,57	0,72	-9,47	-10,47
86410000/ Turvo	2820	0,92	0,98	0,83	0,96	4,11	4,76
86500000/ Carreiro	1820	0,81	0,95	0,65	0,89	4,35	4,83
86510000/ Taquari	16000	0,88	0,98	0,74	0,93	13,53	13,84
86560000/ Guaporé	2030	0,81	0,94	0,50	0,85	9,28	9,47
87170000/ Caí	3030	0,92	0,96	0,71	0,41	64,52	64,78
87270000/ Caí	4360	0,87	0,92	0,64	0,74	22,10	22,26
87380000/ dos Sinos	2900	0,89	0,94	0,79	0,85	-7,49	-7,20

3.3 CALIBRAÇÃO X VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO – VALORES DIÁRIOS

Para facilitar a comparação dos resultados e avaliação da performance do modelo MGB, no período de calibração (1975-2005) e de validação (2006-2015), apresenta-se a Tabela 6. São apresentados apenas os valores das métricas para escala de tempo diária, pois essa foi a escala adotada na etapa de calibração do modelo MGB.

Nota-se, na Tabela 6, que os valores do coeficiente *r* melhoraram em algumas estações e pioraram em outras na etapa de validação, mas que em média o valor foi de 0,83 em ambas as etapas. As maiores variações foram para as estações 85600000 (que aumenta de 0,80 para 0,90) e na estação 85735000 (que diminui de 0,79 para 0,68). Nessas duas estações também ocorreram grandes variações de *NSE*, com aumento do valor de 0,64 para 0,76 na estação 85600000 e uma redução de 0,62 para 0,42 na estação 85735000. Além dessas duas, outra estação que sofreu grande variação de *NSE* foi a 86560000 (0,72 para 0,50). Apesar disso, em média, os valores de *NSE* passaram de 0,67 para 0,64. O *BIAS* foi a métrica que sofreu maiores variações, havendo melhorias apenas nas estações 87270000 e 87380000. Apesar das grandes variações apresentadas para essa métrica, nota-se que elas não são tão significativas. Por exemplo, a estação 86510000 teve uma piora, entretanto ainda assim o valor de 13,53% é considerado bom no contexto da modelagem hidrológica. A maior piora para o *BIAS* aconteceu para a estação 85600000 que passou de 3,4 (muito bom) para 26,03 (insatisfatório).

TABELA 6. RESULTADOS ESTATÍSTICOS DACALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO MGB PARA VAZÕES DIÁRIAS OBSERVADAS E SIMULADAS.

Estação/ Rio	Área de drenagem (km ²)	<i>r</i>			<i>NSE</i>			BIAS (%)		
		Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ
85400000/ Jacuí	14000	0,85	0,84	-0,01	0,71	0,71	0,00	1,07	3,17	2,10
85600000/ Vacacaí	6780	0,80	0,90	0,10	0,64	0,76	0,12	3,4	26,03	22,64
85623000/ São Sepé	690	0,76	0,76	0,00	0,52	0,55	0,03	4,86	5,32	0,46
85735000/ Pardo	1340	0,79	0,68	-0,11	0,62	0,42	0,20	6,11	32,01	25,90
85900000/ Jacuí	38700	0,77	0,77	-0,00	0,55	0,48	-0,07	4,44	12,43	7,99
86100000/ Antas	1820	0,73	0,76	0,03	0,52	0,57	0,05	3,52	9,47	5,95
86410000/ Turvo	2820	0,90	0,92	0,02	0,80	0,83	0,03	0,45	4,11	3,66
86500000/ Carreiro	1820	0,85	0,81	-0,04	0,72	0,65	-0,07	3,76	4,35	0,59
86510000/ Taquari	16000	0,88	0,88	0,00	0,77	0,74	-0,03	0,74	13,53	12,79
86560000/ Guaporé	2030	0,86	0,81	-0,05	0,72	0,50	-0,22	1,09	9,28	8,19
87170000/ Caí	3030	0,88	0,92	0,04	0,69	0,71	0,02	48,9	64,52	15,61
87270000/ Caí	4360	0,88	0,87	-0,01	0,65	0,64	-0,01	33,78	22,1	-11,68
87380000/ dos Sinos	2900	0,87	0,89	0,02	0,75	0,79	0,04	9,23	7,49	-1,75
MÉDIA		0,83	0,83	0,00	0,67	0,64	-0,03	9,34	16,45	7,11

Os valores na tabela são referentes as métricas *NSE*, *BIAS* e *r* para as estações fluviométricas Região Hidrográfica do Guaíba. Os valores de Δ em vermelho e verde representam a piora e melhora, respectivamente, do valor da métrica no período de validação. para o *BIAS* considerou-se os valores absolutos da métrica no cálculo das diferenças relativas percentuais.

Os resultados encontrados neste estudo podem ser comparados com alguns resultados dispostos na literatura. A seguir são apresentadas algumas comparações considerando os valores diários de vazões e as métricas na etapa de calibração do modelo MGB.

Lopes et al. (2015) utilizou o modelo Muskingun-Cunge, onde realizou a modelagem hidrológica para vazões diárias na Bacia da Laguna dos Pato. Na Região Hidrográfica do Guaíba, Lopes et al. (2015) encontraram um valor de *NSE* de 0,70 para a estação 85900000 (rio Jacuí), enquanto nesse trabalho foi encontrado um valor de 0,55. Os valores de *BIAS* também foram calculados para essa estação e foram bem próximos, sendo de - 4,44% no presente trabalho e 1,9% em Lopes et al. (2015). Essas diferenças ocorrem uma vez que os períodos de calibração e validação utilizados, em ambos trabalhos, são diferentes. Enquanto neste trabalho a calibração corresponde aos anos entre 1975 e 2005 e a validação entre 2006 e 2015, em Lopes et al. (2015) os anos de calibração são entre 2001 e 2010 e a validação entre 1990 e 2000. Além disso, o escopo de ambos trabalhos também é diferente, uma vez que, em Lopes et al. (2015), os autores visavam a representação dos processos hidrológicos, de forma geral, na bacia. Para isso, é necessário que tanto os picos de escoamento, representado pelo escoamento superficial, quanto o escoamento de base, possuam a maior coerência possível entre si, o que nem sempre é possível, procurando-se encontrar, então, a melhor representação entre todos os processos. No presente trabalho, entretanto, o escopo é a representação dos processos hidrossedimentológicos. Assim, devido ao fato de os sedimentos serem gerados, majoritariamente, nas vazões de picos, priorizou-se a melhor representação desses eventos no modelo.

Comparando a performance global do modelo MGB, na Região Hidrográfica do Guaíba, no presente estudo, com a performance encontrada por Lopes et al. (2015), respectivamente, 46% e 46% das estações apresentaram valores de *NSE* superiores 0,70; 31% e 46% apresentaram valores entre 0,60-0,70; e 23% e 8% apresentaram valores entre 0,50-0,60. Com relação ao *BIAS*, o presente estudo e o trabalho de Lopes et al. (2015) apresentaram, respectivamente, 85% e 69% das estações com valores entre 0% e $\pm 10\%$; 0% e 23% das estações com valores entre $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$; 0% e 8% das estações com valores entre $\pm 20\%$ e $\pm 30\%$; e 15% e 0% com valores superiores a $\pm 30\%$. Esses resultados mostram que as performances das duas modelagens são bem semelhantes, com o trabalho de Lopes et al. (2015) apresentando um resultado levemente superior para a métrica *NSE* e o presente trabalho apresentando resultados melhores para a métrica *BIAS*.

Outro trabalho realizado na região de estudo foi o de Lopes et al. (2018). Nele, foi utilizado o modelo MGB com propagação inercial de vazões, que representa melhor alguns processos hidrológicos mais complexos, como as planícies de inundação e efeitos de remanso.

Para a maioria das estações, os valores de *NSE* encontrados por Lopes et al. (2018) ficaram semelhantes ou melhores do que os encontrados no presente estudo. Para locais caracterizados por regiões com maiores declividades, como é o caso das estações 86100000 (rio das Antas), 86410000 (rio Turvo), 86500000 (Carreiro), em sua maioria apresentaram valores semelhantes entre os dois modelos, como podemos observar pela Tabela 7. Para algumas estações que se encontram em planícies de inundação, como na 85600000 (rio Vacacaí), 85623000 (rio São Sepé) e 85900000 (rio Jacuí), houve uma melhora significativa do modelo Inercial (Lopes, et al., 2018) ao comparar com o presente modelo (MC), devido a representação mais complexa dos processos hidrológicos. Apesar disso, tanto o trabalho de Lopes et al. (2018) como o presente estudo apresentam resultados semelhantes na maioria das estações.

Em relação aos valores de *BIAS*, pode-se observar que a maioria dos resultados obtidos no presente estudo possuem um valor superior ao encontrado por Lopes et al. (2018). Os piores resultados foram encontrado para as estações 87170000 (rio Caí) e 87270000 (rio Caí), que no presente estudo apresentam valores de *BIAS* de 48,90% e 33,78% respectivamente, e no trabalho de Lopes et al. (2018), esses valores foram considerados muito bons, sendo de -2,1% e 5,5%, respectivamente.

TABELA 7. COMPARAÇÃO DA PERFORMANCE DA MODELAGEM HIDROLÓGICA DO PRESENTE ESTUDO COM OS ESTUDOS REALIZADOS POR LOPES ET AL. (2015) E LOPES ET AL. (2018)

Estação/ Rio	Área de drenagem (km ²)	<i>NSE</i>			<i>BIAS</i> (%)		
		Presente estudo	MC ¹	IN ²	Presente estudo	MC ¹	IN ²
85400000/ Jacuí	14000	0,71	-	0,11	-1,07	-	-5,3
85600000/ Vacacaí	6780	0,64	-	0,72	-3,40	-	4,7
85623000/ São Sepé	690	0,52	-	0,72	-4,86	-	-8,2
85735000/ Pardo	1340	0,62	-	-	-6,11	-	-
85900000/ Jacuí	38700	0,55	0,70	0,84	4,44	1,9	-4,1
86100000/ Antas	1820	0,52	-	0,52	-3,52	-	-26
86410000/ Turvo	2820	0,80	-	0,81	0,45	-	0,2
86500000/ Carreiro	1820	0,72	-	0,76	-3,76	-	7,9
86510000/ Taquari	16000	0,77	-	0,84	-0,74	-	9,6
86560000/ Guaporé	2030	0,72	-	0,74	-1,09	-	-9,4
87170000/ Caí	3030	0,69	-	0,61	48,90	-	-2,1
87270000/ Caí	4360	0,65	-	0,60	33,78	-	5,5
87380000/ dos Sinos	2900	0,75	-	0,66	-9,23	-	-16,4

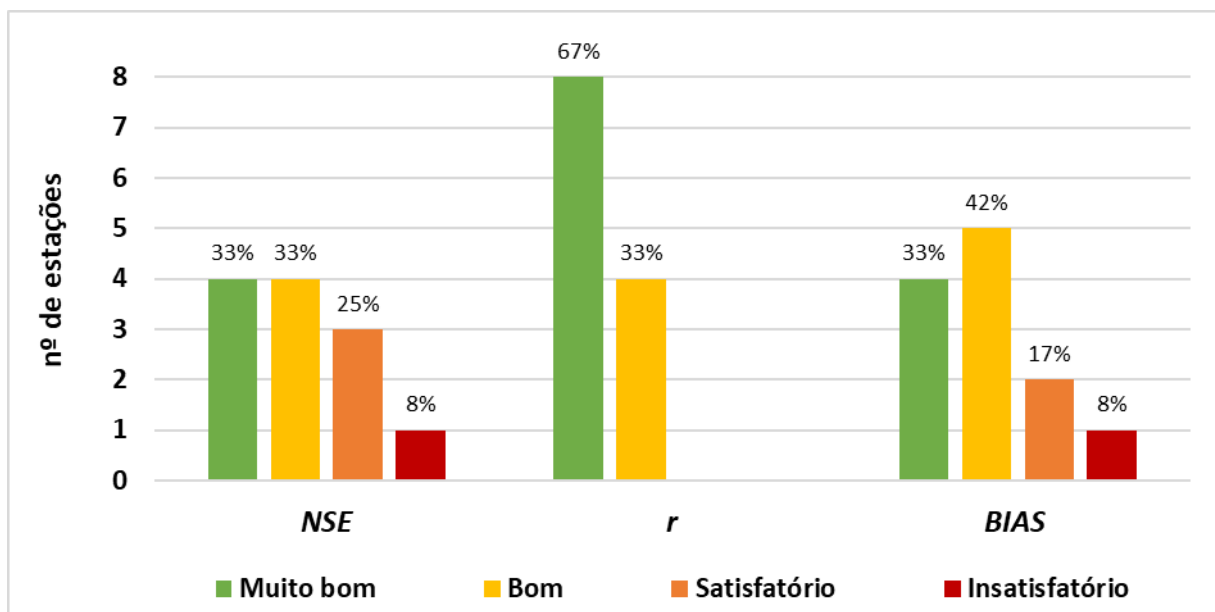
¹ Lopes et al. (2015); ² Lopes et al. (2018).

3.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO

Como os dados de descarga sólida em suspensão são pouco frequentes, nas estações sedimentométricas utilizadas no presente estudo os resultados apresentados na calibração são apenas para os valores diários de descarga sólida em suspensão, uma vez que não é possível obter com precisão os valores mensais desses dados. Na Figura 35, está apresentado um histograma para cada métrica considerando as faixas de avaliação propostas nesse trabalho. A calibração do modelo MGB-SED apresentou boa performance, com mais de 90% das estações apresentando resultados satisfatórios, bons ou muito bons para as métricas adotadas.

Especificamente sobre o *NSE*, a Figura 35 mostra que 33% das estações apresentaram resultados considerados muito bons, 33% considerado bons e 25% considerado satisfatórios. Apenas a estação 85735000 apresentou um valor considerado insatisfatório, de -0,07. O coeficiente *r* apresentou valores muito bons e bons para 67% e 33% das estações (Figura 35), respectivamente. Com relação ao *BIAS*, 75% apresentaram resultados bons ou muito bons, 17% apresentaram resultados satisfatórios e apenas a estação 85623000 apresentou resultado insatisfatório (Figura 35).

FIGURA 35. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO MGB-SED



Os valores de cada métrica para cada estação são apresentados na Tabela 8. A fim de visualizar a performance obtida, em cada estação de forma espacial ao longo da bacia, apresenta-se a Figura 36, Figura 37 e Figura 38.

TABELA 8. RESUMO DAS MÉTRICAS DE PERFORMANCE DO MODELO MGB-SED PARA AS ESTAÇÕES SEDIMENTOMÉTRICAS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA NA ETAPA DE CALIBRAÇÃO

Estação/ Rio	Área de drenagem (km²)	<i>r</i>	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i> (%)
85400000/ Jacuí	14000	0,86	0,31	-12,16
85600000/ Vacacaí	6780	0,80	0,30	-1,18
85623000/ São Sepé	690	0,75	0,36	57,71
85735000/ Pardo	1340	0,77	-0,07	-36,86
85900000/ Jacuí	38700	0,77	0,69	-15,96
86100000/ Antas	1820	0,73	0,98	-11,78
86410000/ Turvo	2820	0,89	0,18	-19,63
86500000/ Carreiro	1820	0,84	0,15	-17,09
86510000/ Taquari	16000	0,88	0,01	22,53
86560000/ Guaporé	2030	0,86	0,31	-54,50
87270000/ Caí	4360	0,88	0,60	-2,95
87380000/ dos Sinos	2900	0,87	0,50	-27,35

FIGURA 36. COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH E SUTCLIFFE (NSE) PARA AS DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 1975-2005

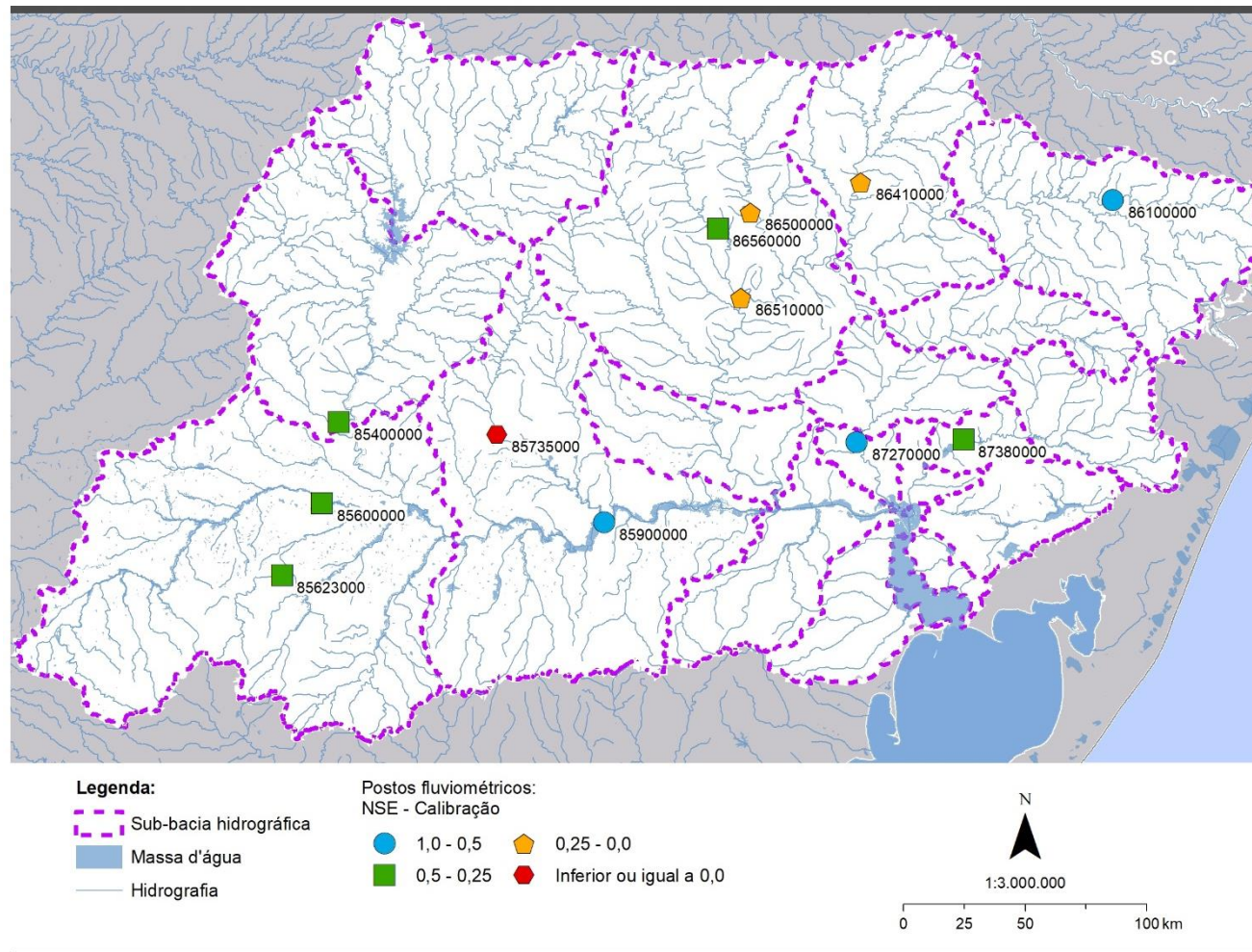


FIGURA 37. VALORES DE *BIAS* PARA AS DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 1975-2005

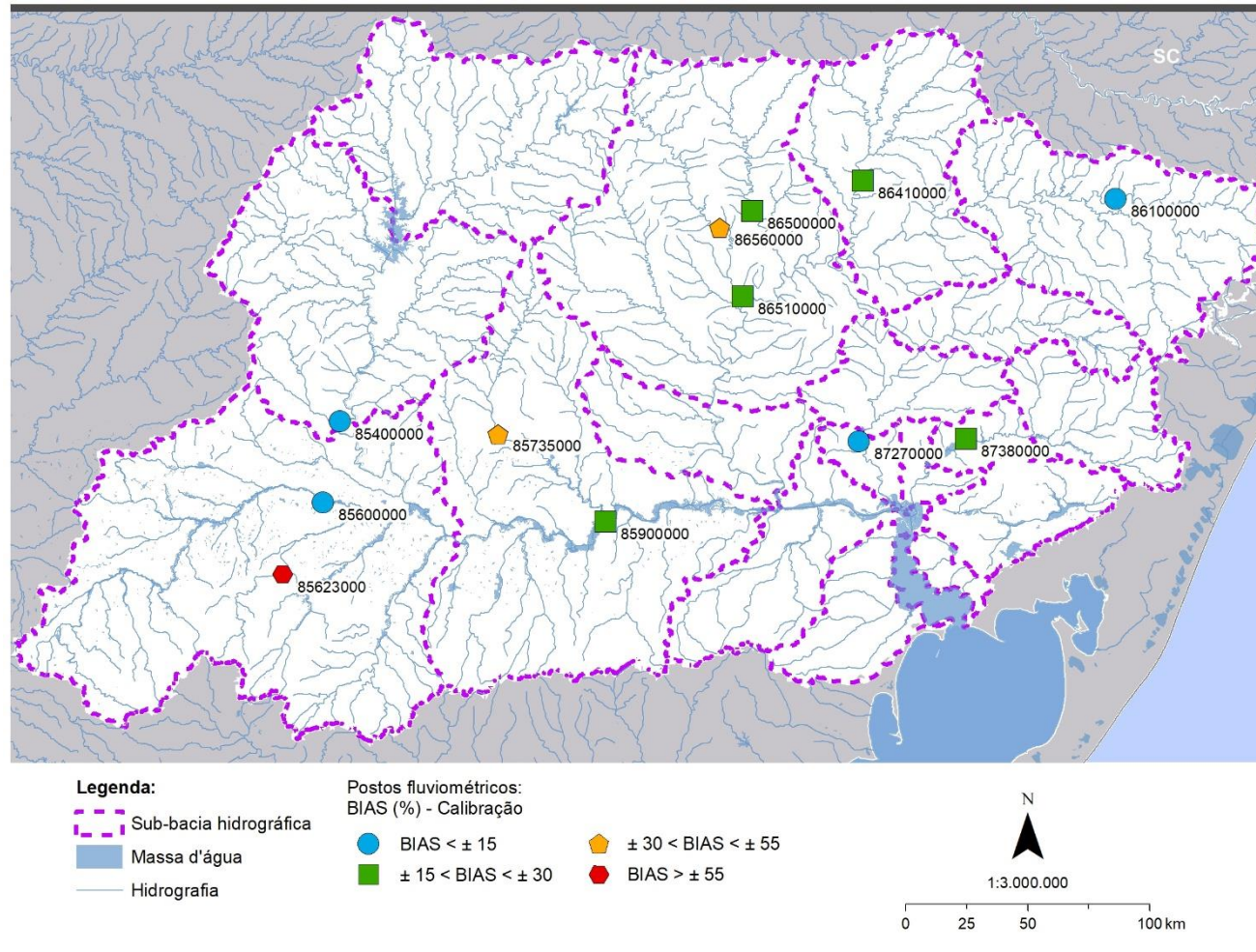
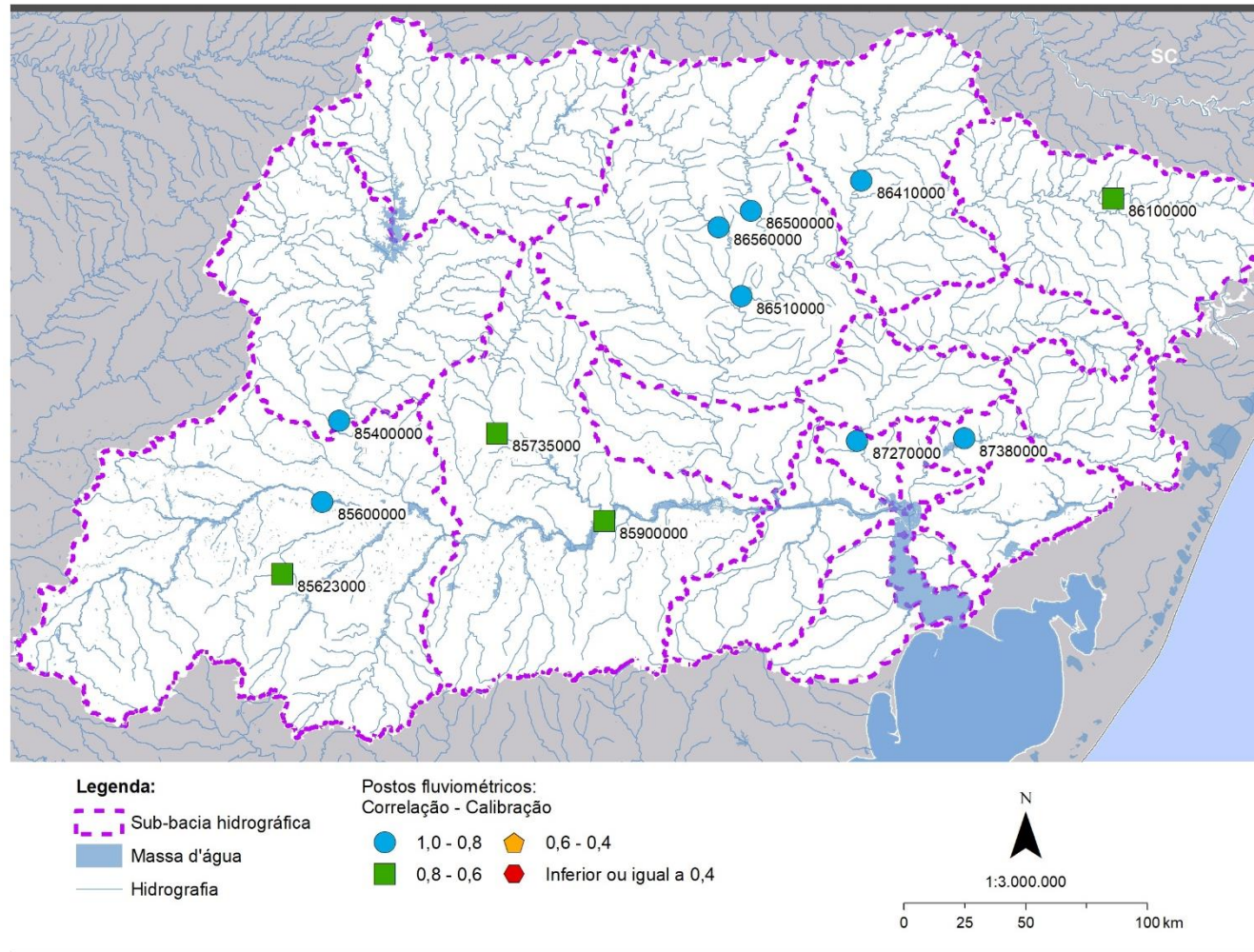


FIGURA 38. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON r ENTRE PARA AS DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 1975-2005



As estações mais próximas dos trechos de rio que serão simulados com o modelo hidrodinâmico Delft3D são as estações 85900000, 86510000, 87270000 e 8738000. Os correspondentes sedimentogramas, comparando os valores simulados e observados de descarga sólida em suspensão, são apresentados, respectivamente, na Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42. Para todas essas estações, os resultados de todas as métricas mostraram-se satisfatórios na etapa de calibração. Percebe-se que o modelo MGB-SED conseguiu representar a dinâmica dos sedimentos com valores mais baixos de QSS no período seco e valores mais altos no período chuvoso. Os resultados também evidenciam a importância do bom ajuste do modelo hidrológico na etapa de calibração, visto que o modelo de sedimentos é dependente da vazão e muitas das medições realizadas *in situ* ocorrem apenas no período seco. Assim, o bom ajuste das vazões permite uma melhor representação da dinâmica temporal dos sedimentos nos períodos de maior produção de sedimentos.

Além disso, o Apêndice V apresenta os sedimentogramas para as estações de interesse do presente estudo, para passo de tempo diário, no período de calibração do modelo, entre os anos 1975 e 2005.

FIGURA 39. SEDIMENTOGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 85900000 PARA O PERÍODO DE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005

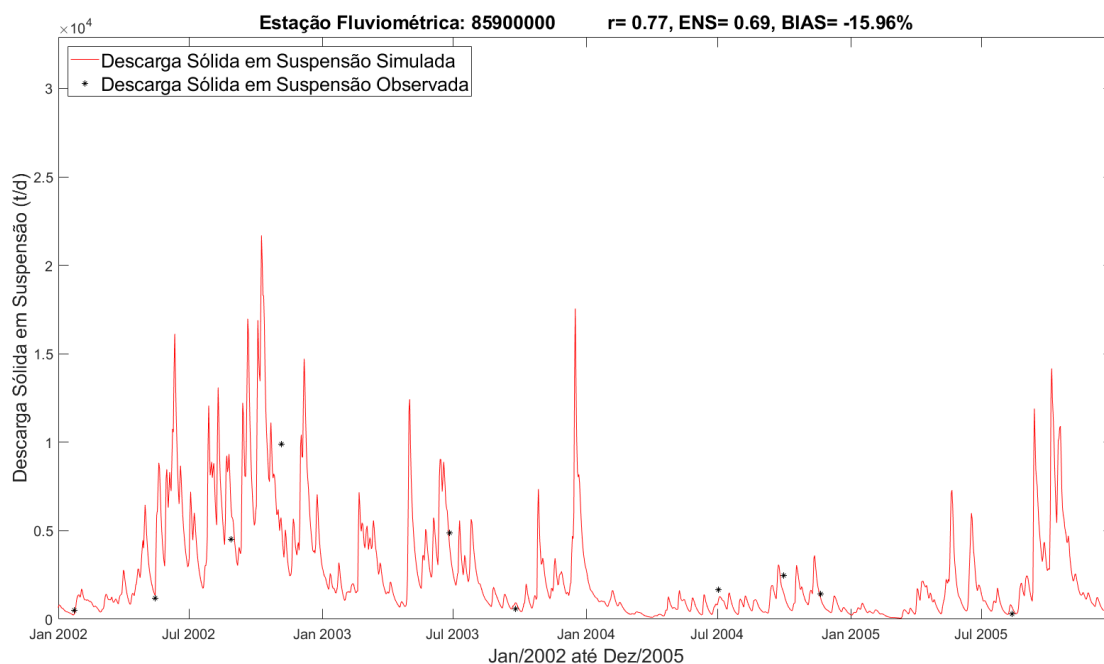


FIGURA 40. SEDIMENTOGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 86510000 PARA O PERÍODO DE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005

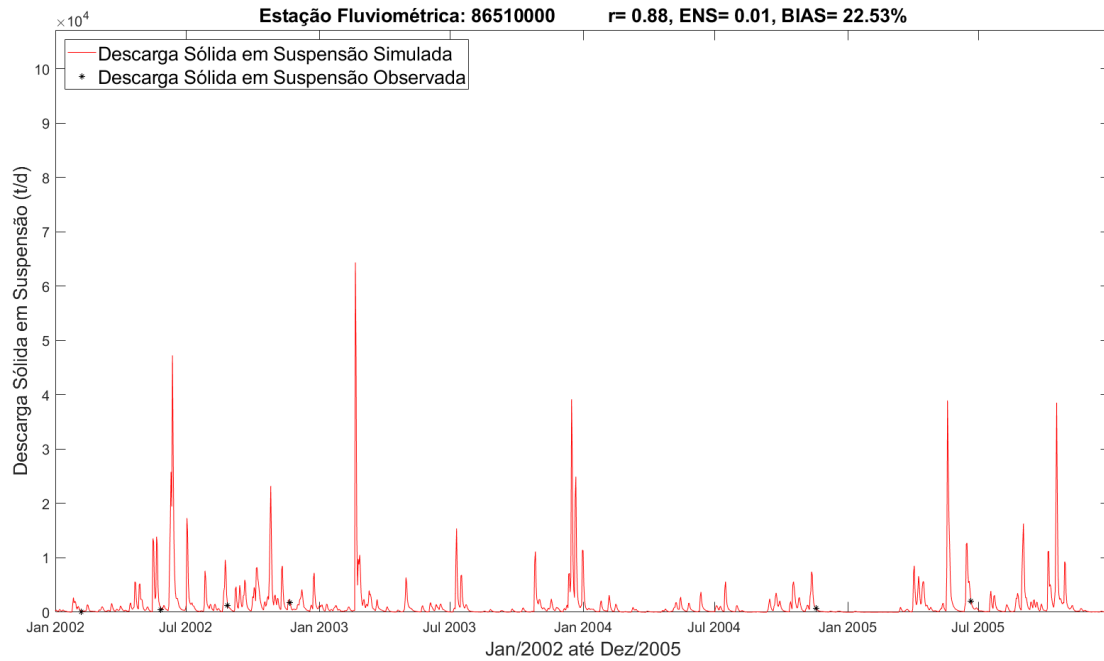


FIGURA 41. SEDIMENTOGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 PARA O PERÍODO DE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005

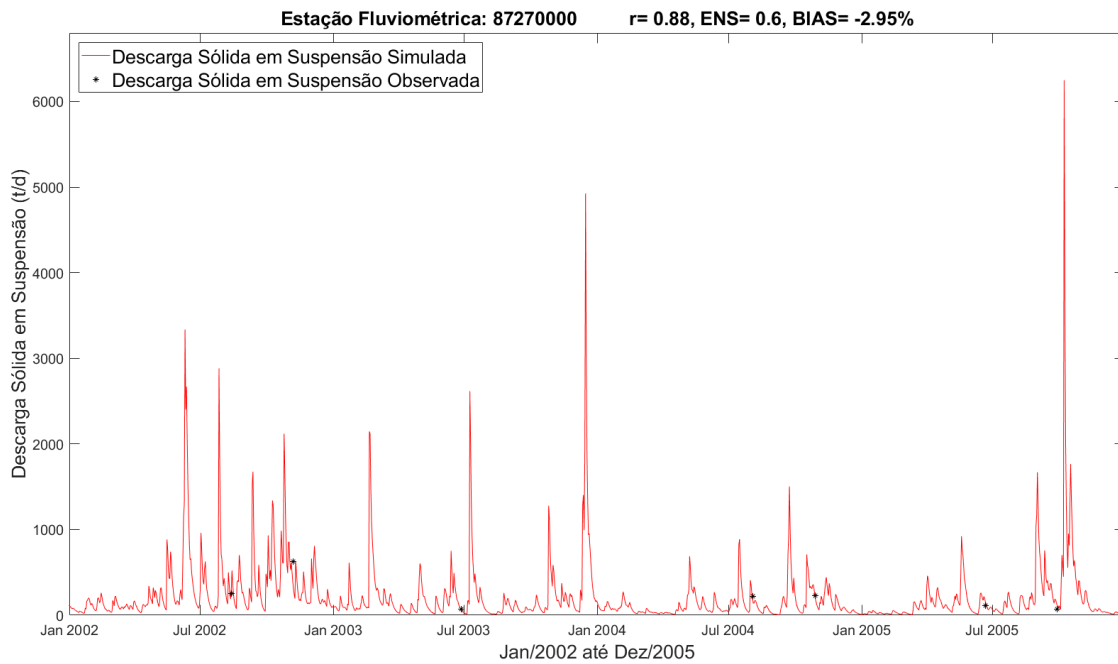
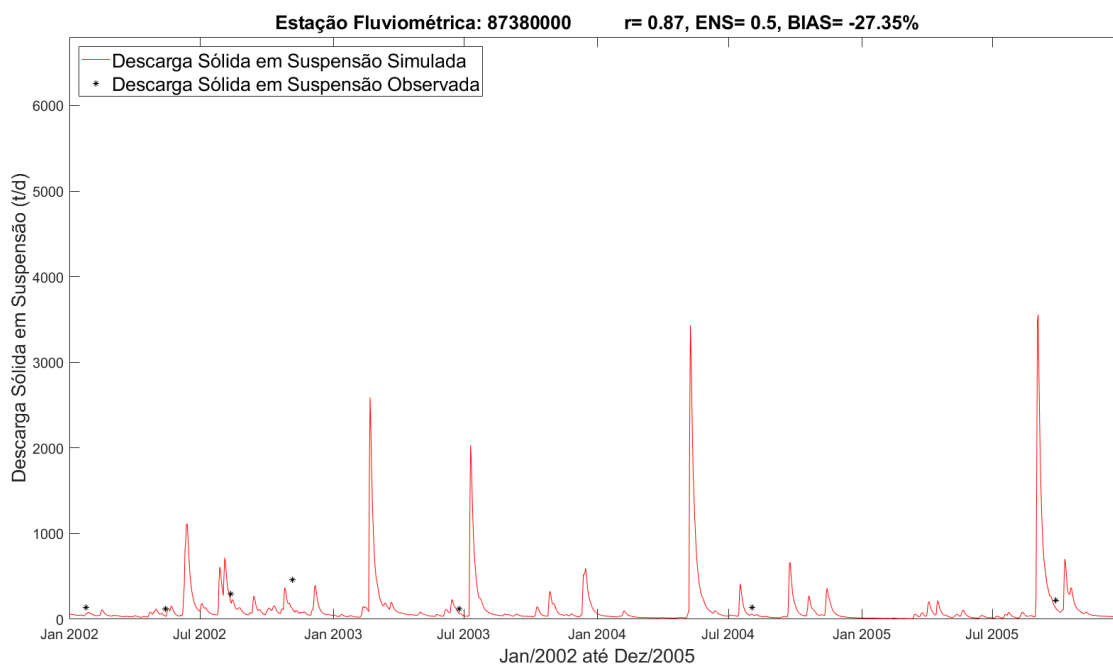


FIGURA 42. SEDIMENTOGRAMA PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87380000 PARA O PERÍODO DE JAN/2002 ATÉ DEZ/2005

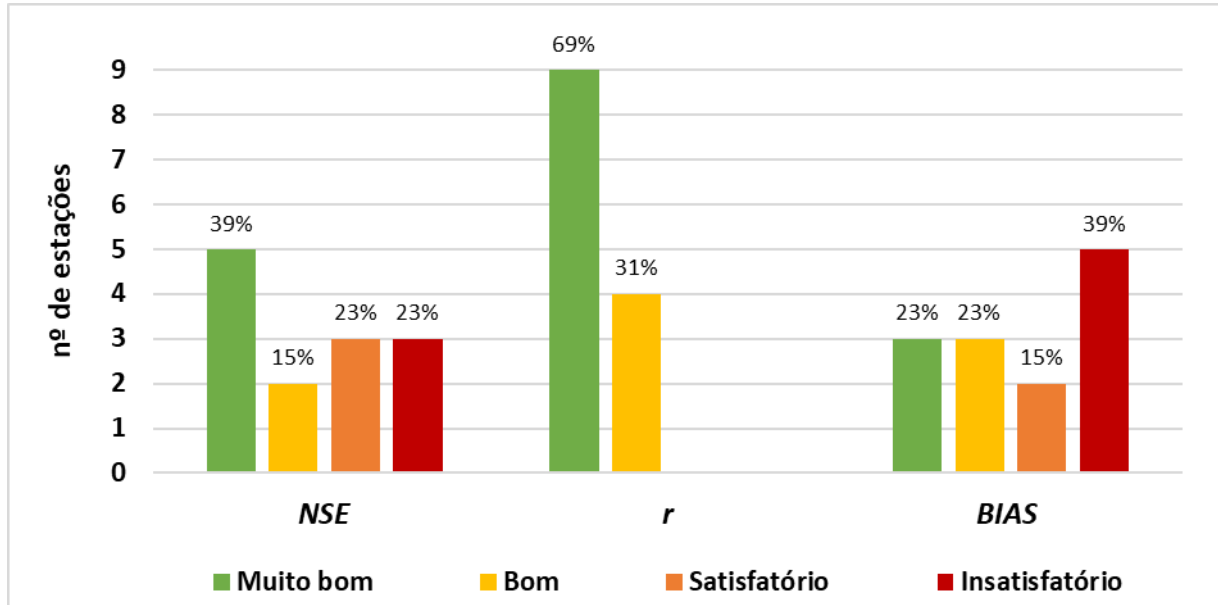


3.5 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO

Para validação do modelo, assim como na etapa de calibração, foram realizadas análises estatísticas para os valores diários de descarga sólida em suspensão, uma vez que a baixa frequência de dados observados não permite a análise estatística dos valores mensais de descarga sólida em suspensão. A Figura 43 apresenta um resumo, na forma de histograma, da quantidade de estações presentes em cada faixa de performance, considerada nesse trabalho, para cada métrica. Na etapa de validação, os resultados das métricas foram pouco inferiores aos resultados encontrados na etapa de calibração.

Para o *NSE*, 77% apresentaram valores $> 0,0$, considerados satisfatórios, sendo que 39% foram considerados muito bons (Figura 43). Três estações apresentaram resultados considerados insatisfatórios, sendo elas a 85400000, 86100000 e 86510000. Quanto ao coeficiente *r*, a Figura 43 mostra que 69% das estações avaliadas apresentaram valores acima de 0,8, considerados muito bons e 31% valores acima de 0,6, considerados bons. Com relação ao *BIAS*, 23%, 23% e 15% das estações sedimentométricas apresentaram resultados muito bons, bons e satisfatórios (Figura 43), respectivamente. Esse foi o resultado encontrado com maior quantidade de estações na faixa de insatisfatório, nas etapas de calibração e validação do modelo MGB-SED, visto que cinco estações apresentaram esse resultado.

FIGURA 43. HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ESTAÇÕES EM CADA CLASSE DE PERFORMANCE PARA CADA MÉTRICA ESTATÍSTICA UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO DO MODELO MGB-SED



Os valores de cada métrica, para cada estação, são apresentados na Tabela 9. A fim de visualizar a performance obtida, em cada estação, de forma espacial ao longo da bacia, apresenta-se a Figura 44, a Figura 45 e a Figura 46.

TABELA 9. RESUMO DAS MÉTRICAS DE PERFORMANCE DO MODELO MGB-SED PARA AS ESTAÇÕES SEDIMENTOMÉTRICAS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA NA ETAPA DE VALIDAÇÃO

Estação/ Rio	Área de drenagem (km ²)	<i>r</i>	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i> (%)
85400000/ Jacuí	14000	0,84	-5,43	200,10
85600000/ Vacacaí	6780	0,90	0,69	-19,24
85623000/ São Sepé	690	0,75	0,02	48,38
85735000/ Pardo	1340	0,67	0,14	-79,03
85900000/ Jacuí	38700	0,76	0,86	-0,75
86100000/ Antas	1820	0,76	-4,30	22,45
86410000/ Turvo	2820	0,92	0,48	-28,78
86500000/ Carreiro	1820	0,80	0,76	-11,11
86510000/ Taquari	16000	0,88	-1,90	109,02
86560000/ Guaporé	2030	0,80	0,15	-62,71
87170000/ Caí	3030	0,92	0,67	-9,66
87270000/ Caí	4360	0,87	0,53	-30,28
87380000/ dos Sinos	2900	0,89	0,26	-56,27

FIGURA 44. COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH E SUTCLIFFE (NSE) PARA AS DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 2006-2015

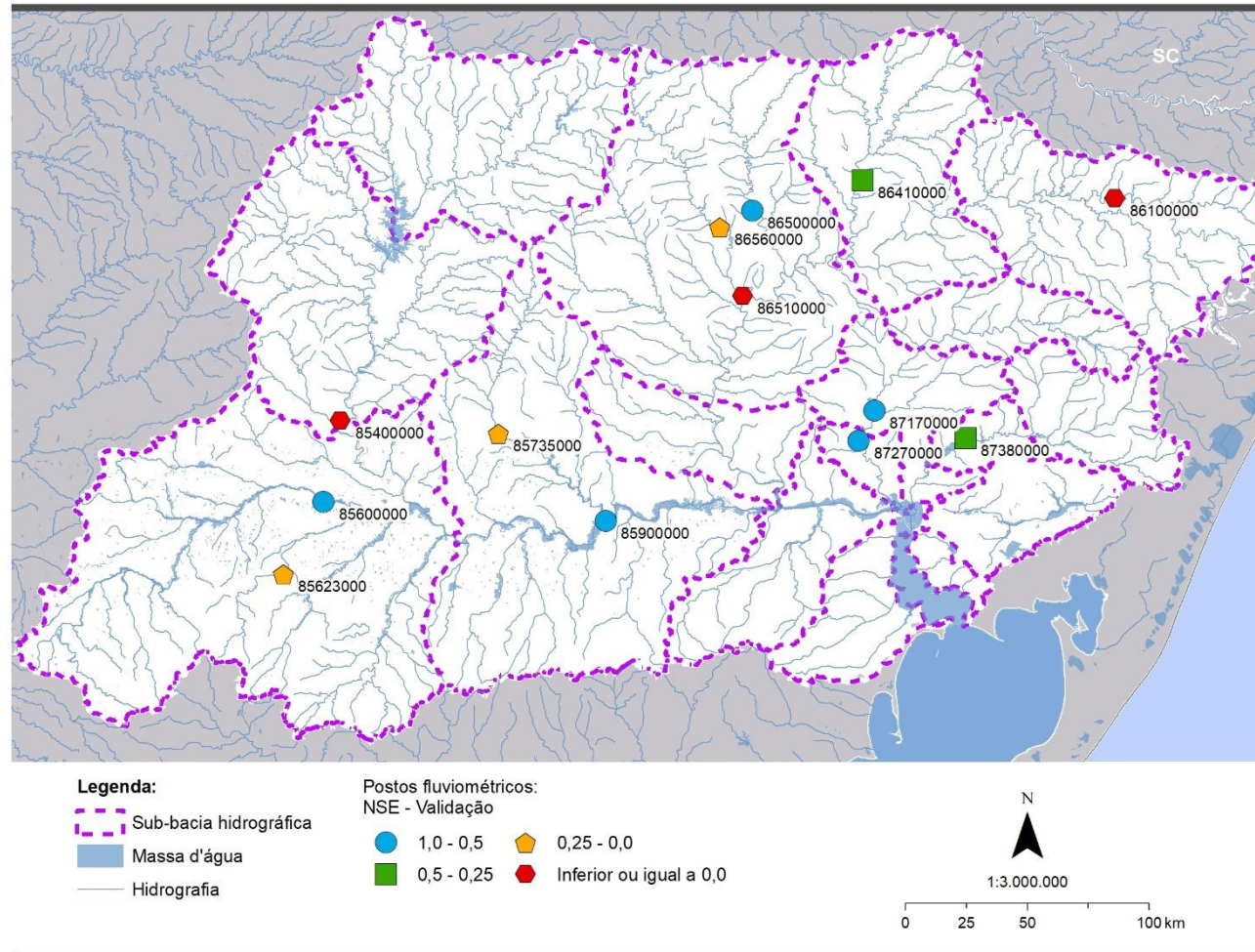


FIGURA 45. VALORES DE *BIAS* PARA AS DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 2006-2015

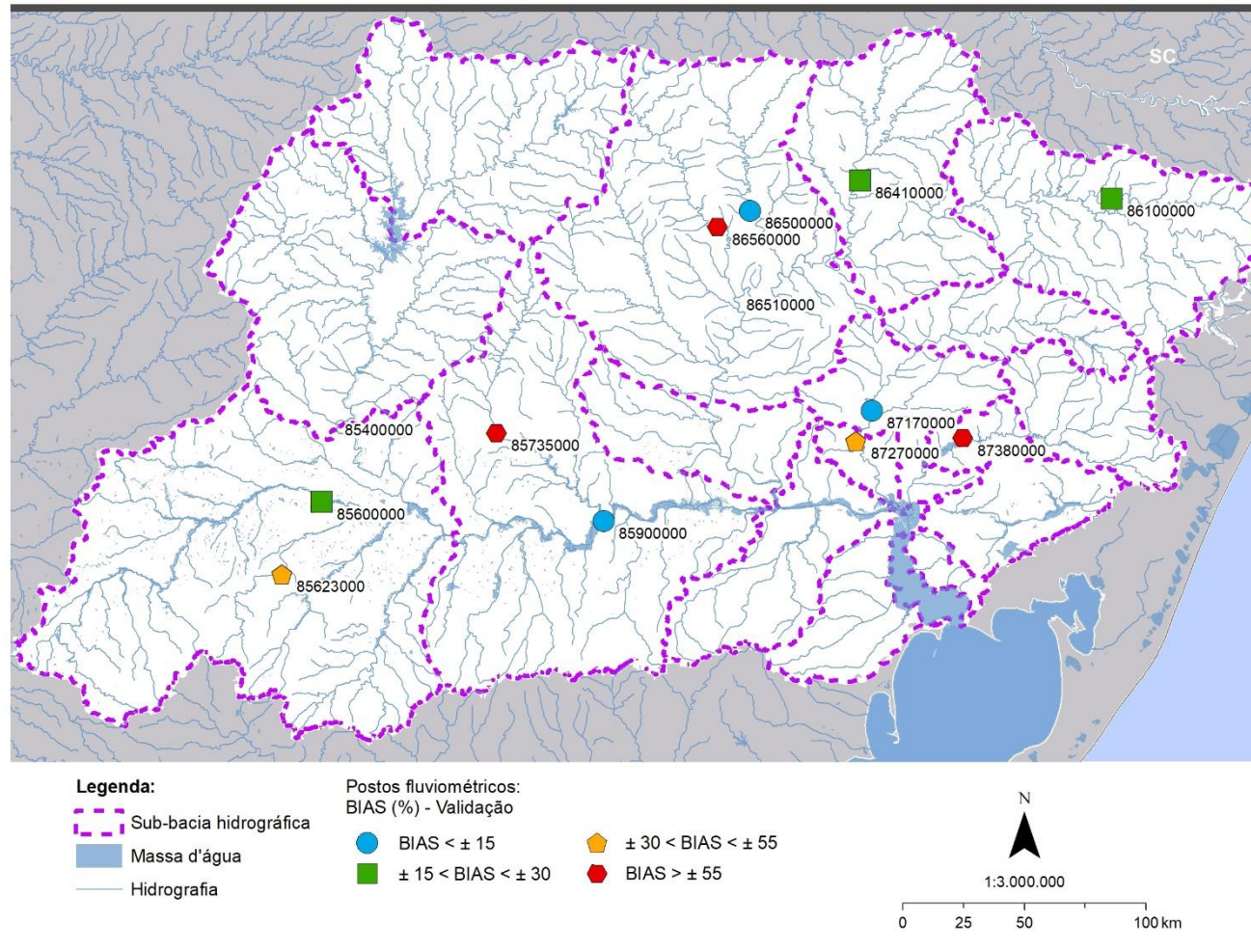
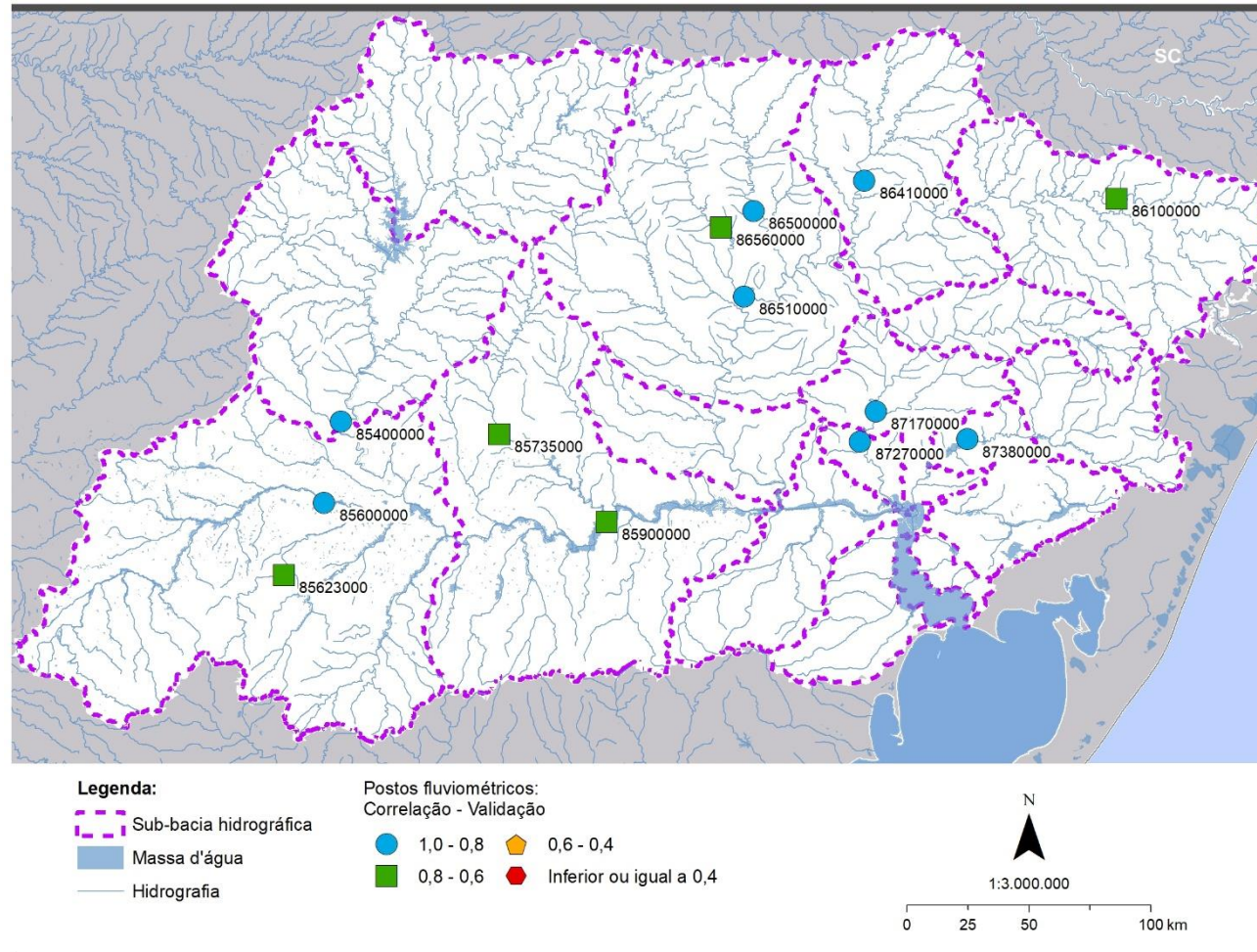


FIGURA 46. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON r ENTRE PARA AS DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO DIÁRIAS SIMULADAS E OBSERVADAS PARA O PERÍODO DE 2006-2015



As QSS observadas e simuladas são apresentadas para as estações 85900000, 86510000, 87270000 e 8738000, respectivamente, na Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50. Destaca-se, novamente, a importância de analisar visualmente os gráficos e não apenas as métricas de performance aplicadas na modelagem. A estação 86510000 apresentou resultados insatisfatórios para o NSE e o BIAS na etapa de validação. Apesar disso, pode-se observar na Figura 48 que as medições realizadas *in situ* sempre ocorrem no período de baixa QSS, o que dificulta obter um bom ajuste dos resultados simulados e observados, sem gerar uma tendência de subestimativas por parte do modelo. Menciona-se ainda que as estações 86100000, 86410000, 86500000, 86560000, a montante da estação 86510000, apresentaram apenas dois valores de métricas considerados insatisfatórios.

O Apêndice VI apresenta os sedimentogramas com passo de tempo diário para a etapa de validação do modelo, entre os anos de 2006 e 2015.

FIGURA 47. SEDIMENTOGRAMA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 85900000 PARA O PERÍODO DE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015

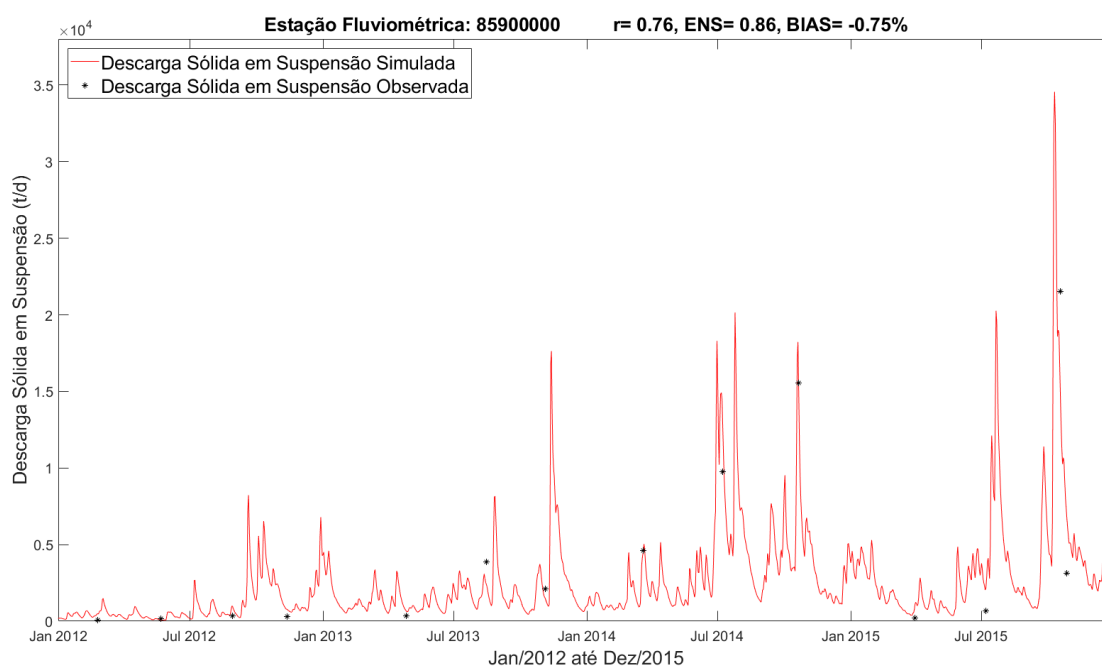


FIGURA 48. SEDIMENTOGRAMA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 86510000 PARA O PERÍODO DE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015

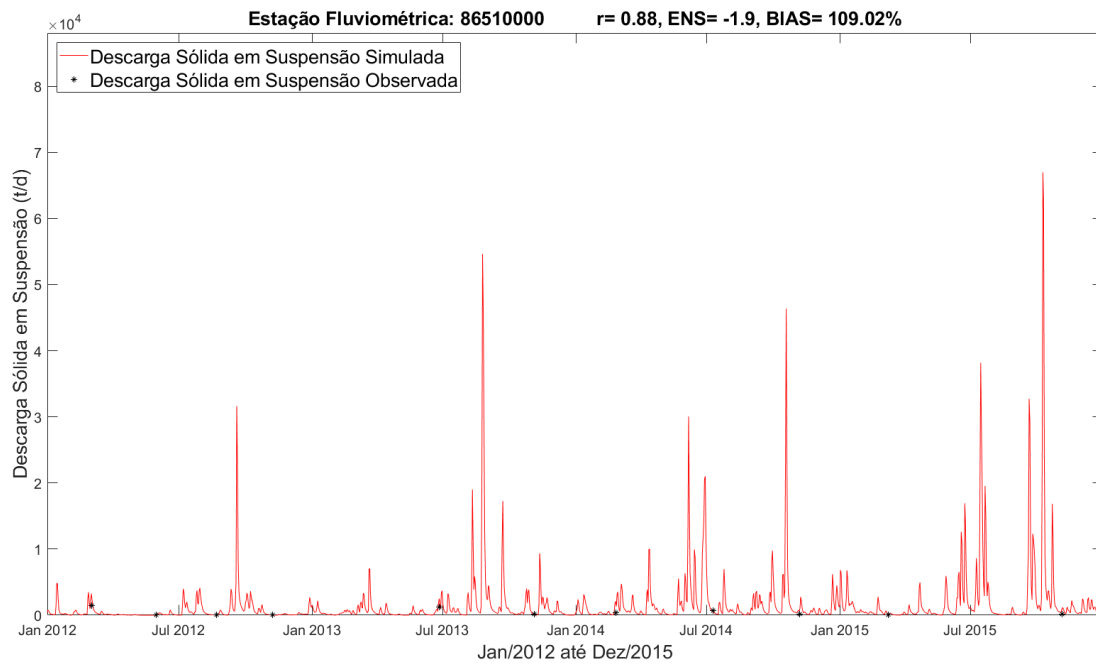


FIGURA 49. SEDIMENTOGRAMA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 PARA O PERÍODO DE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015

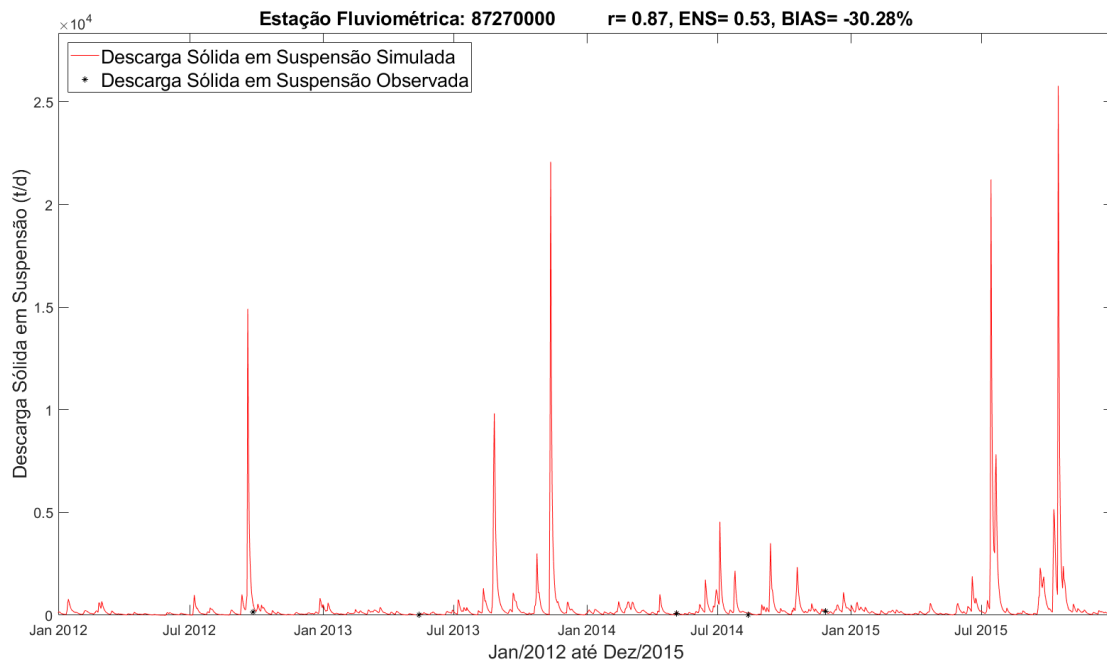
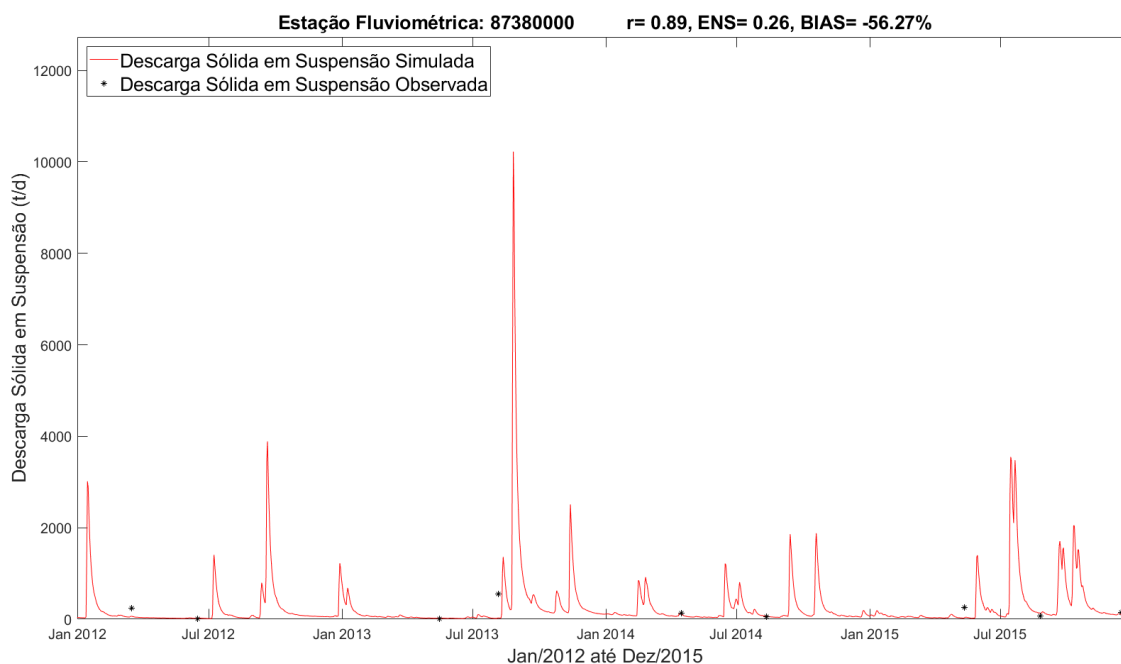


FIGURA 50. SEDIMENTOGRAMA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87380000 PARA O PERÍODO DE JAN/2012 ATÉ DEZ/2015



3.6 CALIBRAÇÃO X VALIDAÇÃO DO MODELO DE SEDIMENTOS – VALORES DIÁRIOS

Na Tabela 10, apresenta-se o resumo dos resultados estatísticos da performance do modelo MGB-SED, nas etapas de calibração e validação. Na etapa de validação, os valores do coeficiente r melhoraram em algumas estações e pioraram em outras, mas em média os valores encontrados foram equivalentes. Para o coeficiente NSE as estações 85600000, 85735000 e 86500000 apresentaram melhorias consideradas significativa na etapa de calibração. Por outro lado as estações 85400000, 86100000 e 86510000 apresentaram uma piora significativa, o que fez com que a média dos valores na etapa de validação fosse negativa. Apesar dos valores insatisfatórios nessas três estações, como já mencionado, os gráficos de descarga demonstram que a dinâmica temporal dos sedimentos está representada de forma adequada. Os valores do $BIAS$ foram melhores em apenas 3 estações na etapa de validação e apresentou uma piora considerável para as estações 85400000 e 86510000. Enquanto apenas uma estação apresentou resultado insatisfatório para o $BIAS$ na etapa de calibração, cinco estações apresentaram resultados insatisfatórios na etapa de validação.

TABELA 10. RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE SEDIMENTOS MGB-SED PARA DESCARGAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO OBSERVADAS E SIMULADAS

Estação/ Rio	Área de Drenagem (km ²)	<i>r</i>			<i>NSE</i>			<i>BIAS</i> (%)		
		Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ
85400000/ Jacuí	14000	0,86	0,84	-0,02	0,31	-5,43	-5,74	12,16	200,10	187,94
85600000/ Vacacaí	6780	0,80	0,90	0,10	0,30	0,69	0,39	1,18	19,24	18,60
85623000/ São Sepé	690	0,75	0,75	0,00	0,36	0,02	-0,34	57,71	48,38	-9,33
85735000/ Pardo	1340	0,77	0,67	-0,10	-0,07	0,14	0,21	36,86	79,03	42,17
85900000/ Jacuí	38700	0,77	0,76	-0,01	0,69	0,86	0,17	15,96	0,75	-15,21
86100000/ Antas	1820	0,73	0,76	0,03	0,98	-4,30	-5,28	11,78	22,45	10,67
86410000/ Turvo	2820	0,89	0,92	0,03	0,18	0,48	0,30	19,63	28,78	9,15
86500000/ Carreiro	1820	0,84	0,80	-0,04	0,15	0,76	0,61	17,09	11,11	-5,98
86510000/ Taquari	16000	0,88	0,88	0,00	0,01	-1,90	-1,91	22,53	109,02	86,49
86560000/ Guaporé	2030	0,86	0,80	-0,06	0,31	0,15	-0,16	54,50	62,71	8,21
87170000/ Caí	3030	-	0,92	-	-	0,67	-	-	9,66	-
87270000/ Caí	4360	0,88	0,87	-0,01	0,60	0,53	-0,07	2,95	30,28	27,33
87380000/ dos Sinos	2900	0,87	0,89	0,02	0,50	0,26	-0,24	27,35	56,27	28,92
MÉDIA	-	0,83	0,83	0,00	0,36	-0,54	-0,90	23,30	52,13	28,83

Os valores na tabela são referentes as métricas *NSE*, *BIAS* e *r* para as estações fluviométricas Região Hidrográfica do Guaíba. Os valores de Δ em vermelho e verde representam a piora e melhora, respectivamente, do valor da métrica no período de validação. Para o *BIAS* considerou-se os valores absolutos da métrica no cálculo das diferenças relativas percentuais.

Os resultados da modelagem de sedimentos também pode ser comparados com outros estudos presentes na literatura, como o trabalho de Rossoni et al. (2018), que realizou um estudo hidrossedimentológico da Região Hidrográfica do Guaíba, utilizando o modelo MGB-SED, com o método de propagação Muskingum Cunge. Para os valores de *BIAS*, das 15 estações utilizadas para avaliar o modelo, Rossoni et al. (2018) observaram que 11 (73%) estações estavam com valores entre 55% e -55%. No presente estudo das 12 estações utilizadas na calibração do MGB-SED, 11 (92%) possuem valores de *BIAS* entre 55 e -55%. Com relação ao *NSE*, o presente estudo e Rossoni et al. (2018) mostram que, respectivamente, 25% e 33% apresentaram valores acima de 0,50; 67% e 27% valores entre 0,00 e 0,50; e 8% e 40% inferiores a 0,00. Nota-se, portanto, que o presente estudo apresenta resultados satisfatórios e coerentes quando comparado a outros estudos apresentados na literatura.

3.7 DESCARGA SÓLIDA TOTAL – 1975 ATÉ 2015

A seguir, são apresentados os resultados referentes à descarga sólida total (QST), ou seja, os valores de descarga sólida em suspensão em conjunto com os valores de descarga sólida de fundo. Os resultados são divididos em: (1) estimativas diárias, onde são comparados os valores observados (obtidos a partir do método de Colby) e os valores simulados (obtidos a partir do método de Yang com o MGB-SED); e (2) estimativas mensais, obtidas com os valores simulados (método de Yang com MGB-SED).

3.7.1 Estimativa Diária

Para verificar a coerência das descargas sólidas totais (QST), foram comparados os valores dos dados observados de QST, calculados a partir do método de Colby, com os valores de QST dos dados simulados, calculados a partir das descargas sólidas em suspensão e descargas sólidas de leito com o MGB-SED. A Tabela 11 apresenta as métricas de avaliação entre os valores observados e simulados.

TABELA 11. RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA AS DESCARGAS SÓLIDAS TOTAIS (QST) DIÁRIAS ENTRE OS VALORES SIMULADOS E OBSERVADOS

Estação/ Rio	Área de drenagem (km ²)	<i>r</i>	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i> (%)
85400000/ Jacuí	14000	0,53	0,13	-5,87
85600000/ Vacacaí	6780	0,82	0,59	-31,87
85623000/ São Sepé	690	0,45	0,19	-23,69
85735000/ Pardo	1340	0,60	0,04	-79,24
85900000/ Jacuí	38700	0,92	0,72	-28,97
86100000/ Antas	1820	0,96	0,68	-49,88
86410000/ Turvo	2820	0,48	0,09	-63,71
86500000/ Carreiro	1820	0,73	0,53	-12,34
86510000/ Taquari	16000	0,73	0,46	-30,60
86560000/ Guaporé	2030	0,69	0,35	-46,94
87170000/ Caí	3030	0,88	0,70	36,54
87270000/ Caí	4360	0,72	0,51	19,75
87380000/ dos Sinos	2900	0,75	0,17	-63,37

Como pode ser observado, para os valores de *r*, 31% das estações (4/13) apresentaram valores acima de 0,8, 46% (6/13) entre 0,8 e 0,6, 23% (3/13) entre 0,6 e 0,4; nenhuma das estações apresentou resultado inferior a 0,4. Para os valores de *NSE*, 46% das estações (6/13) apresentaram valores acima de 0,5, 15% (2/13) entre 0,5 e 0,25, 39% (5/13) entre 0,25 e 0,00; nenhuma das estações apresentou valor inferior a 0,00. Por fim, para a métrica *BIAS*, 15% das estações (2/13) apresentaram valores entre ± 15%,

23% (3/13) igual ou superior a $\pm 15\%$ e igual ou inferior a $\pm 30\%$, 39% (5/13) superior a $\pm 30\%$ e igual ou inferior a $\pm 55\%$ e, finalmente, 23% (3/13) apresentaram valores superiores a $\pm 55\%$. Isso demonstra que os valores estimados para a descarga sólida total, a partir do MGB-SED, estão coerentes com os valores estimados para descarga sólida total a partir dos dados observados.

Entre a Figura 51 até a Figura 54 são apresentados os sedimentogramas das descargas sólidas totais estimadas para os dados observados, a partir de Colby, e dados simulados, calculadas com o modelo MGB-SED. Para melhor visualização dos resultados, são apresentados os períodos de tempo entre janeiro de 2012 e dezembro de 2015, por ser o período mais recente de simulação.

Como pode ser observado, para os pontos onde há dados observados, as estimativas mantêm um padrão de coerência entre os dados observados e simulados. Isso corrobora com as estatísticas calculadas na Tabela 11. O Apêndice VII apresenta os sedimentogramas diários das descargas sólidas totais para o período total de simulação, entre 1975 e 2015, para todas as estações fluviométricas. A Tabela 12 apresenta as estatísticas calculadas para os dados simulados, com modelo MGB -SED, de descarga sólida total.

FIGURA 51. ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL (QST) DOS DADOS SIMULADOS (MÉTODO DE YANG) E DOS DADOS OBSERVADOS (MÉTODO DE COLBY) ENTRE JANEIRO/2012 E DEZEMBRO/2015 – ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 85900000 (RIO JACUÍ)

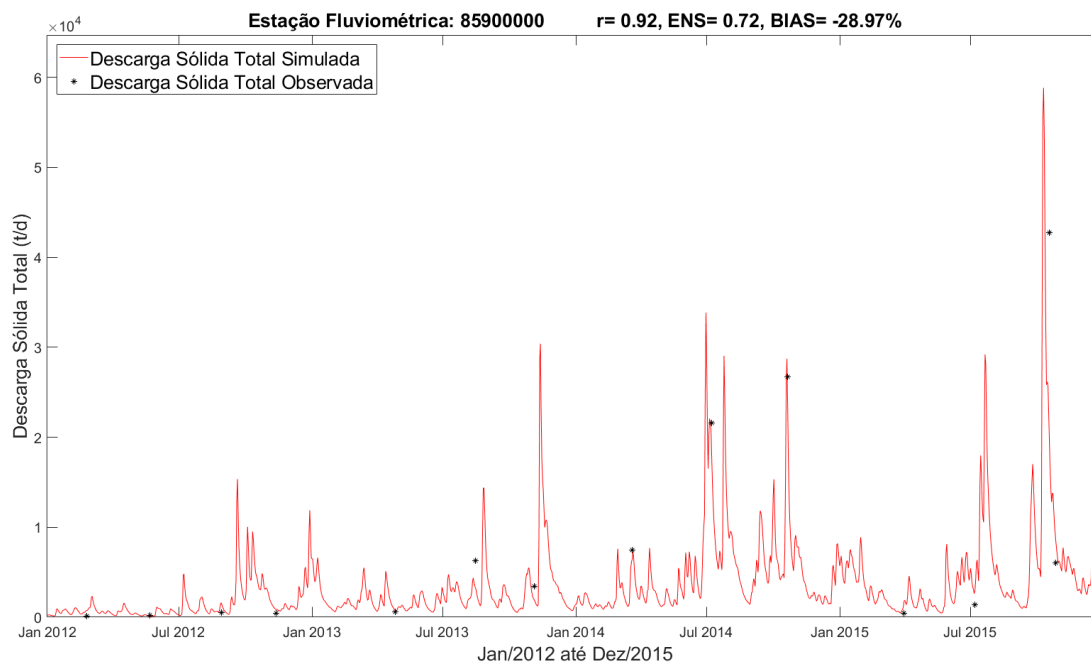


FIGURA 52. ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL (QST) DOS DADOS SIMULADOS (MÉTODO DE YANG) E DOS DADOS OBSERVADOS (MÉTODO DE COLBY) ENTRE JANEIRO/2012 E DEZEMBRO/2015 – ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 86510000 (RIO TAQUARI)

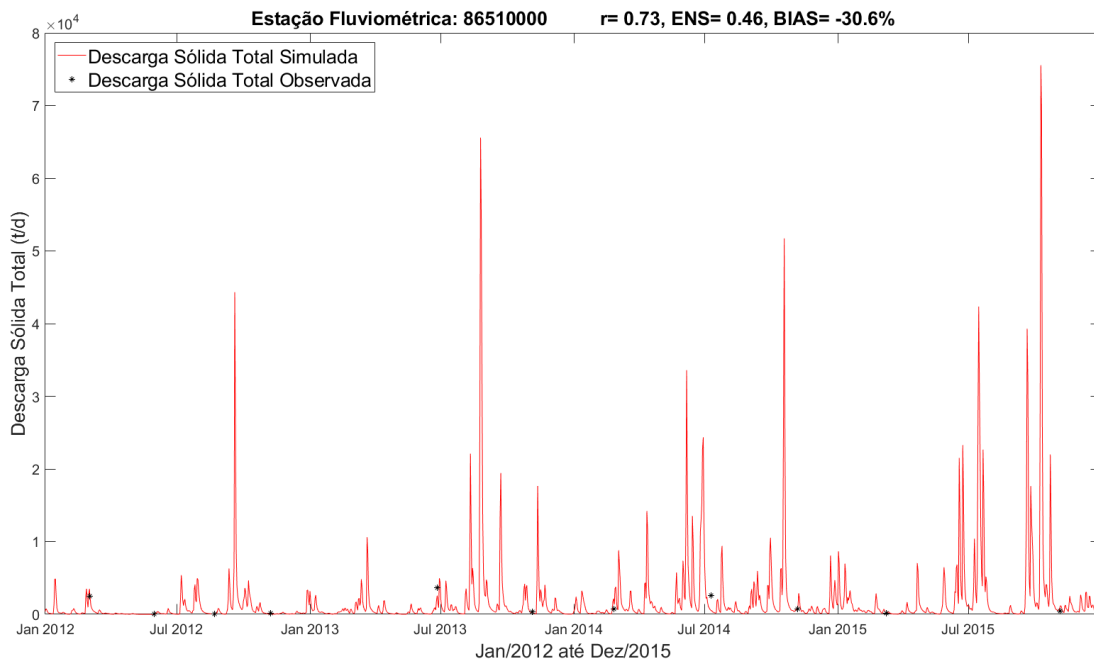


FIGURA 53. ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL (QST) DOS DADOS SIMULADOS (MÉTODO DE YANG) E DOS DADOS OBSERVADOS (MÉTODO DE COLBY) ENTRE JANEIRO/2012 E DEZEMBRO/2015 – ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 (RIO CAÍ)

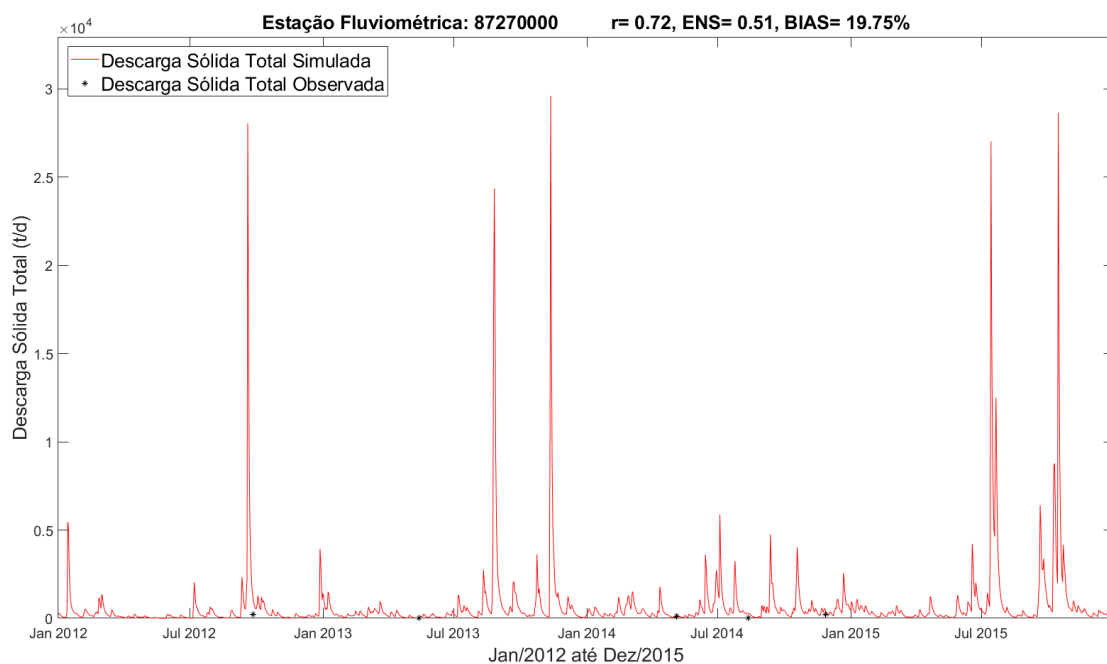


FIGURA 54. ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL (QST) DOS DADOS SIMULADOS (MÉTODO DE YANG) E DOS DADOS OBSERVADOS (MÉTODO DE COLBY) ENTRE JANEIRO/2012 E DEZEMBRO/2015 – ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87380000 (RIO DOS SINOS)

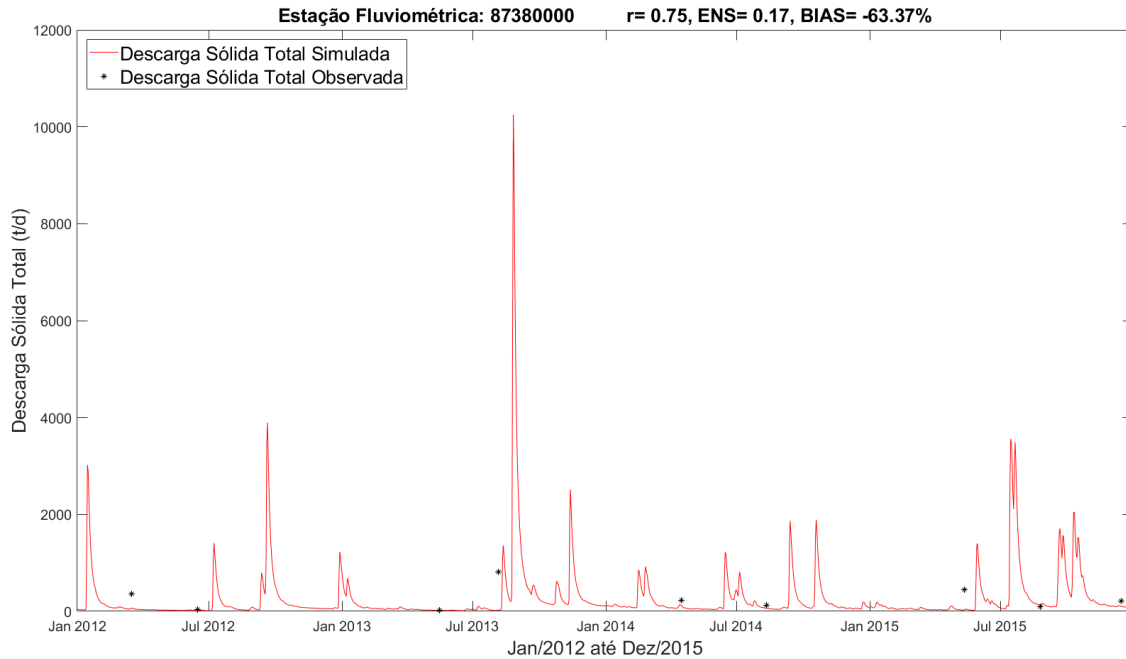


TABELA 12. ESTÍMTICAS CALCULADAS PARA AS DESCARGAS SÓLIDAS TOTAIS SIMULADAS COM O MODELO MGBSED, ENTRE OS ANOS DE 1976 E 2015

Estação/ Rio	Área (km ²)	Média (t/dia)	DesPad (t/dia)	QST ₅₀ (t/dia)	Máx. (t/dia)	Min. (t/dia)
85400000/ Jacuí	14.000	1167,4	1625,2	670,1	29116,2	9,6
85600000/ Vacacaí	6.780	557,8	853,6	233,1	9739,8	4,9
85623000/ São Sepé	690	132,0	539,0	17,0	18164,4	0,1
85735000/ Pardo	1.340	46,1	165,5	1,4	7862,0	0,0
85900000/ Jacuí	38.700	3149,9	4143,1	1733,9	58821,6	60,5
86100000/ Antas	1.820	34,6	137,9	2,5	3363,0	0,0
86410000/ Turvo	2.820	226,7	887,3	28,6	26510,5	0,0
86500000/ Carreiro	1.820	305,6	691,9	60,8	12476,2	0,0
86510000/ Taquari	16.000	1597,0	4715,1	384,6	113977,6	0,3
86560000/ Guaporé	2.030	257,7	547,5	66,8	11589,5	0,1
87170000/ Caí	3.030	388,0	752,3	187,0	21904,6	1,6
87270000/ Caí	4.360	500,0	1189,7	218,2	29940,3	1,9
87380000/ dos Sinos	2.900	195,2	636,4	60,1	27113,4	3,5

3.7.2 Estimativa Mensal

Os sedimentogramas das descargas sólidas totais (QST) mensais são apresentados entre a Figura 55 até Figura 58. Essas descargas sólidas totais são apresentadas para o período de 1975 até 2015 e foram obtidos com a utilização do modelo MGB-SED. Estes resultados são apresentados para as principais estações afluentes aos trechos de rio que serão simulados com o modelo hidrodinâmico Delft3D, sendo esses sedimentogramas as condições de contorno para a modelagem hidrodinâmica das descargas sólidas.

O Apêndice VIII apresenta os sedimentogramas mensais das descargas sólidas totais para o período total, entre os anos de 1975 e 2015.

FIGURA 55. SEDIMENTOGRAMA MENSAL PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 85900000 PARA O PERÍODO ENTRE 1975 ATÉ 2015

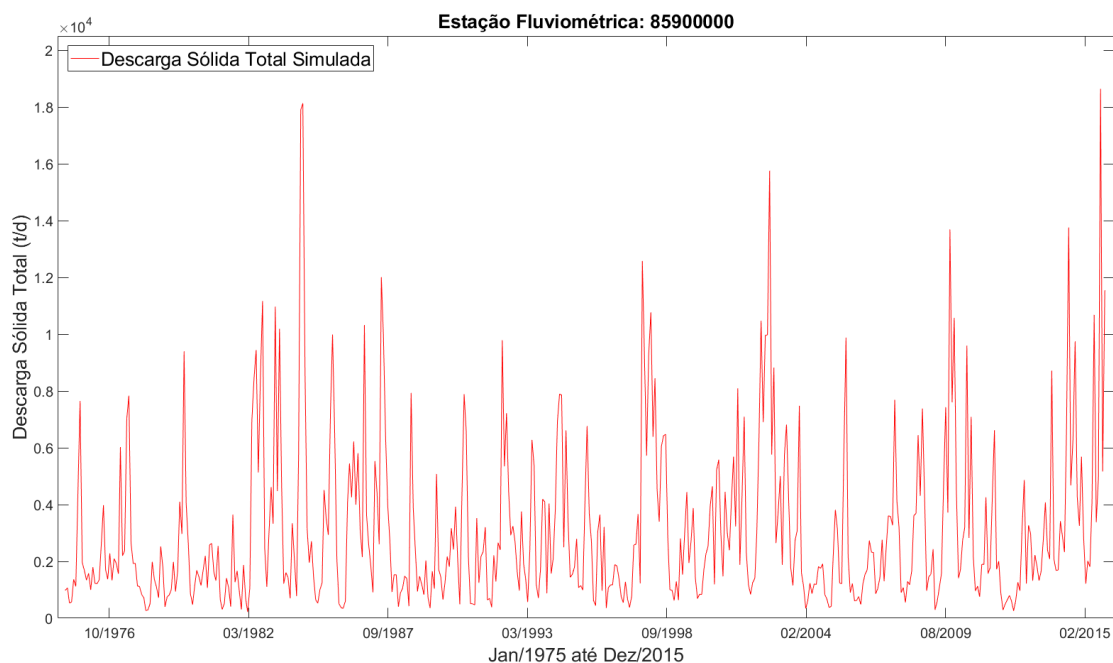


FIGURA 56. SEDIMENTOGRAMA MENSAL PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 86510000 PARA O PERÍODO ENTRE 1975 ATÉ 2015

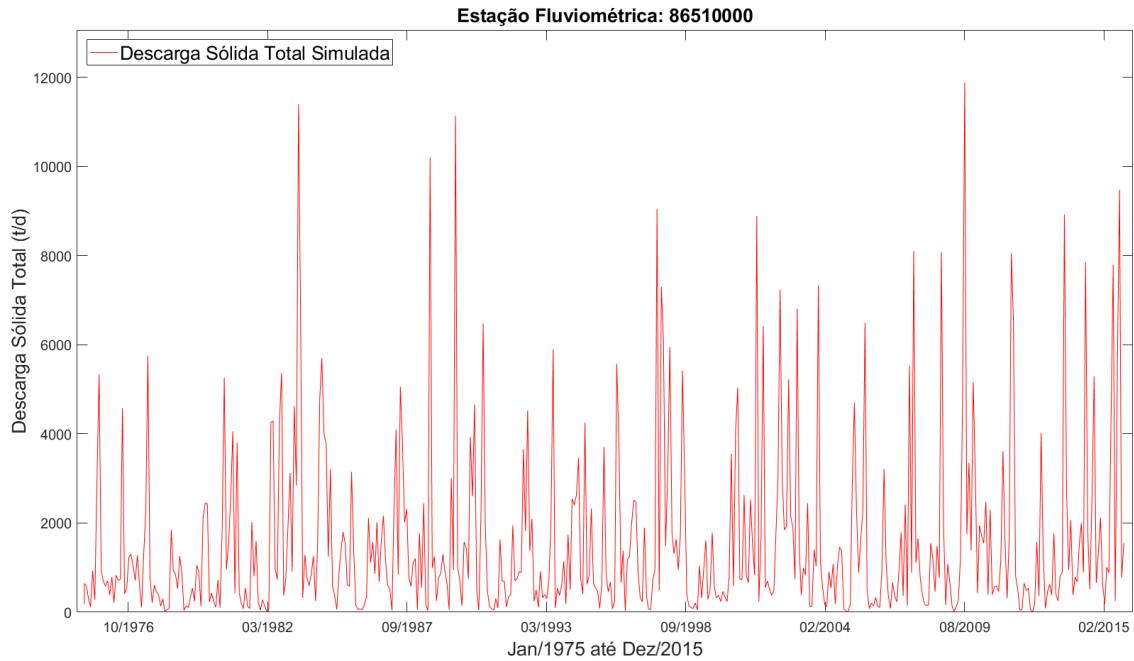


FIGURA 57. SEDIMENTOGRAMA MENSAL PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87270000 PARA O PERÍODO ENTRE 1975 ATÉ 2015

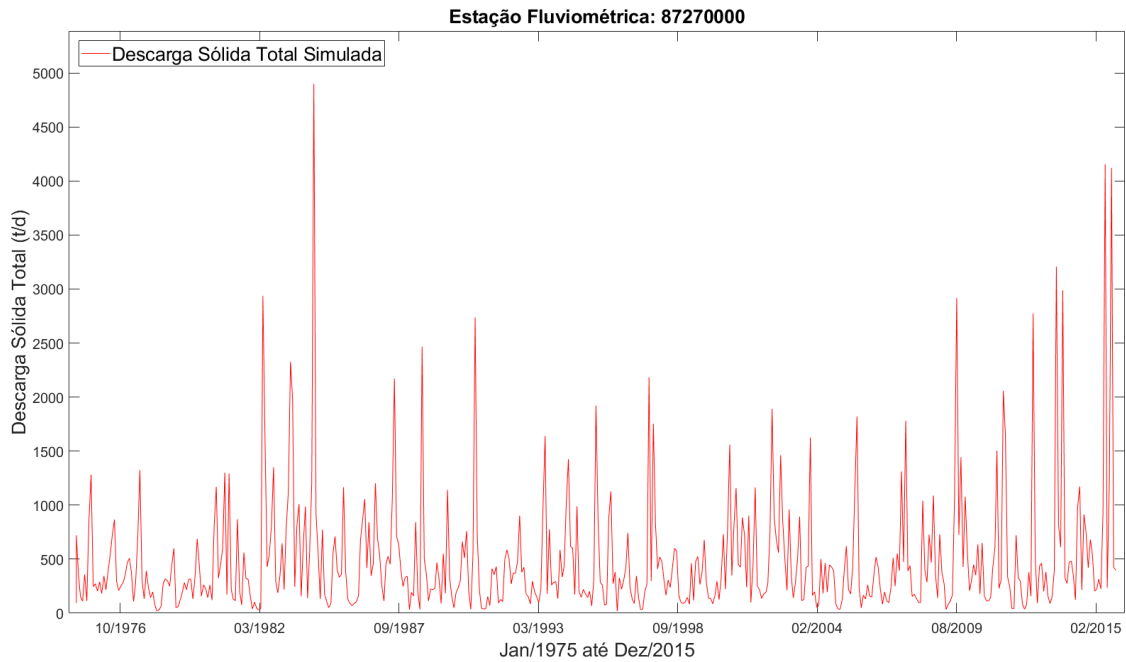
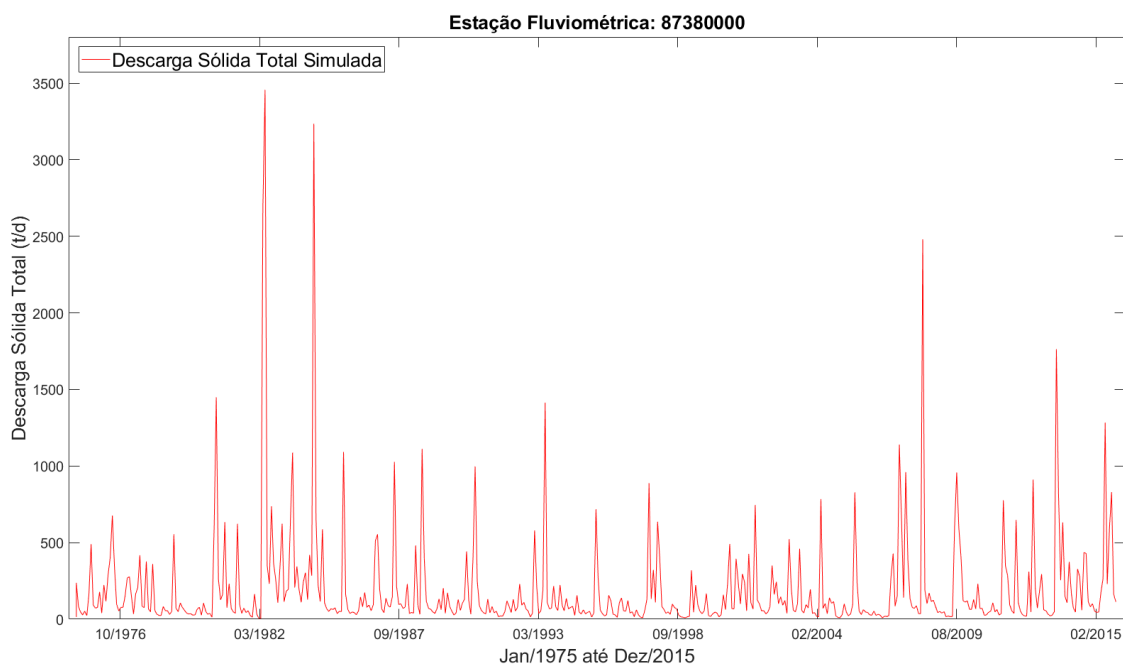


FIGURA 58. SEDIMENTOGRAMA MENSAL PARA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 87380000 PARA O PERÍODO ENTRE 1975 ATÉ 2015



3.8 TAXA DE EROÇÃO MÉDIA ESTIMADA

Por fim, para validar o modelo e verificar sua coerência com a teoria de estimativas de produção de sedimentos, foi realizado o cálculo da taxa de erosão laminar teórica, em mm/ano. De acordo com as estimativas realizadas pelo modelo, a Região Hidrográfica do Guaíba perde, em média, pelo menos 0,0125 mm/ano de solo. Para a maior parte da Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí, há uma perda de 0,011 mm/ano de solo. A Bacia Hidrográfica do Rio Caí possui a maior perda, de aproximadamente 0,016 mm/ano de solo. A Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos é a que apresentou menor perda, de aproximadamente 0,009 mm/ano.

TABELA 13. TAXA DE EROÇÃO MÉDIA ESTIMADA A PARTIR DAS DESCARGAS SÓLIDAS TOTAIS

Estação/ Rio	Área de drenagem (km ²)	Volume produzido de sedimentos (m ³ /ano)	Taxa de erosão laminar teórica (mm/ano)
85900000/ Jacuí	38.700	4.10 ⁵	0,011
86510000/ Taquari	16.000	2.10 ⁵	0,014
87270000/ Caí	4.360	7.10 ⁴	0,016
87380000/ dos Sinos	2.900	4.10 ⁴	0,009

4 CONCLUSÕES

Ao analisar os resultados obtidos com a modelagem hidrológica e de sedimentos, podemos concluir que o modelo pode representar adequadamente os processos hidrossedimentológicos na bacia, dentro dos limites de uso e erros do modelo e das incertezas das observações. Os resultados encontrados foram comparados com outros estudos presentes na literatura, tanto para a modelagem hidrológica quanto para a modelagem de sedimentos, e foi possível observar que os valores das métricas encontradas foram, no geral, semelhantes e até mesmo superiores no caso da modelagem de sedimentos. Dessa forma, conclui-se que o modelo está representado de forma adequada para ser utilizado na próxima etapa, Módulo II – Modelagem hidrodinâmica de sedimentos do Baixo Jacuí, como condições de contorno de entrada do modelo Delft3D.

Além disso, considerando a escala de tempo diária, na qual foi realizada a calibração dos modelos MGB e MGB-SED, destaca-se que:

- Com relação a métrica *NSE*, 100% e 85% das estações fluviométricas apresentaram resultados satisfatórios ($>0,50$) na etapa de calibração e validação, respectivamente. Apenas as estações 85735000 e 85900000 apresentaram resultados insatisfatórios, com *NSE* iguais a 0,42 e 0,48, respectivamente.
- Com relação ao *BIAS*, 85% e 77% das estações fluviométricas apresentaram resultados satisfatórios (entre -25% e 25%) na etapa de calibração e validação, respectivamente. A estação 87170000 foi a única que apresentou resultado insatisfatório para o *BIAS* em ambas as etapas de calibração e validação.
- Para o coeficiente de correlação *r*, 69% e 31% das estações apresentaram resultados muito bons e bons, respectivamente, tanto na etapa de calibração quanto de validação.
- Além disso, podemos destacar que, quando comparados com trabalhos da literatura, semelhantes e na mesma área de estudo, como em Lopes et al. (2018) e Rossoni et al. (2018), percebe-se que o modelo mantém a qualidade da representação dos processos hidrológicos e hidrossedimentológicos na Região Hidrográfica do Guaíba.

Mesmo para algumas estações, em que as métricas não apresentaram bons valores, observou-se que os hidrogramas estavam representando de forma adequada a dinâmica das vazões, tanto na escala diária quanto mensal. Além disso, os resultados das métricas mensais foram, no geral, superiores as métricas diárias. Dessa forma, os resultados gerados pelo MGB puderam ser utilizados como dados de entrada no modelo MGB-SED. Com relação a esse último, destaca-se que:

- A métrica *NSE* apresentou resultados satisfatórios ($>0,0$) em 92% e 77% das estações sedimentométricas na etapa de calibração e validação, respectivamente.
- Com relação ao *BIAS*, 92% e 61% das estações fluviométricas apresentaram resultados satisfatórios (entre -55% e 55%) na etapa de calibração e validação, respectivamente.
- Para o coeficiente de correlação r , 100% das estações apresentaram resultados satisfatórios tanto na etapa de calibração quanto de validação.

Observou-se ainda que mesmo em algumas estações, em que os valores das métricas não foram satisfatórios, comparando as descargas de sedimentos em suspensão observadas e simuladas, a análise gráfica dos resultados mostrou que o modelo MGB-SED foi capaz de representar a dinâmica dos sedimentos.

Por fim, os hidrogramas e sedimentogramas gerados neste trabalho são adequados para serem utilizados como condições de contorno para o modelo Delft3D, na etapa de modelagem hidrodinâmica.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARINO, OLIVIER; RAMOS PEREZ, JOSE JULIO; KALOGIROU, VASILEIOS; BONTEMPS, SOPHIE; DEFOURNY, PIERRE; VAN BOGAERT, ERIC (2012): Global Land Cover Map for 2009 (GlobCover 2009). © European Space Agency (ESA) & Université catholique de Louvain (UCL), doi:10.1594/PANGAEA.787668.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURTI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J.C. **Soil prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling**. *Catena*, v. 79, p. 49-59, 2009, doi:10.1016/j.catena.2009.05.010.

BUARQUE, D. C. SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM GRANDES BACIAS : Estudo de caso do rio Madeira. **Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)**: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 878-895, 2007, doi:10.1623/hysj.52.5.878.

FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. Automatic calibration of a large-scale sediment model using suspended sediment concentration, water quality, and remote sensing data. **RBRH**, v. 24, 2019.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 243-254, 2014.

FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Um mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., Brasília/DF. **Anais...** Brasília: ABRH, 2015.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Sobre o Uso da Persistência de Previsões Determinísticas de Vazão para a Tomada de Decisão. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), v. 31, p. 218-228, 2016.

FAO (2003). **'The Digitized Soil Map of the World and Derived Soil Properties'** (version 3.5). FAO Land and Water Digital Media Series 1. (FAO: Rome).

FARINASSO, M.; CARVALHO JR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solo, utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba-PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 7, n. 2, p. 73-85, 2006.

FRIZZARIM, S. S.; SILVA, B. P. C.; SILVA, M. L. N.; BOTEGA, A. A.; BATISTA, P. V. G.; ELISEI, L. G. Fator cobertura e manejo do solo em cultivos de eucalipto e floresta nativa no município de Eldorado do Sul, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35, Natal. **Anais...** Natal, 2015.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **J. Hydrologic Eng.**, v. 4, p. 135-143, 1999.

IBGE. **Cartas Temáticas**. Disponível em: < [https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/ cartas-tematicas.html](https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/cartas-tematicas.html)>. Último acesso em: 04 de dezembro de 2017. Escala 1:250.000. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/Coordenação de Cartografia de Geociências do IBGE. Projeto Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM), 2000.

LOPES, V. A. R.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; PONTES, P. R. M.; SIQUEIRA, V. A. Aplicação preliminar do modelo MGB-IPH para a bacia hidrográfica completa da Laguna dos Patos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21. Brasília, 2015. **Anais...** Brasília: ABRH, 2015.

LOPES, V. A. R.; FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W.; MARQUES, D. M. A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. **Journal of Hydrology**, v. 565, p. 177-196, 2018.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; CURTI, N.; FONSECA, S. Fator cobertura e manejo do solo e perdas de solo e água em cultivo de eucalipto e Mata Atlântica nos Tabuleiros Costeiros do estado do Espírito Santo. *Scientia Forestalis*. Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 517-526, 2010.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. Transactions of the ASABE, v. 50, p. 885-900, 2007, ISSN 0001-2351.

MUNAR, A. M., CAVALCANTI, J. R., BRAVO, J. M., FAN, F. M., DA MOTTA-MARQUES, D., & FRAGOSO JR, C. R. Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: Toward a better comprehension of watershed-shallow lake processes. **JOURNAL OF HYDROLOGY**, v. 564, p. 424-441, 2018.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology** (Amsterdam), v. 406, p. 170-181, 2011.

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888–904, 2015.

ROSSONI, R. B.; FAN, F. M.; LOPES, V. A. L. Estimativa da descarga sólida de sedimentos em suspensão para o Lago Guaíba/RS através da modelagem hidrossedimentológica de grande escala. In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS 2018, Vitória/ES. **Anais...** Vitória/ES, 2018.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 274–287, 2016. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=188&SUMARIO=5166>>.

SIQUEIRA, V. A., PAIVA, R. C. D. D., FLEISCHMANN, A. S., FAN, F. M., RUHOFF, A. L., PONTES, P. R. M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W. Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. **HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES**, v. 22, p. 4815-4842, 2018.

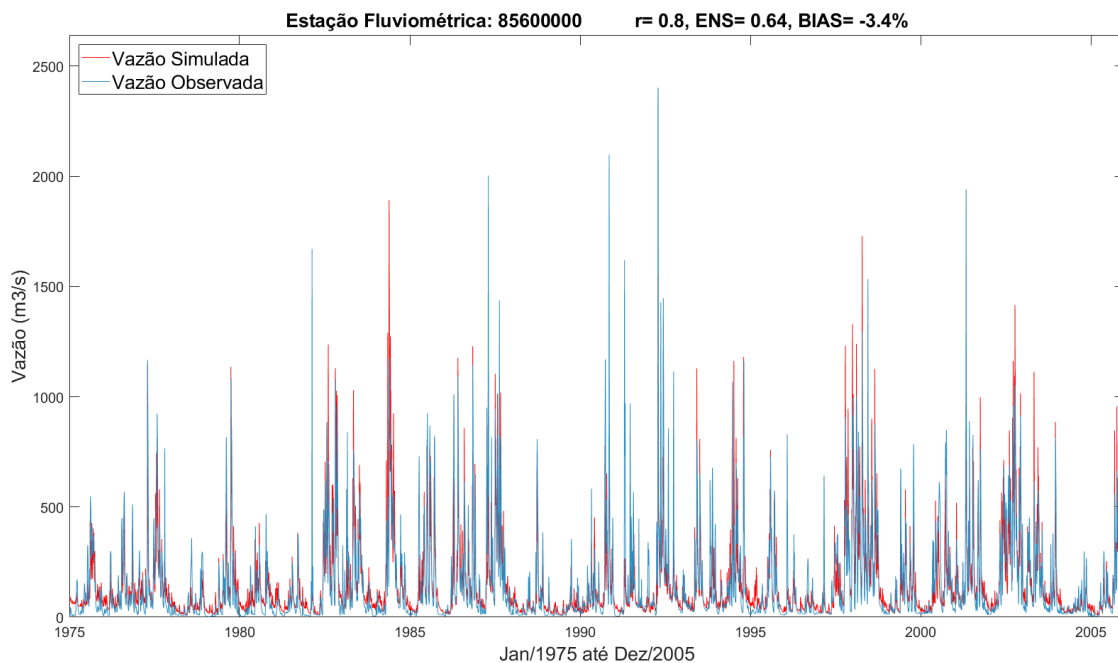
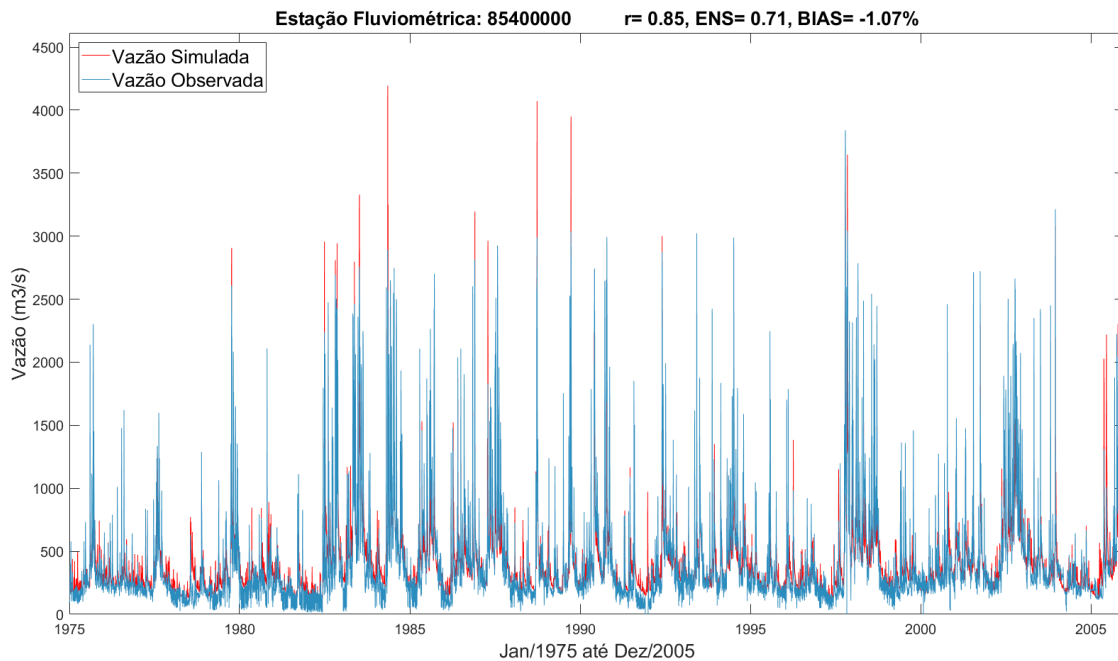
TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS; ABRH, 1998, 669p.

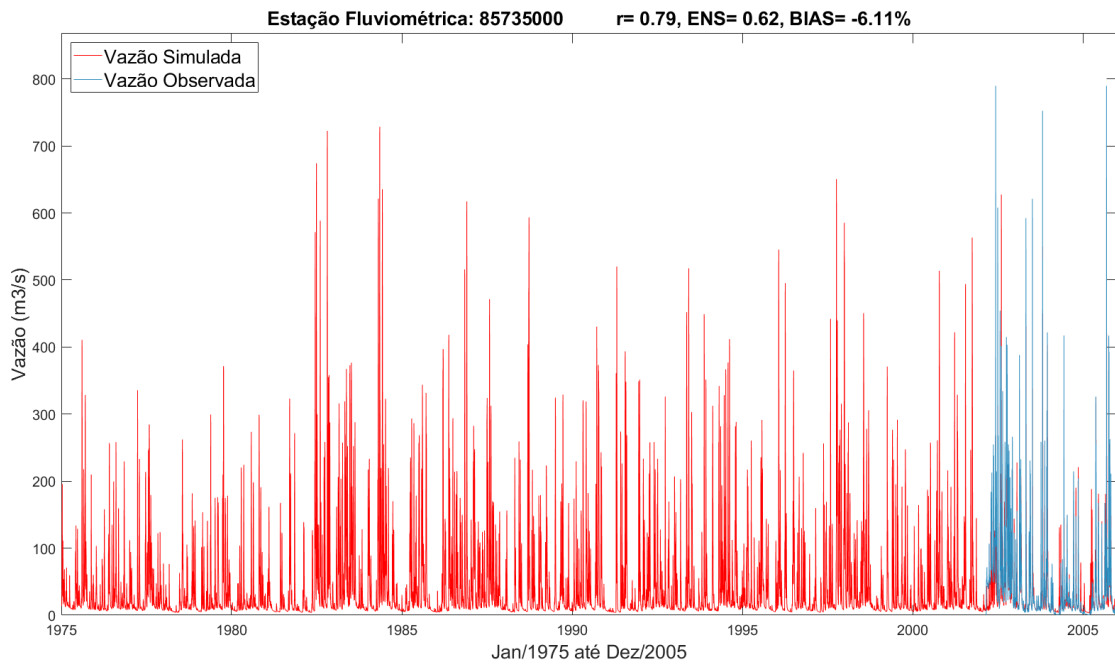
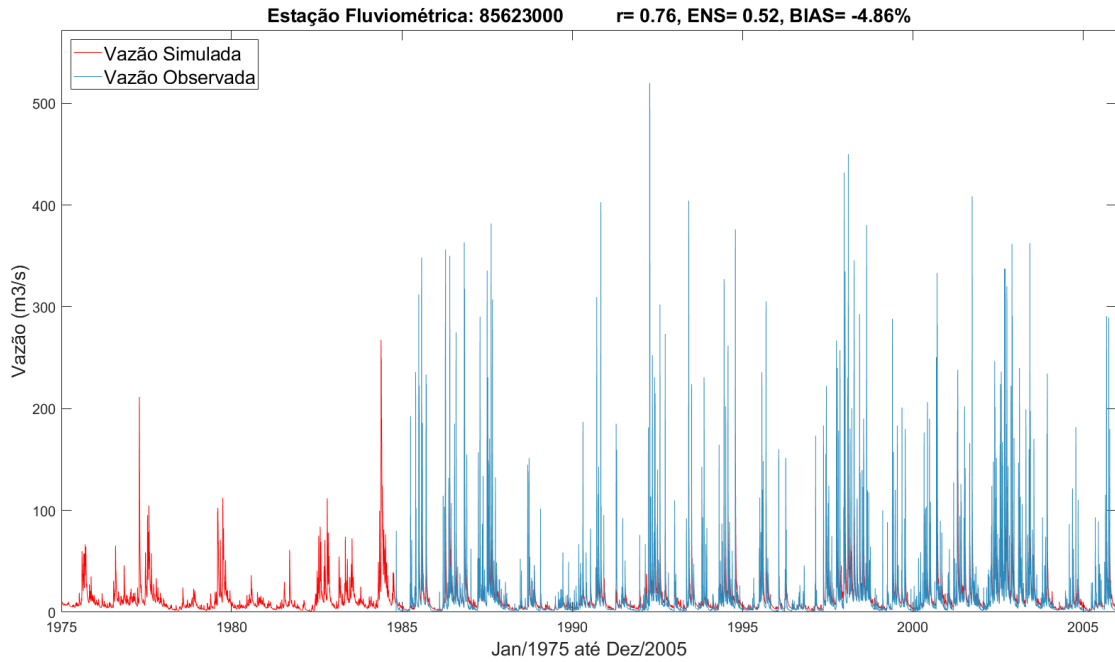
WILLIAMS, J. R. **Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor**. Washington: Publication ARS-S-40. US Department of Agriculture, 1975.

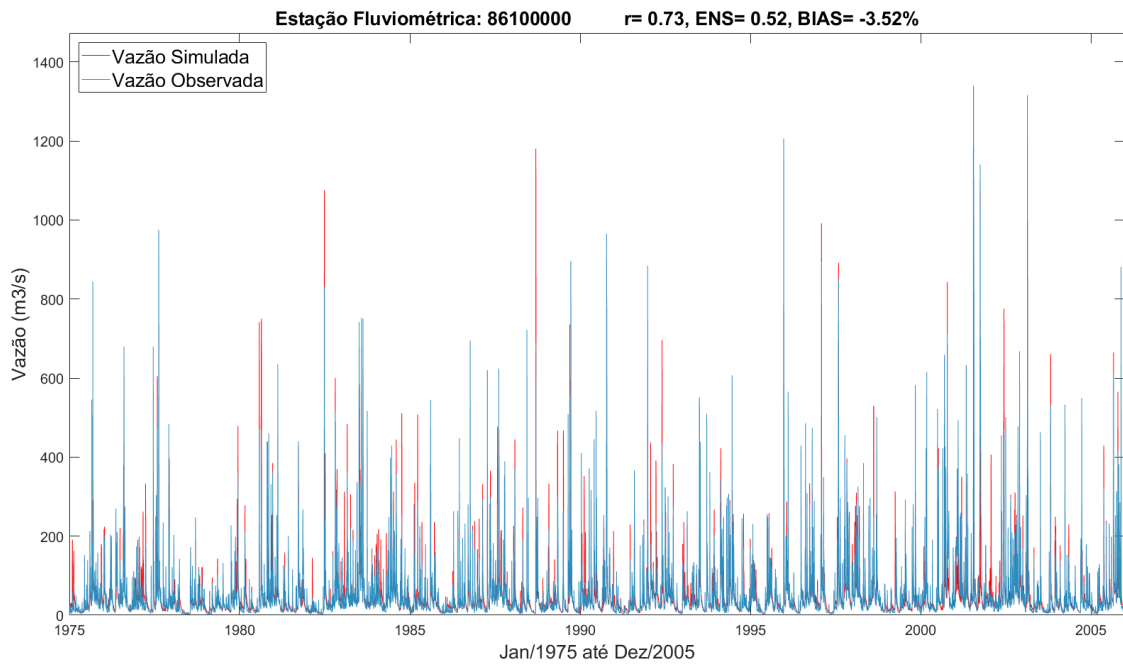
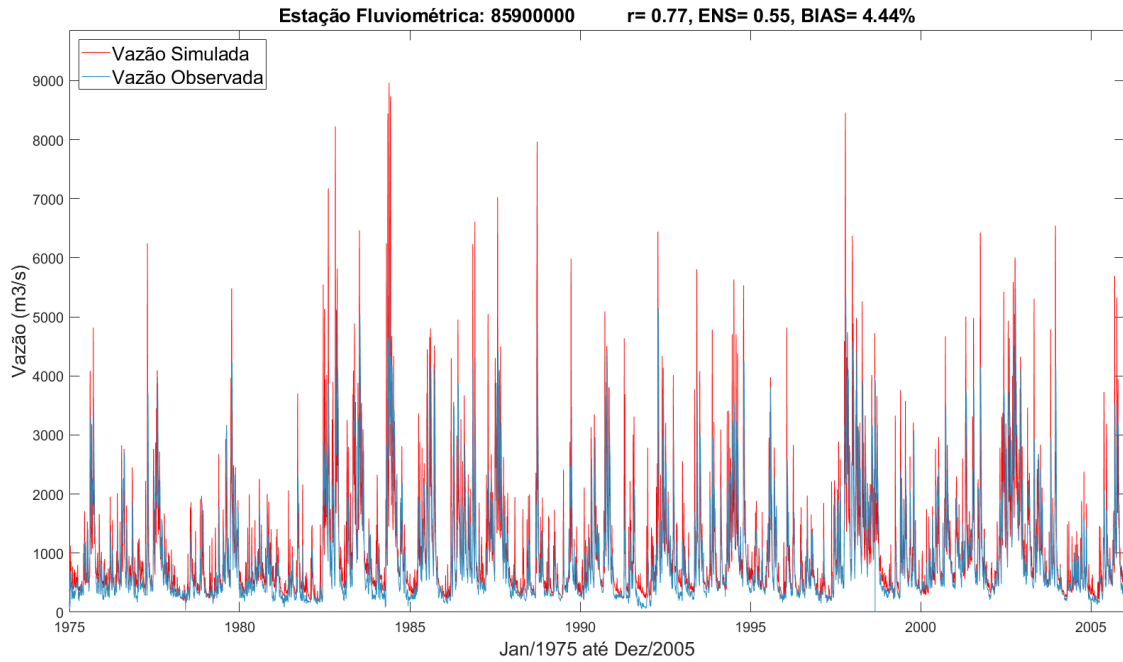
YANG, C. T. **Incipient motion and sediment transport**. J. Hydr. Div., 99(10), pp. 1679-1704, 1973

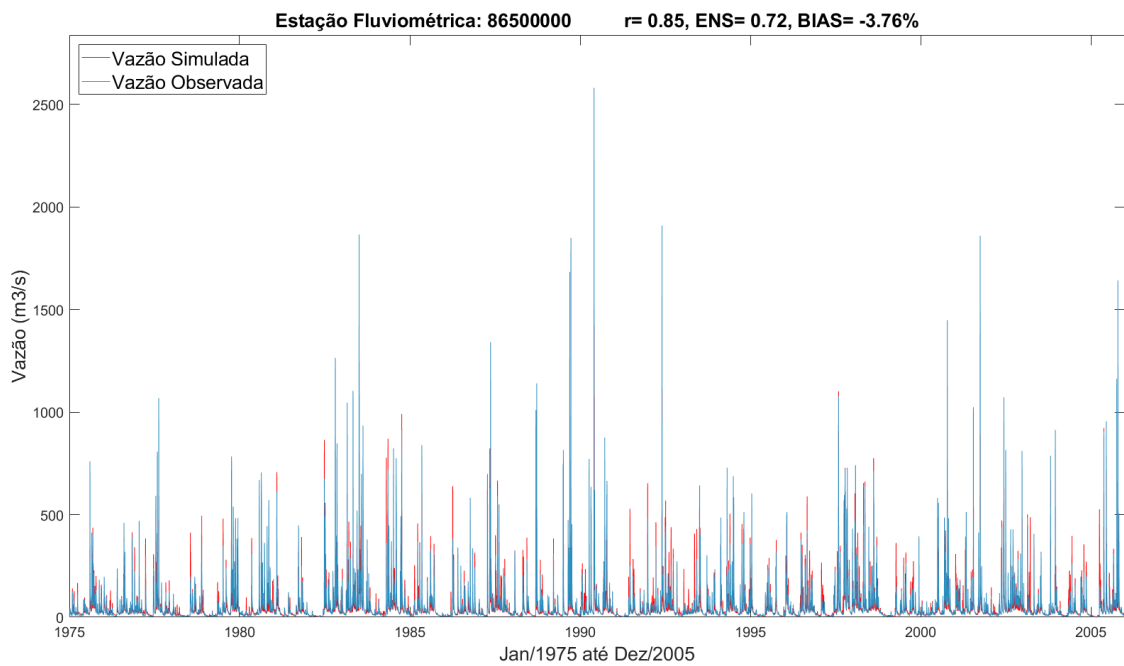
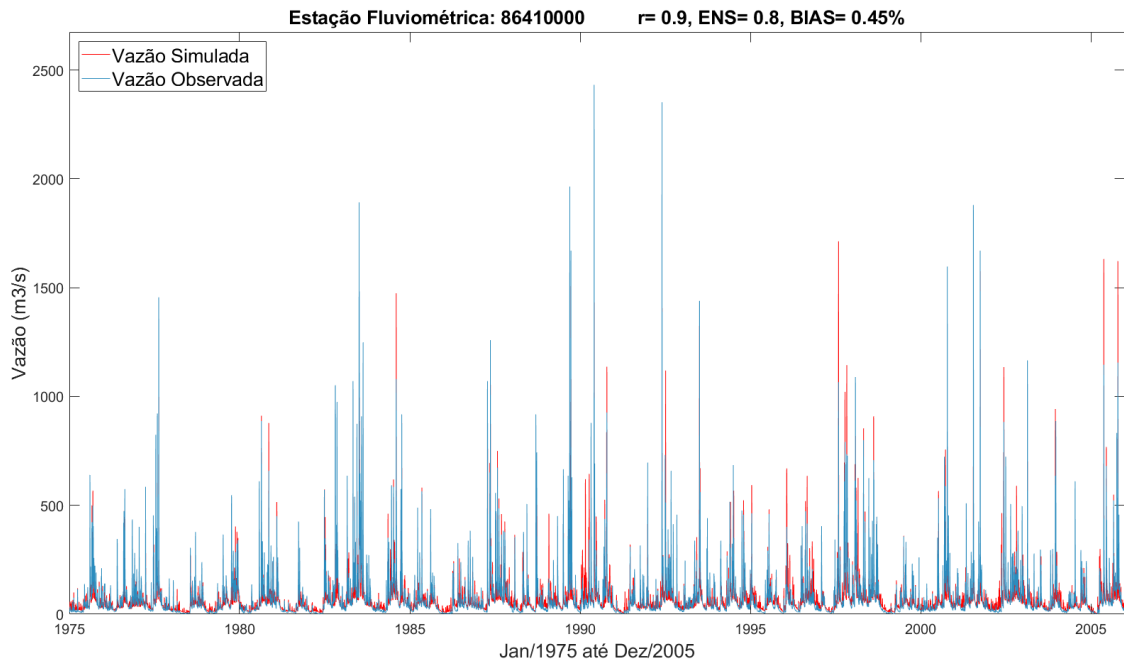
YANG, C. T. **Unit stream power equation for gravel**. J. Hydraulic Eng., ASCE, 110(12), 1984

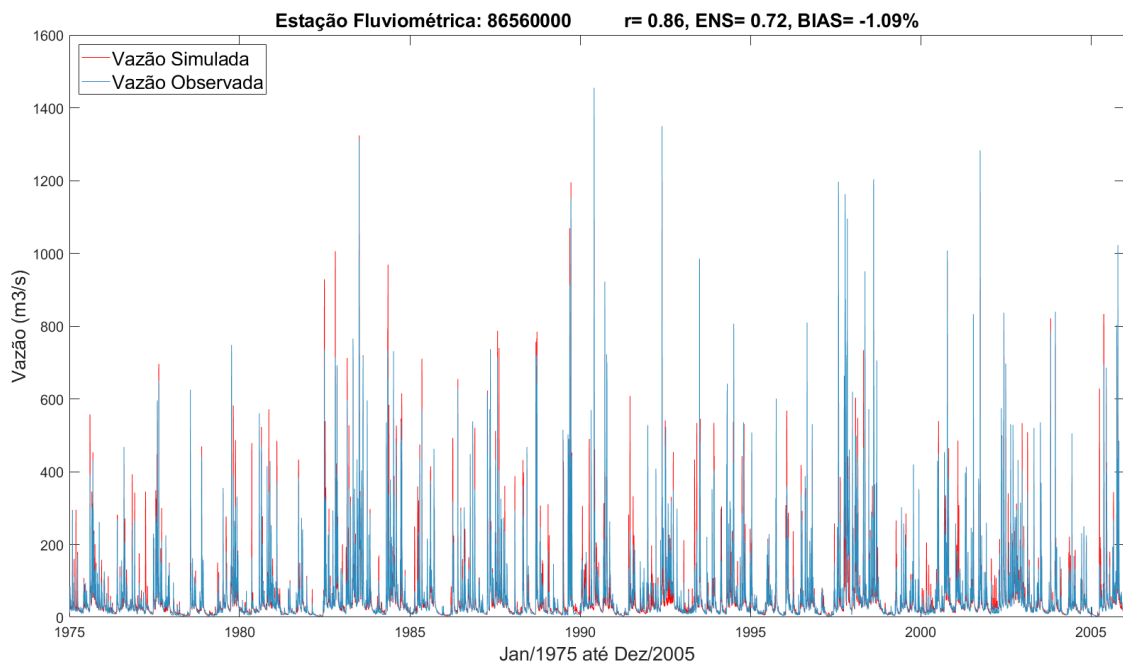
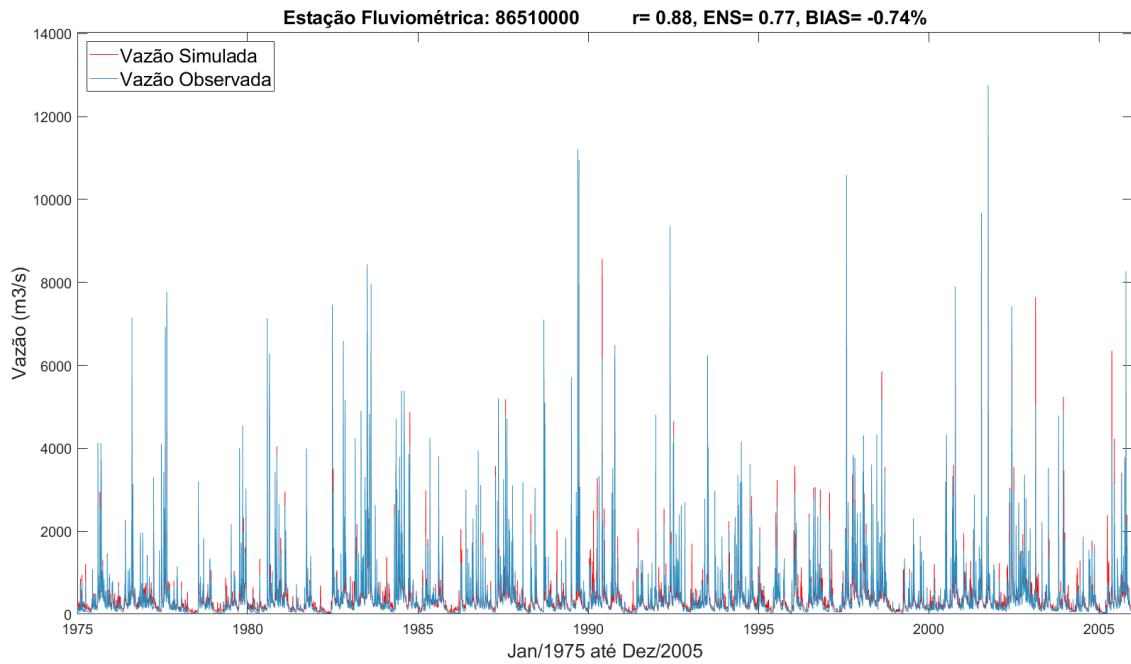
APÊNDICE I: Hidrogramas diários das vazões líquidas – Calibração (1975 até 2005)

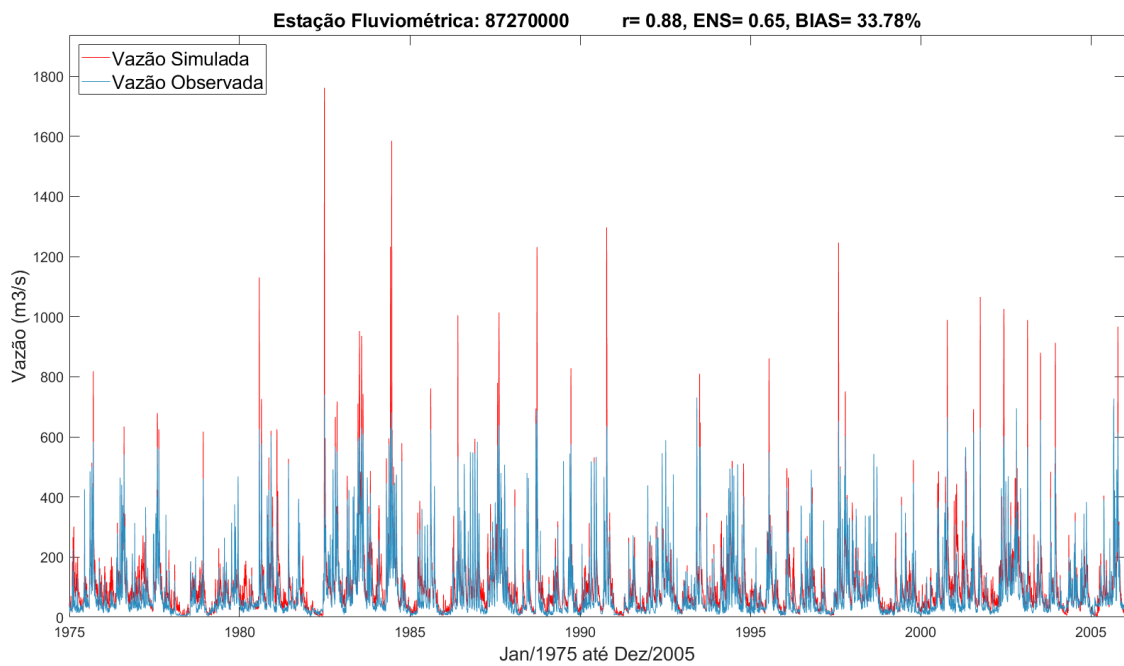
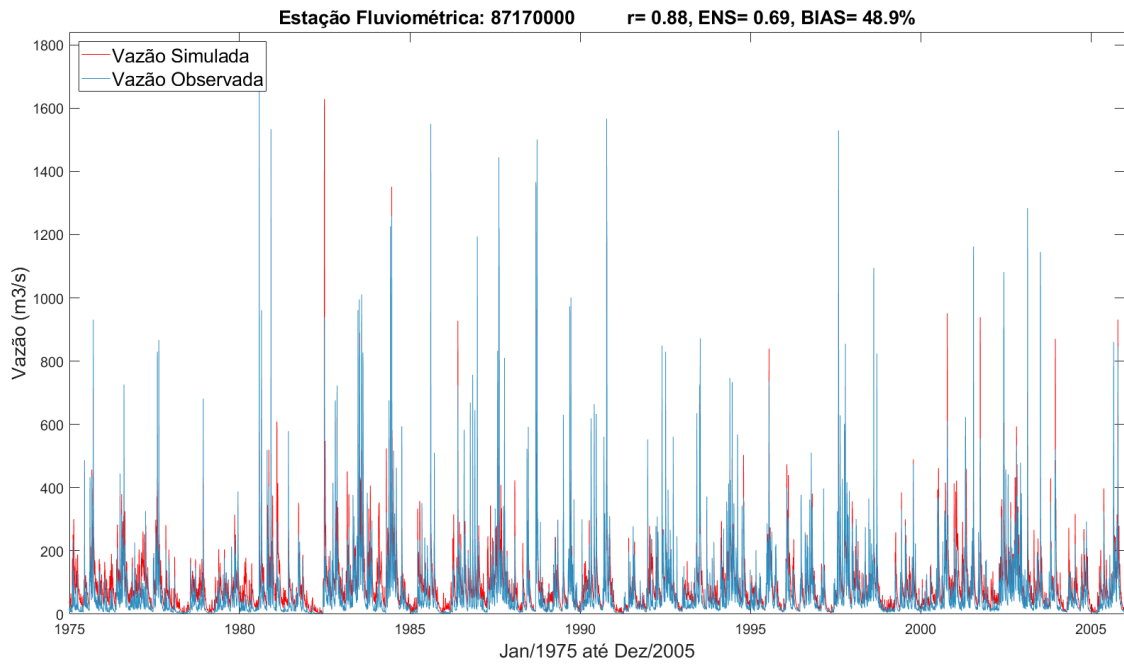


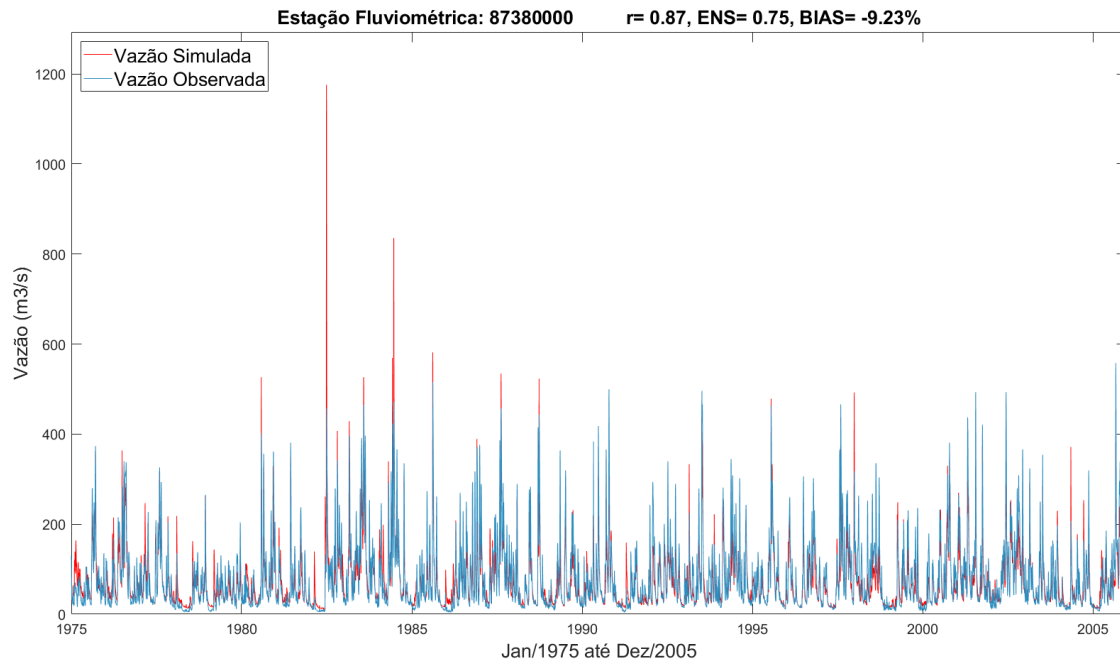




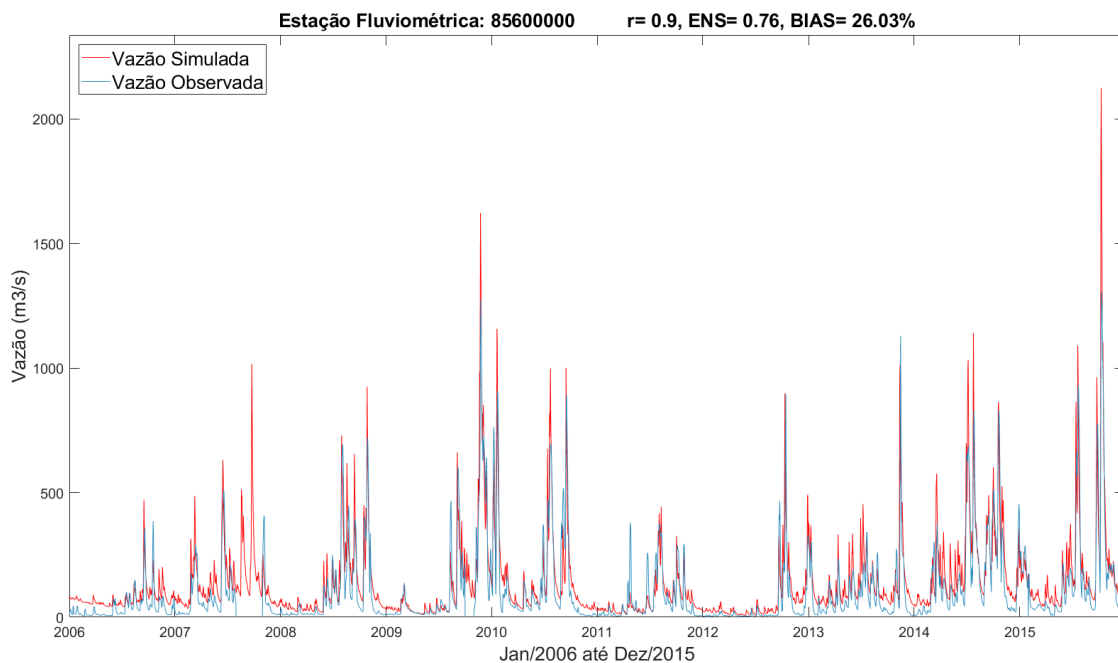
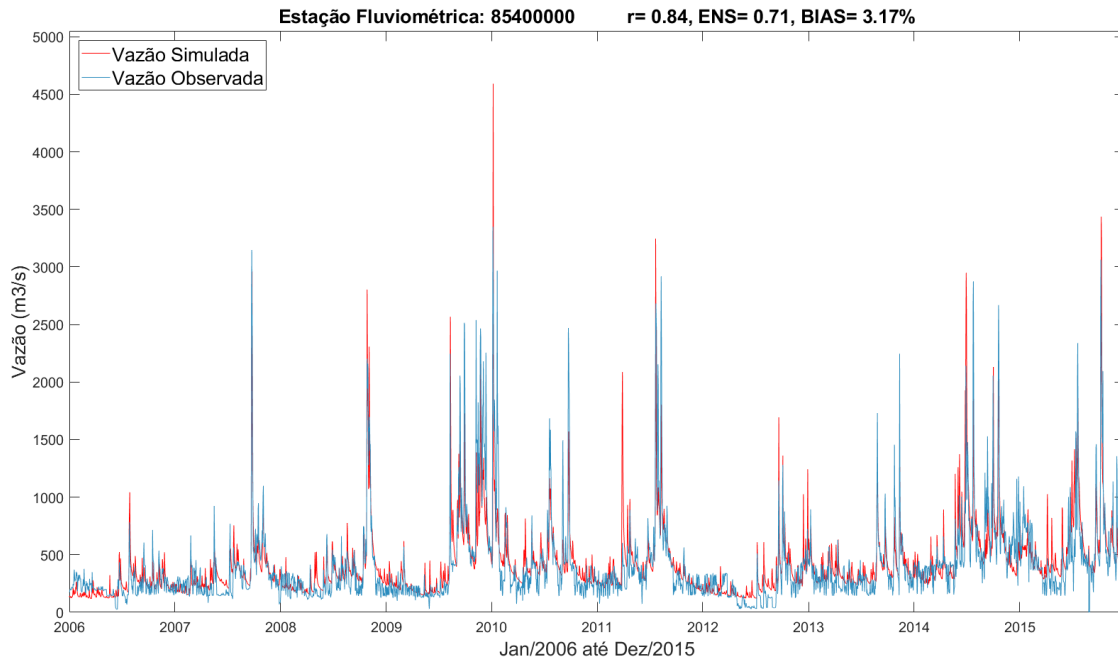


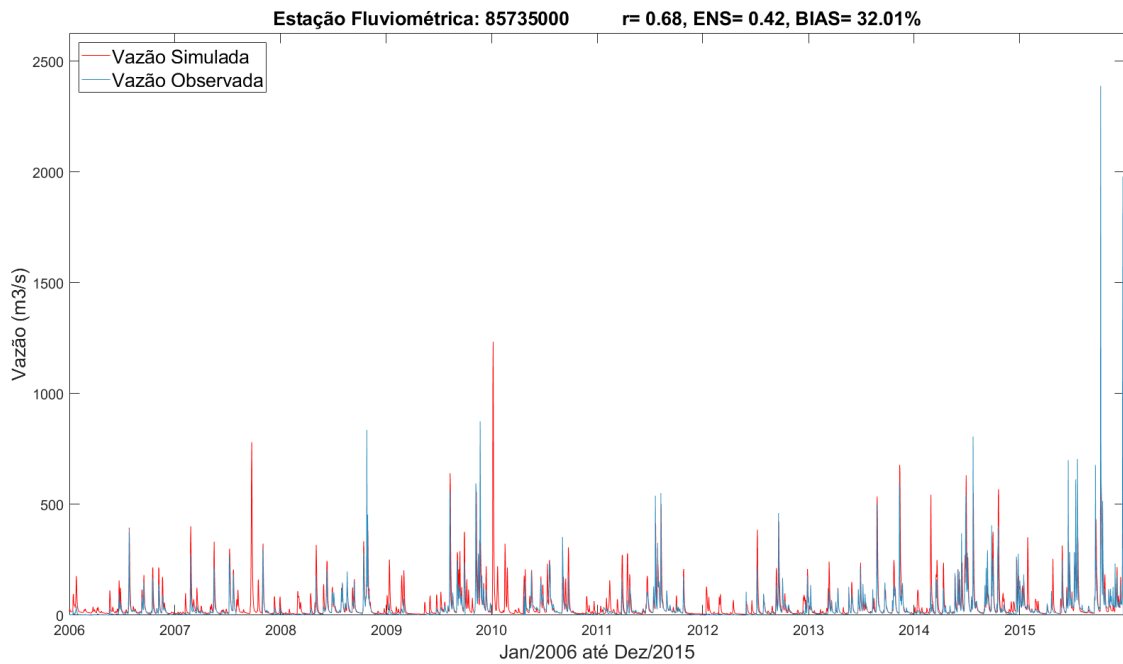
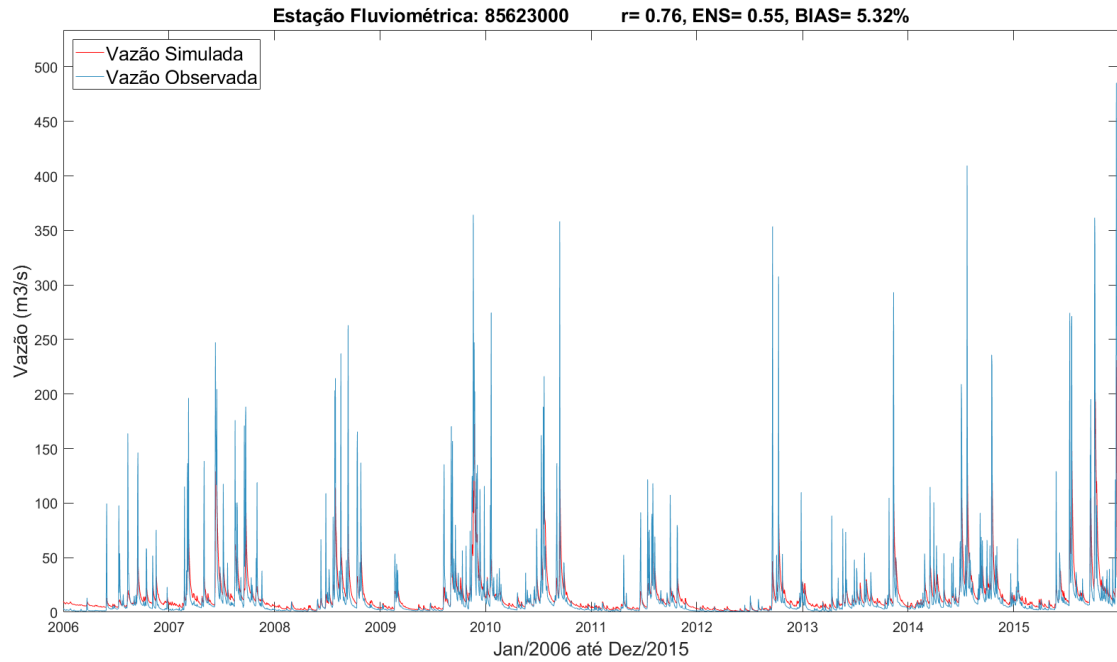


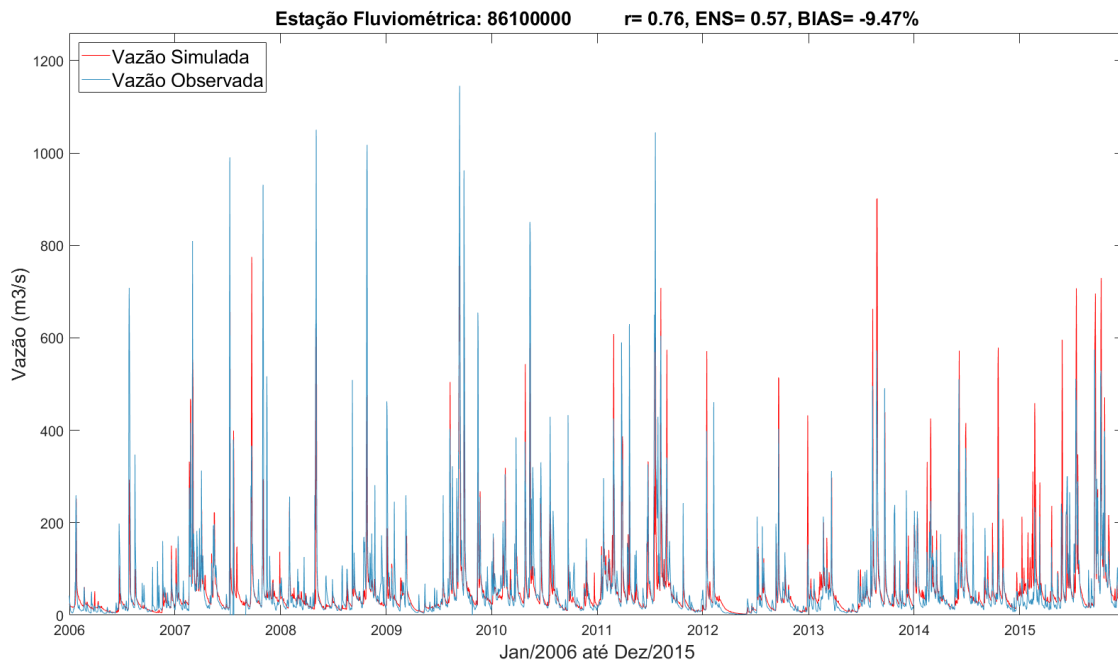
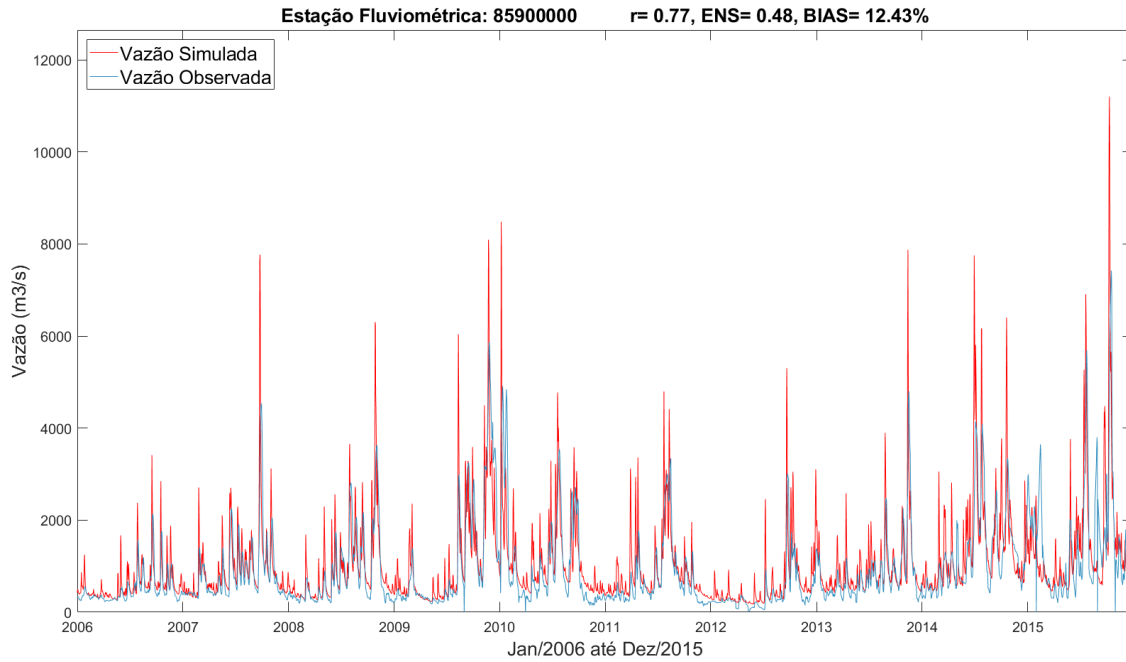


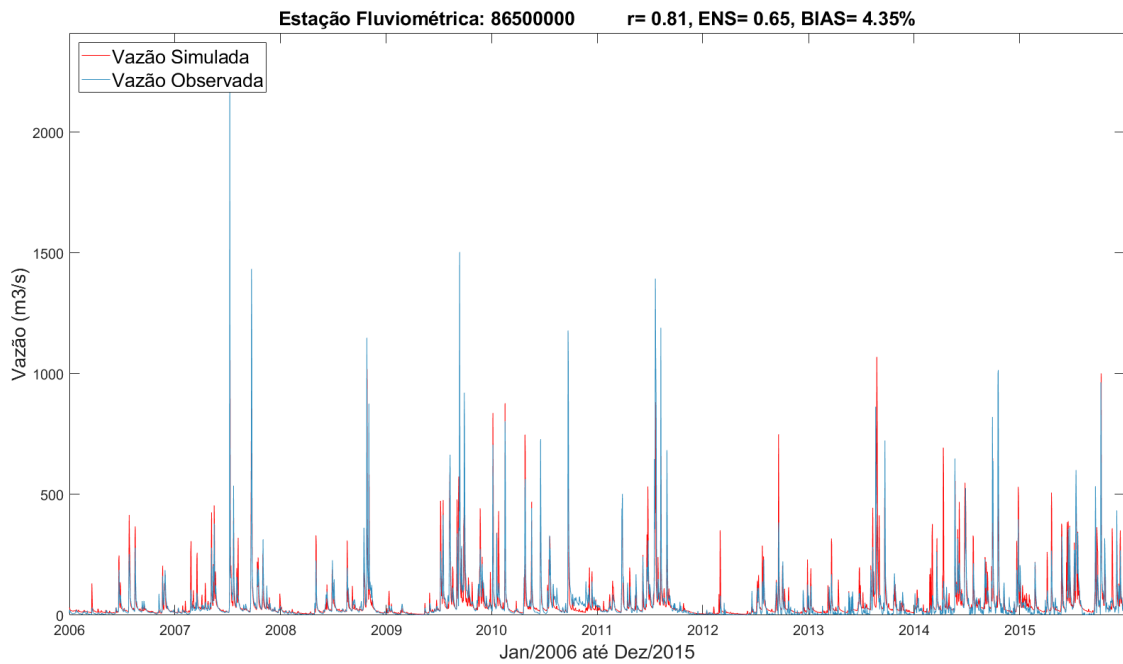
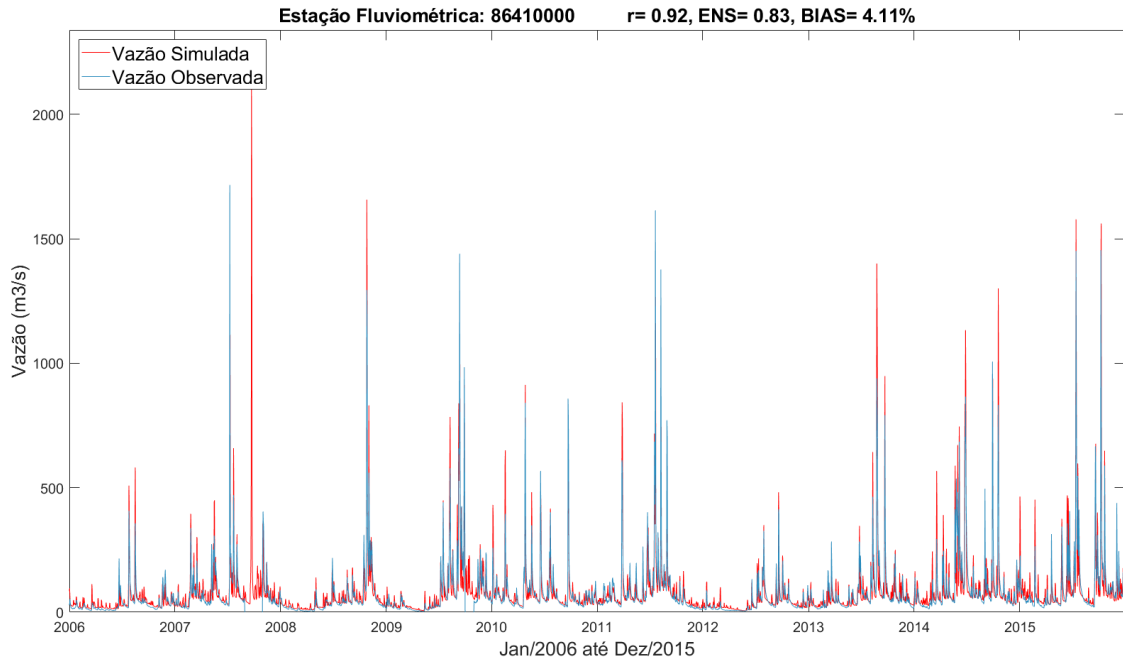


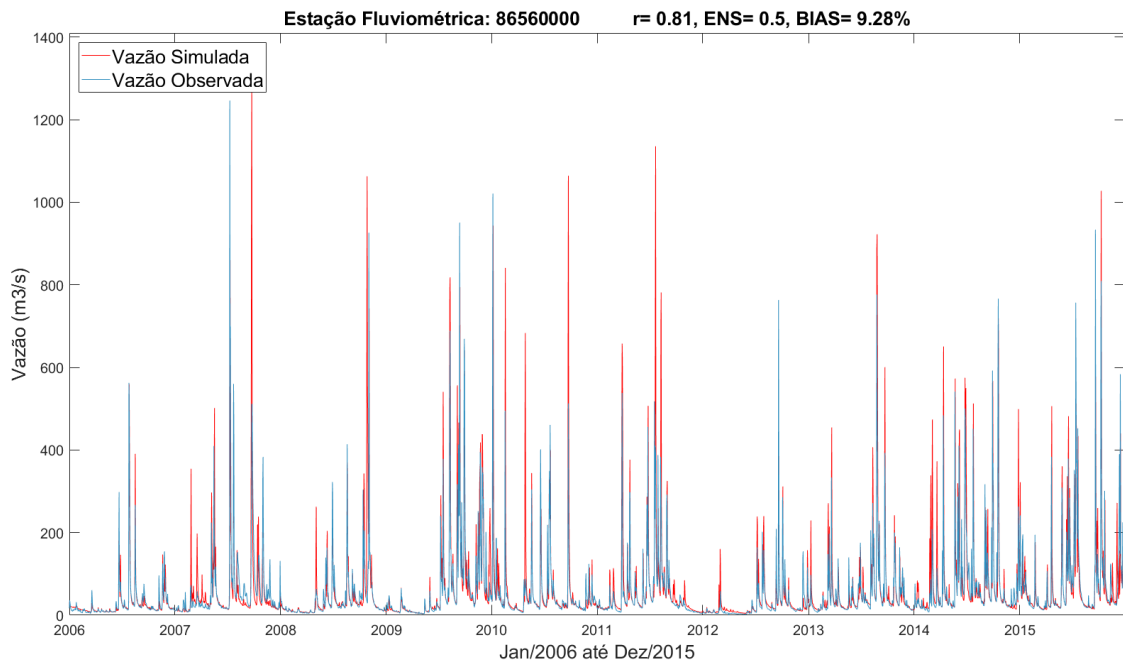
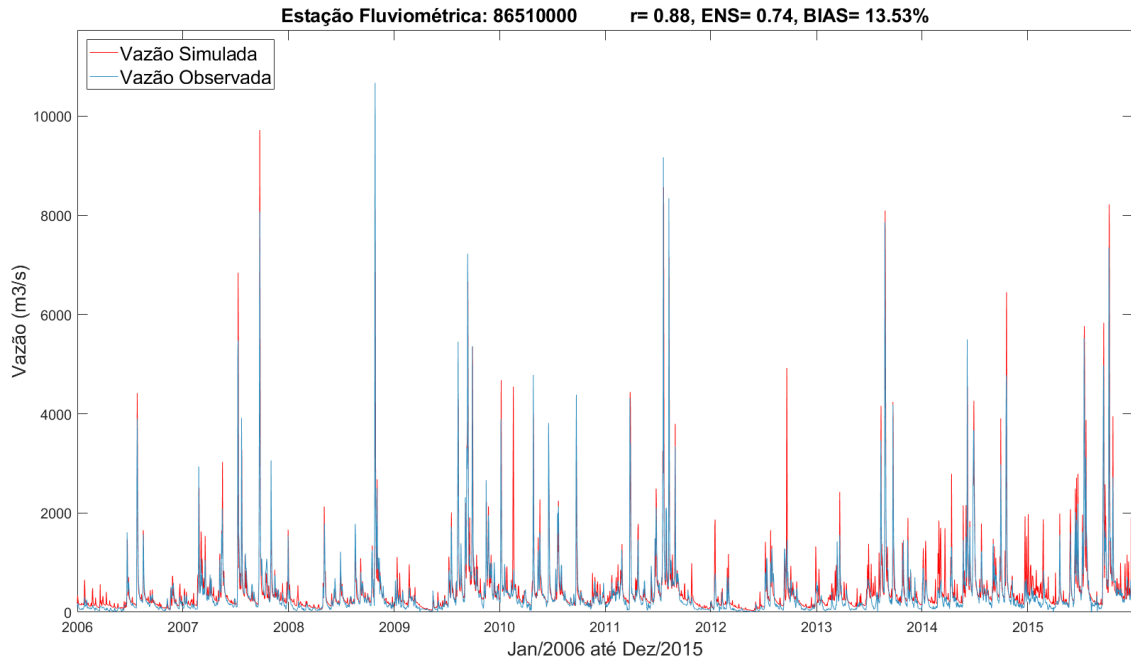
APÊNDICE II: Hidrogramas diários das vazões líquidas - Validação (2006 até 2015)

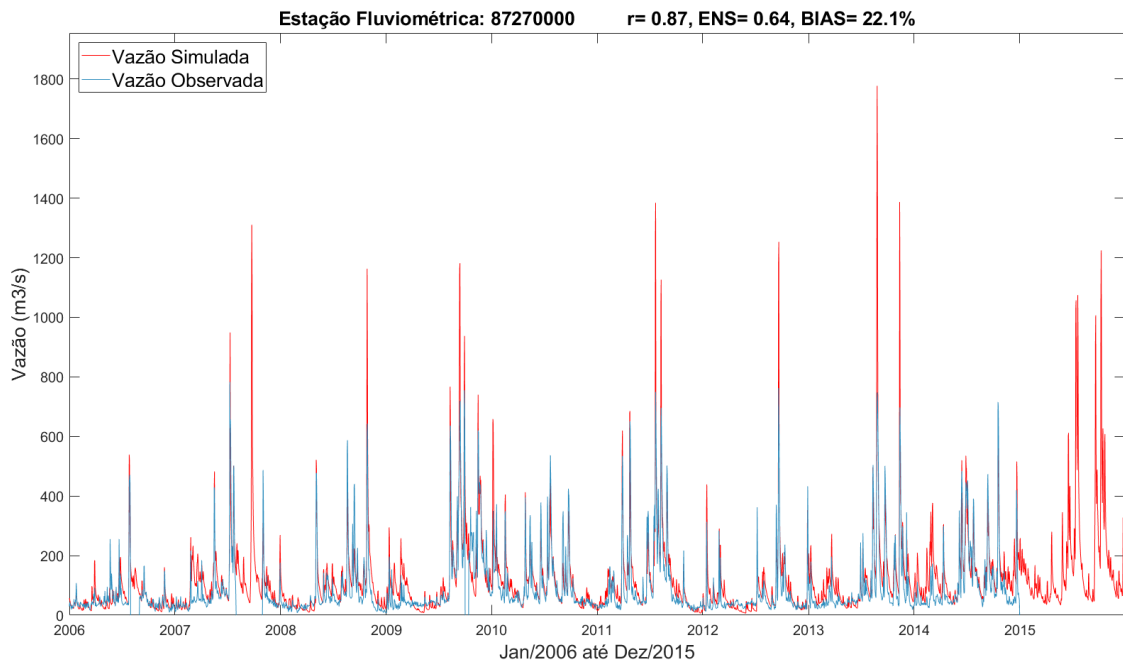
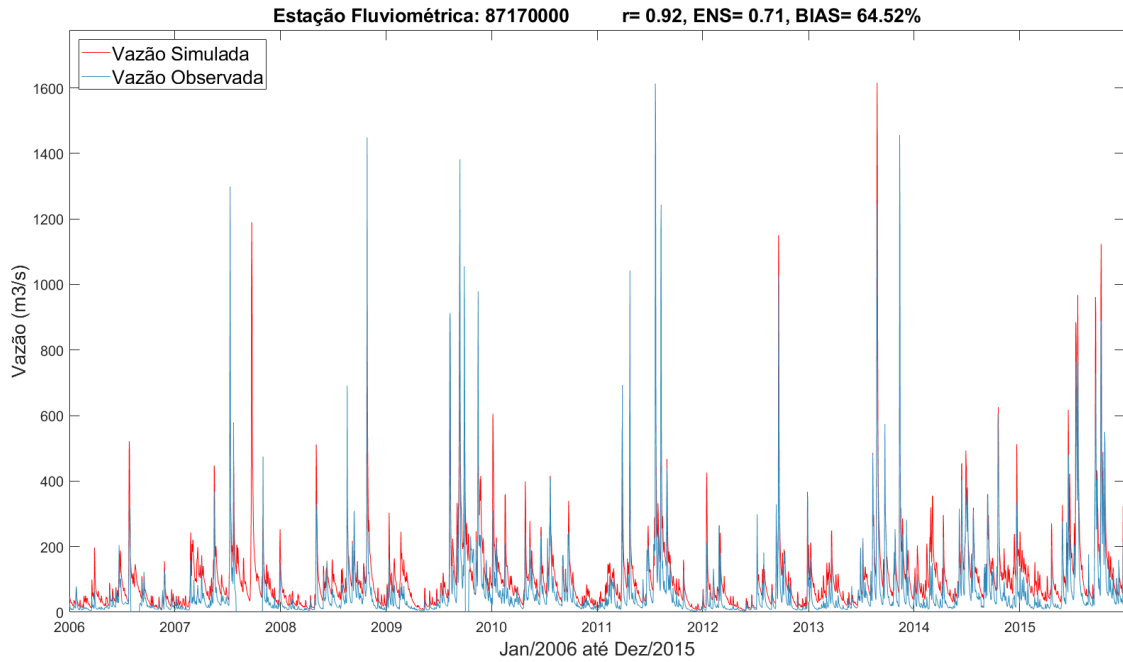


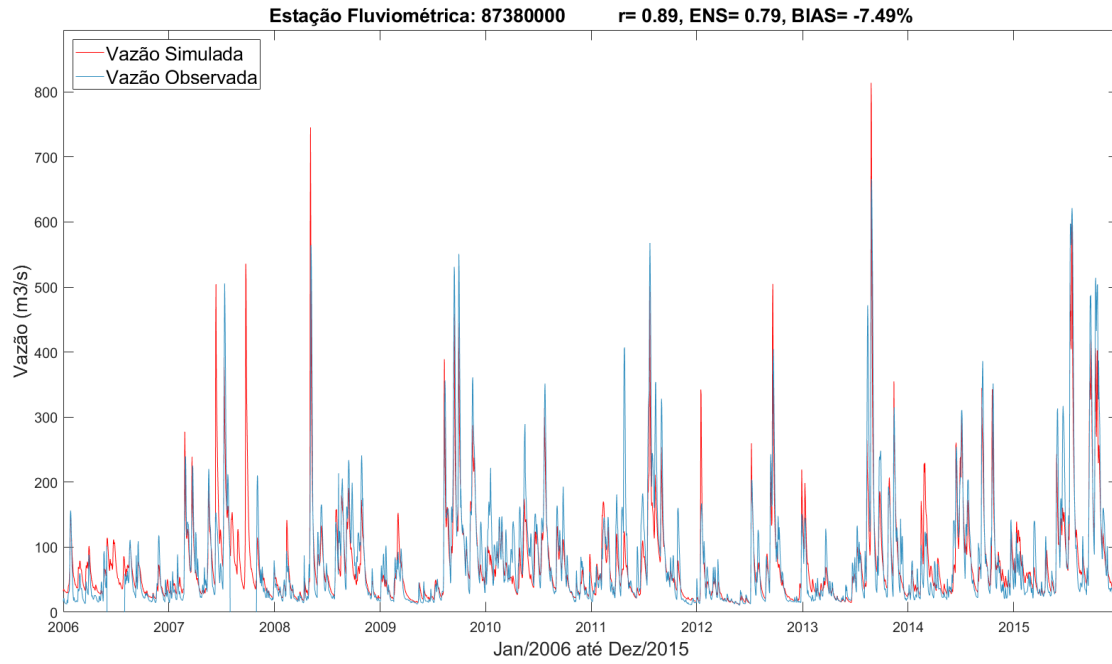




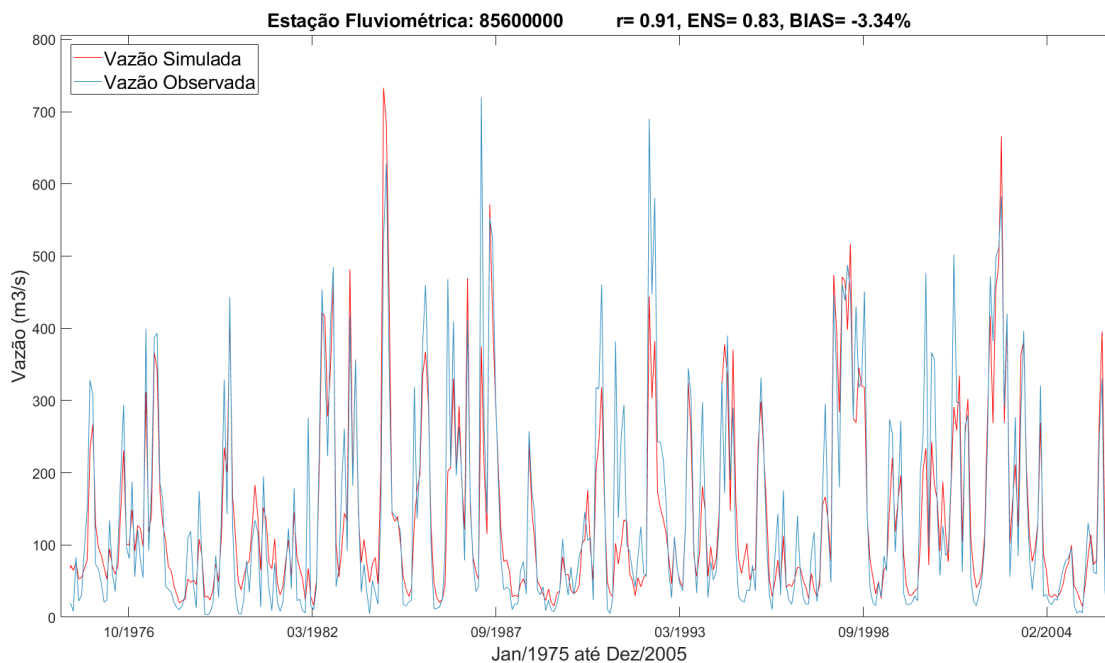
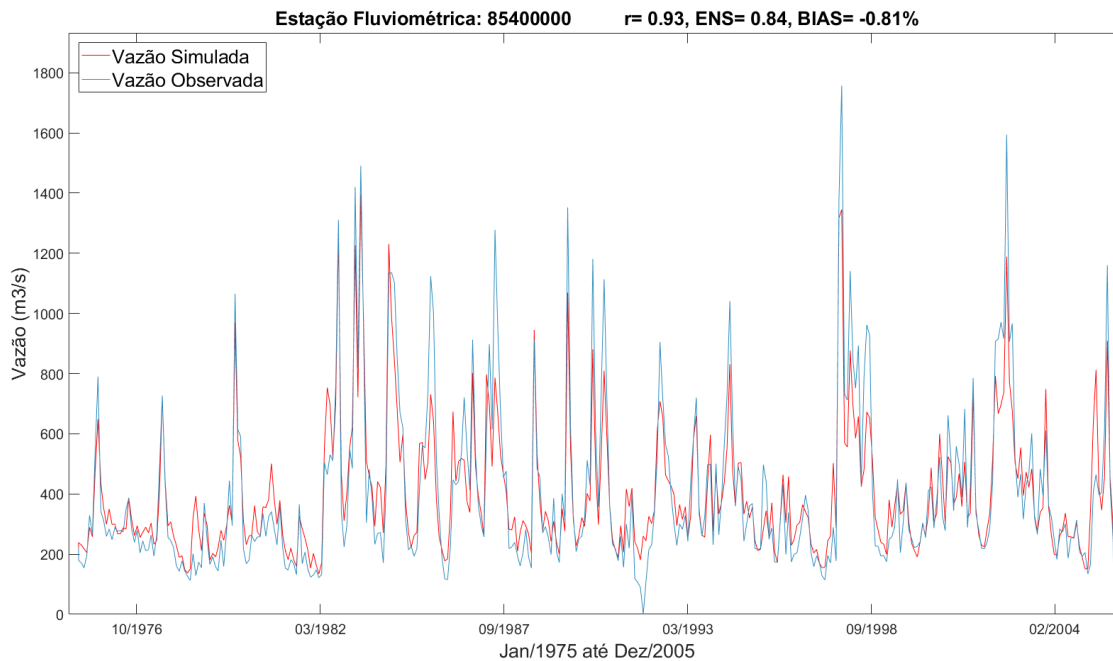


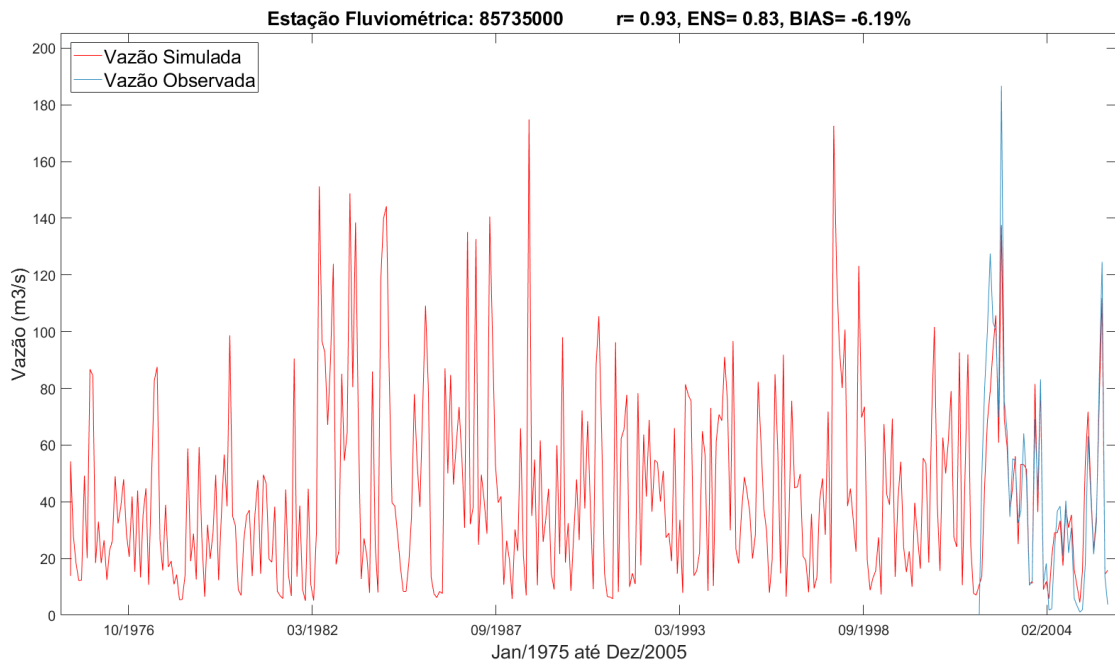
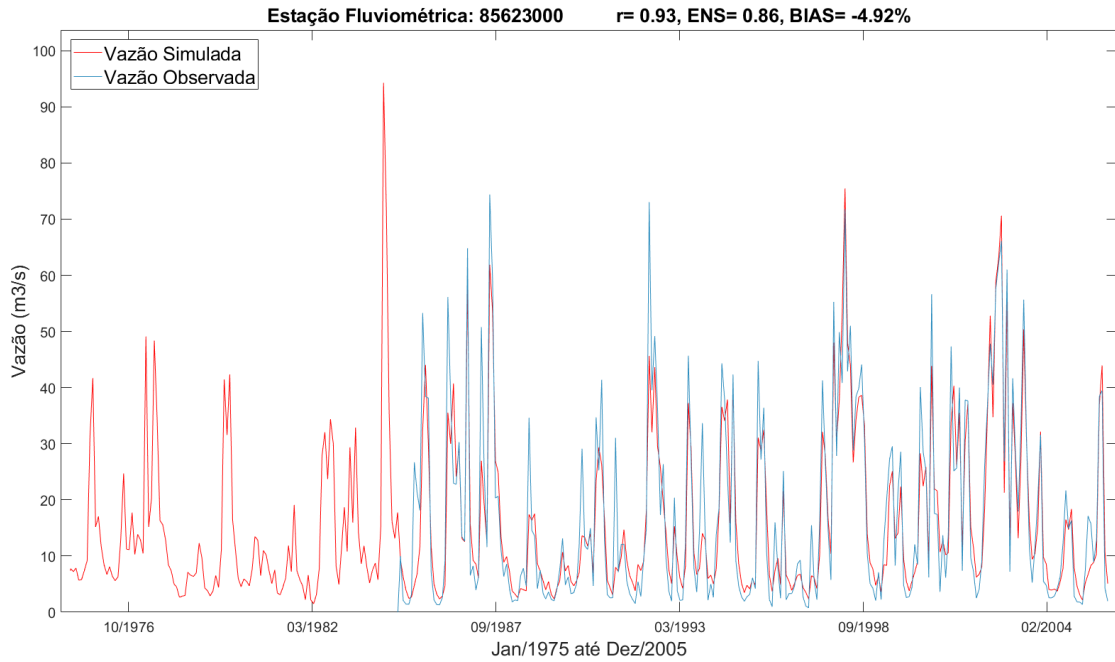


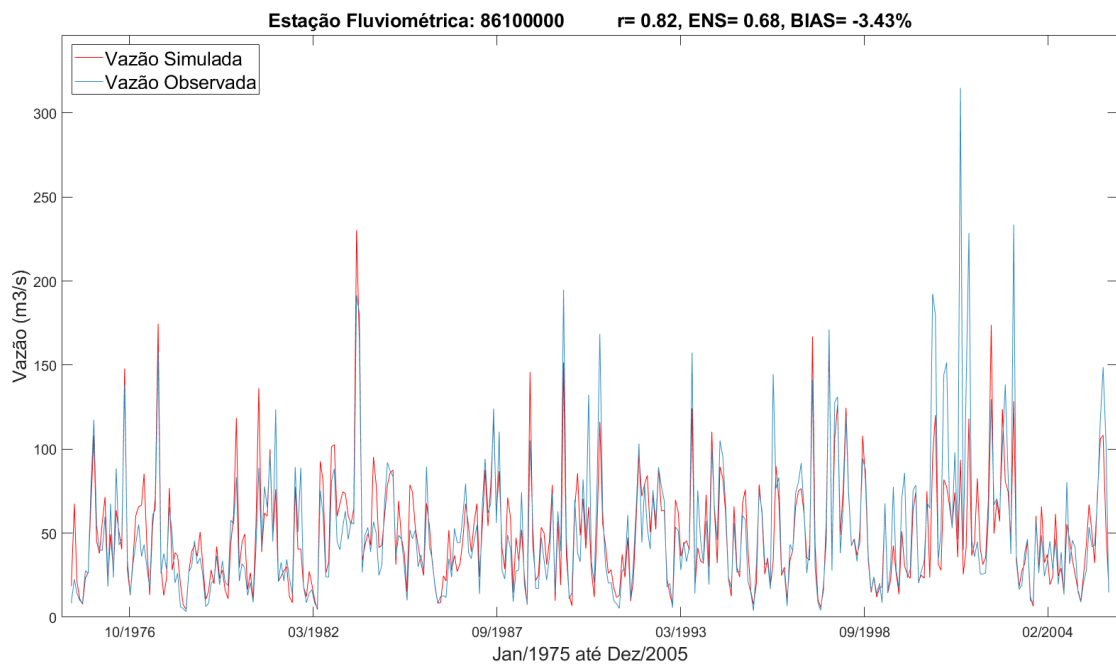
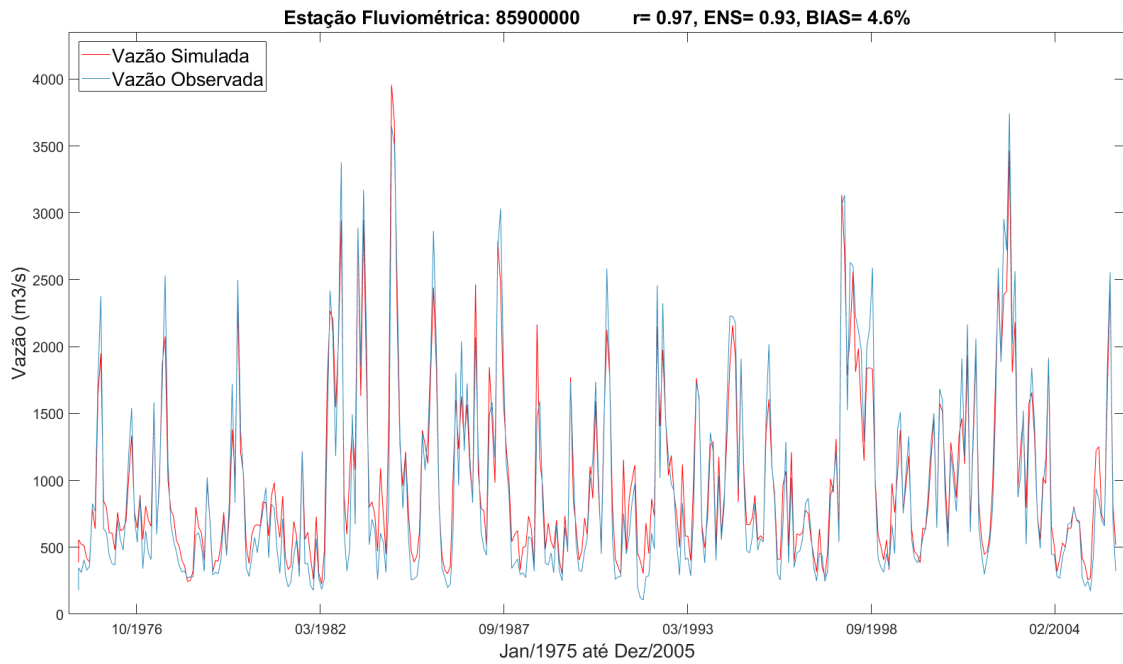


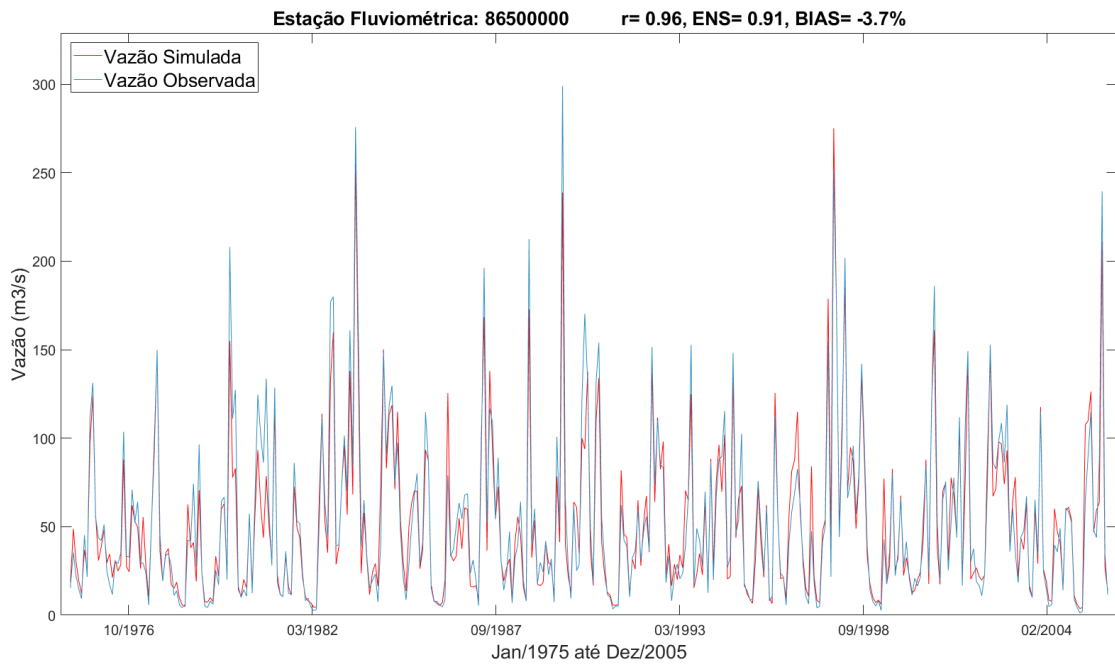
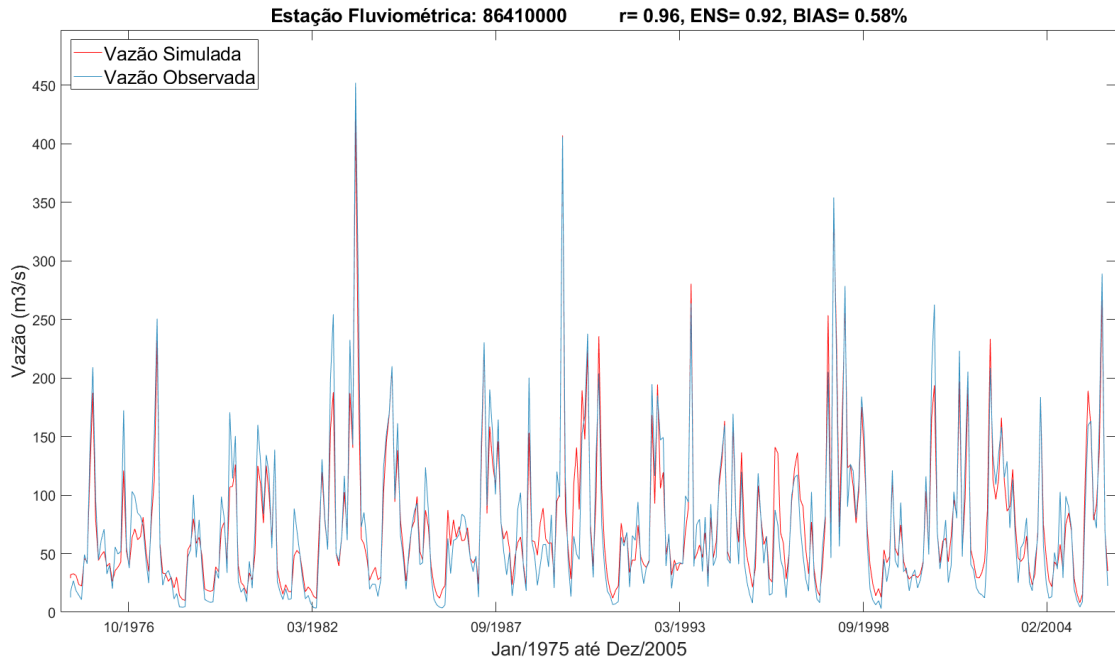


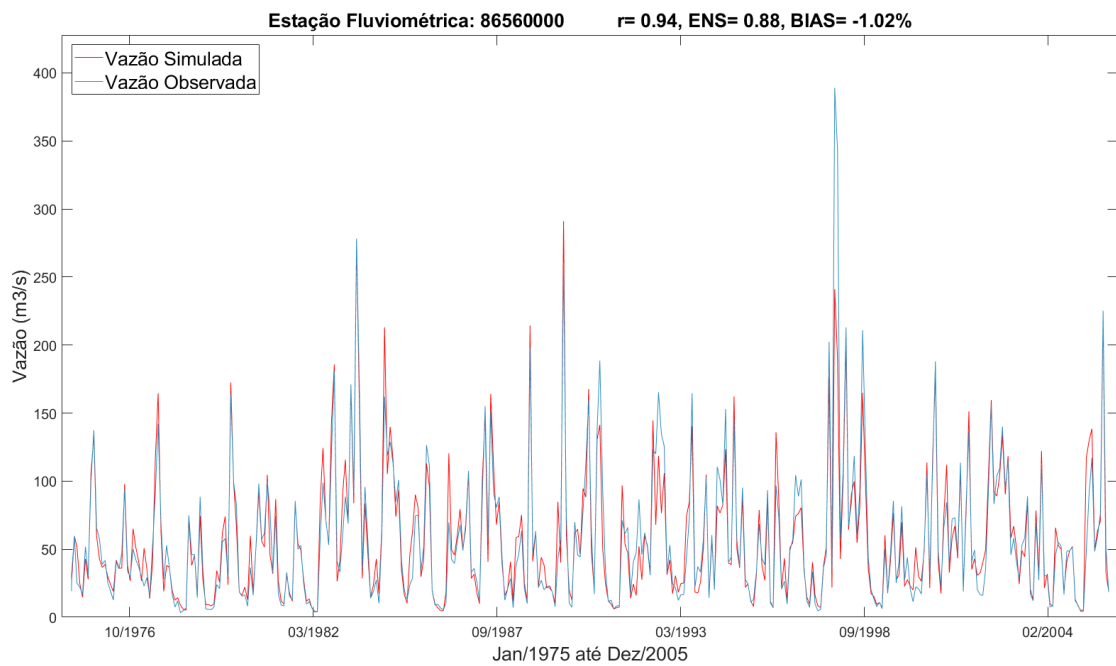
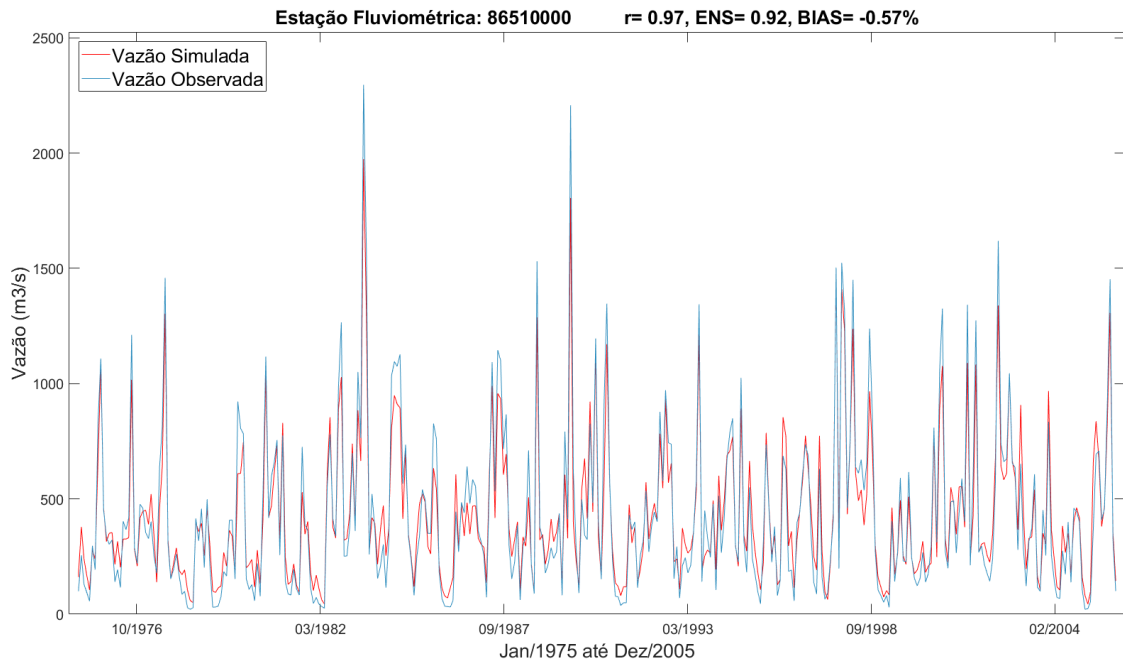
APÊNDICE III: Hidrogramas mensais das vazões líquidas - Calibração (1975 até 2005)

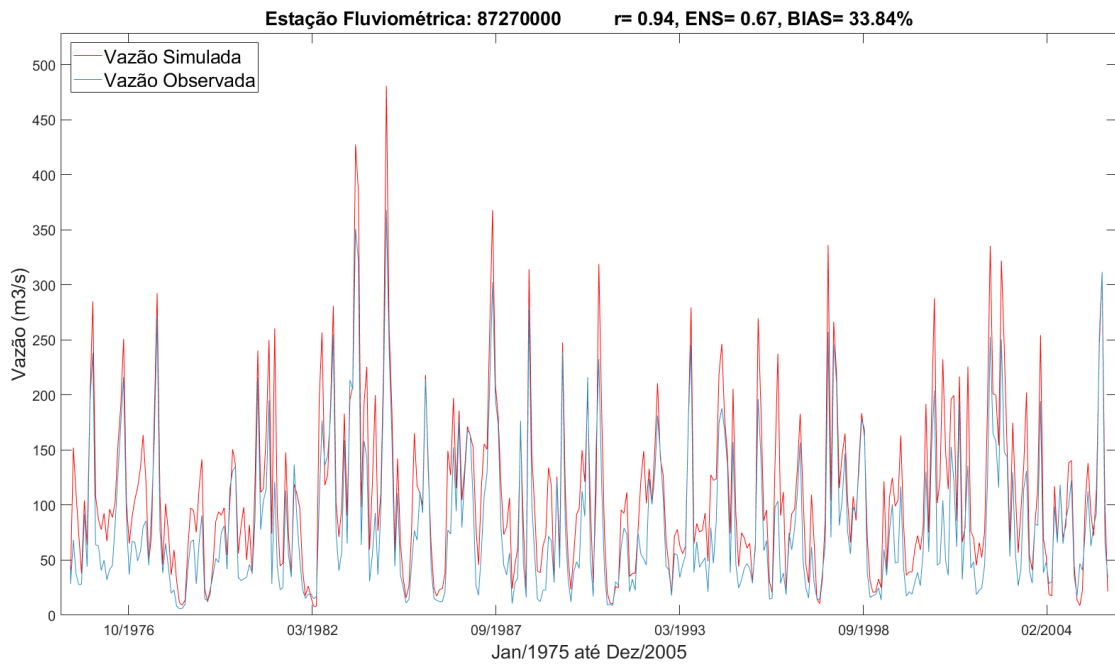
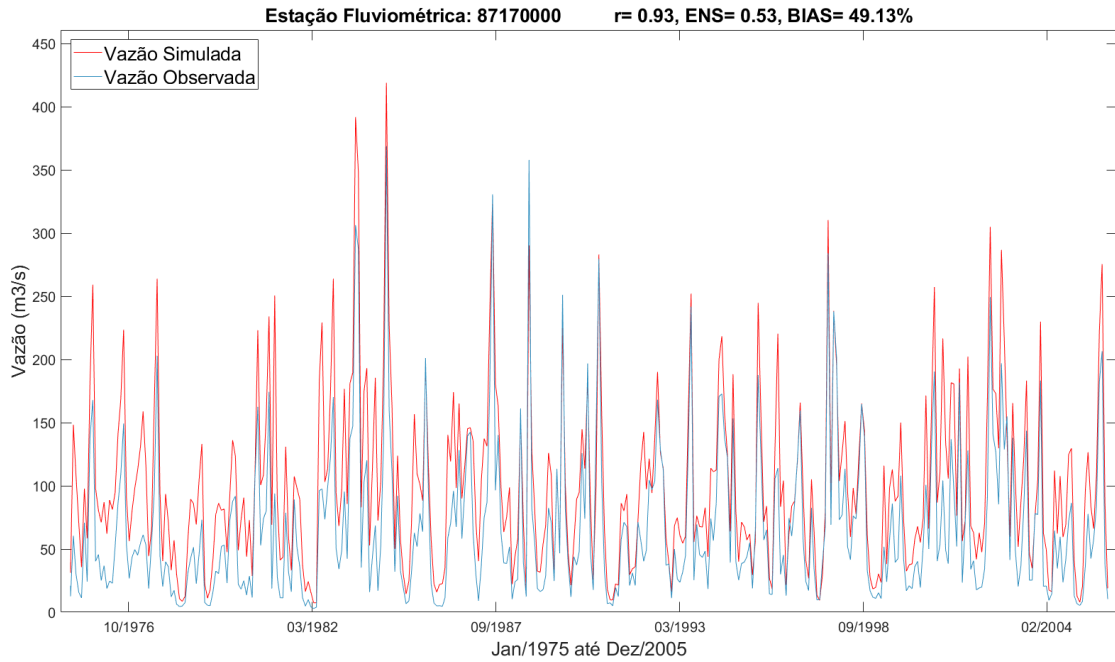


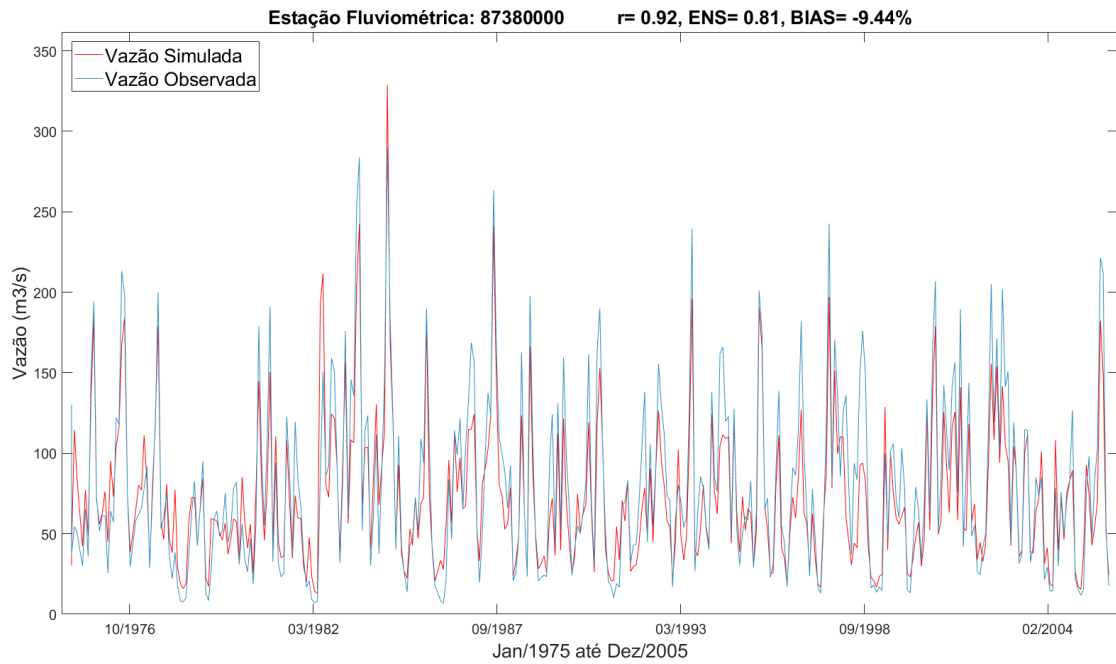




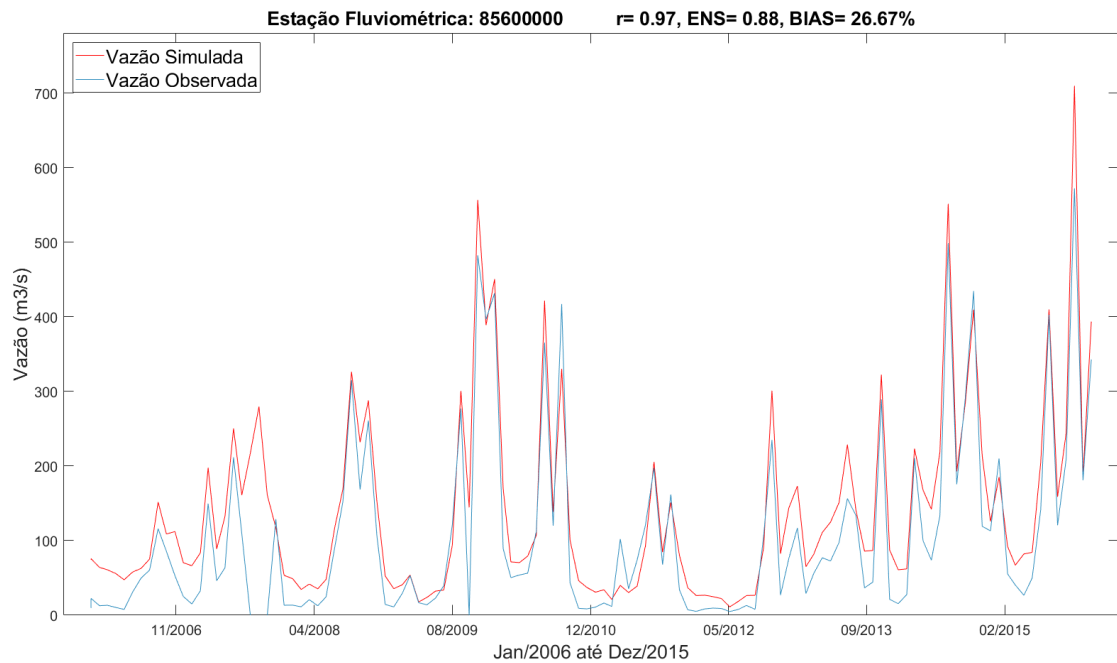
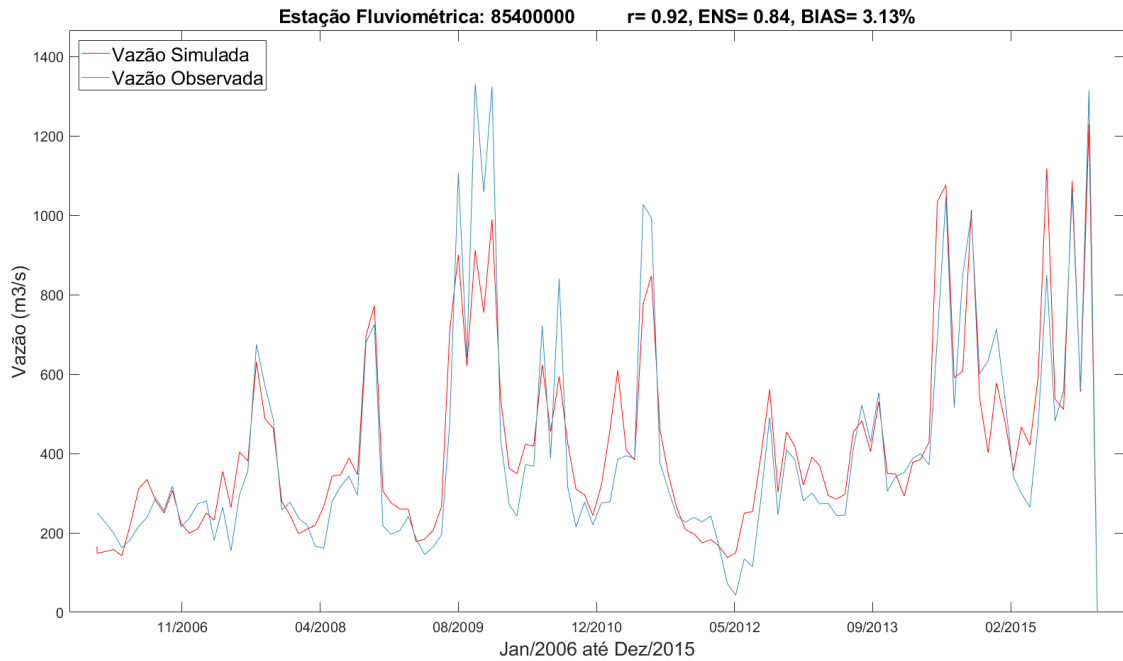


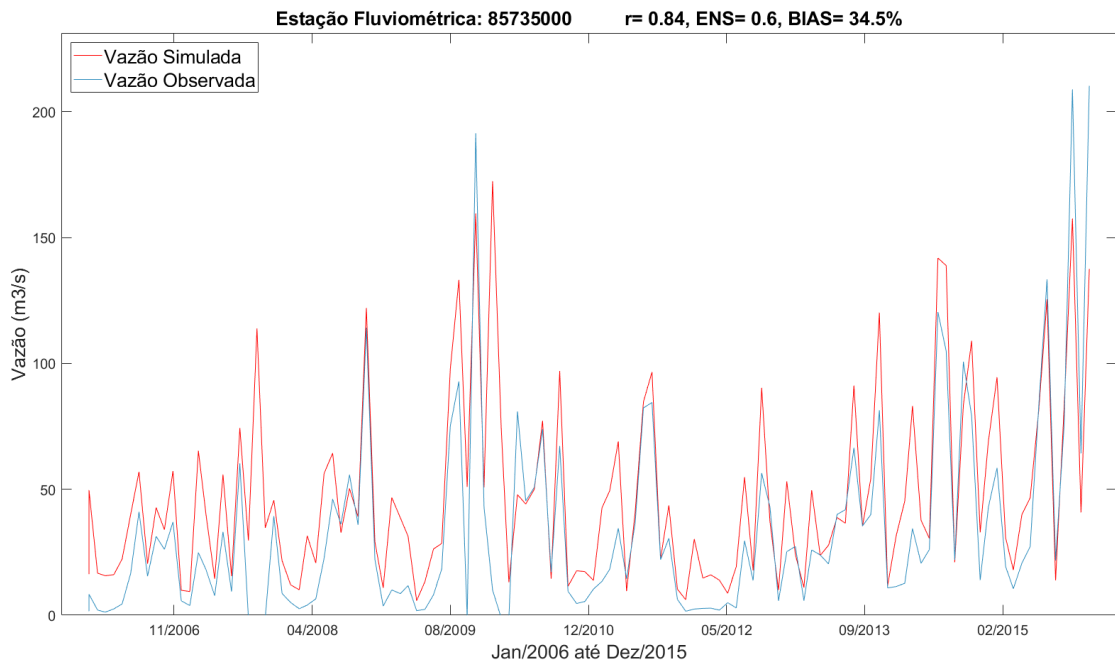
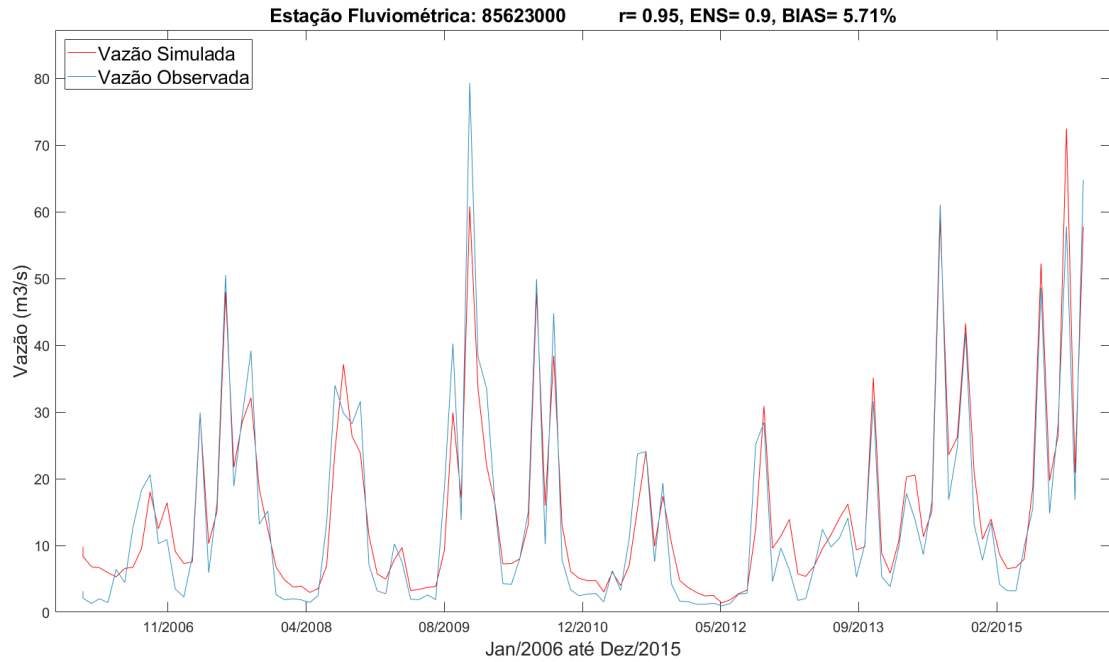


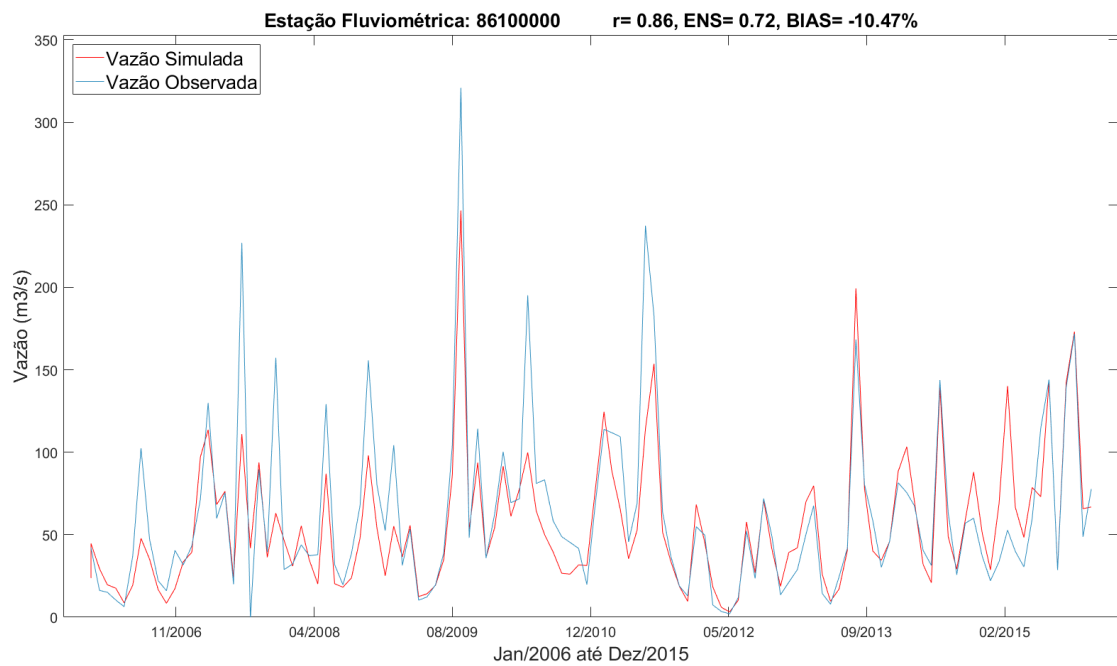
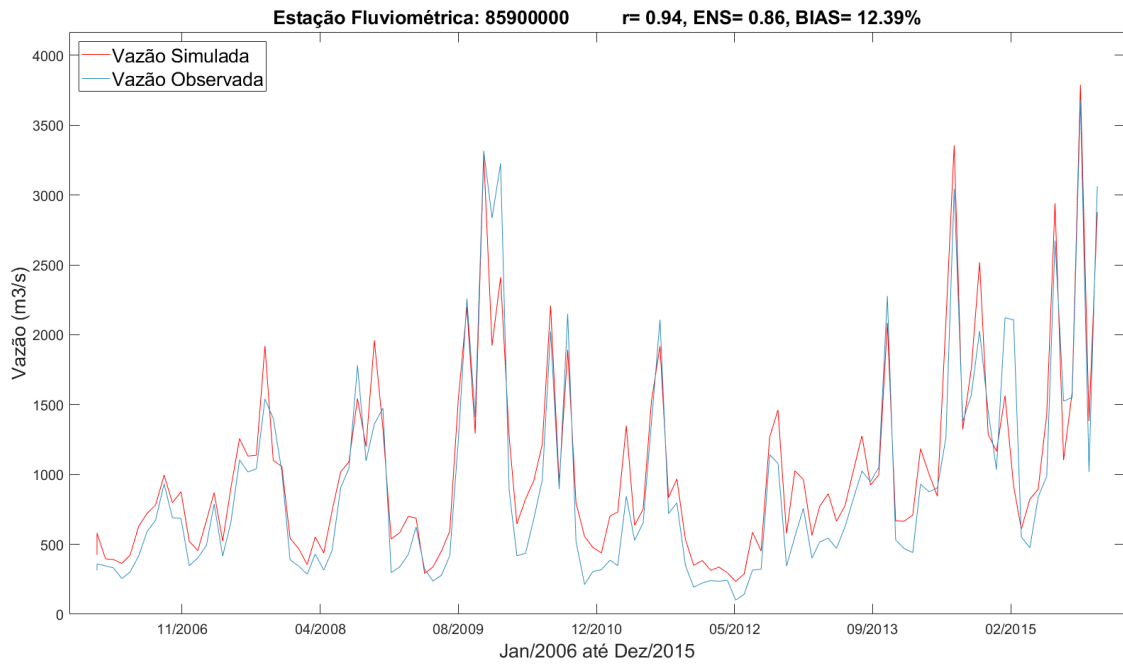


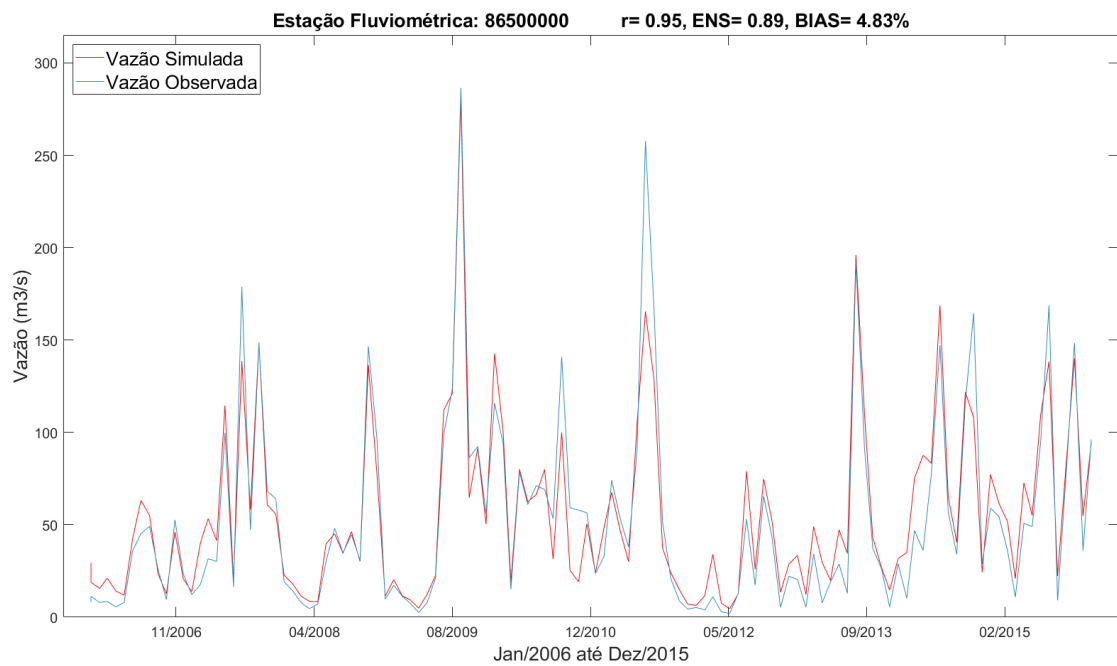
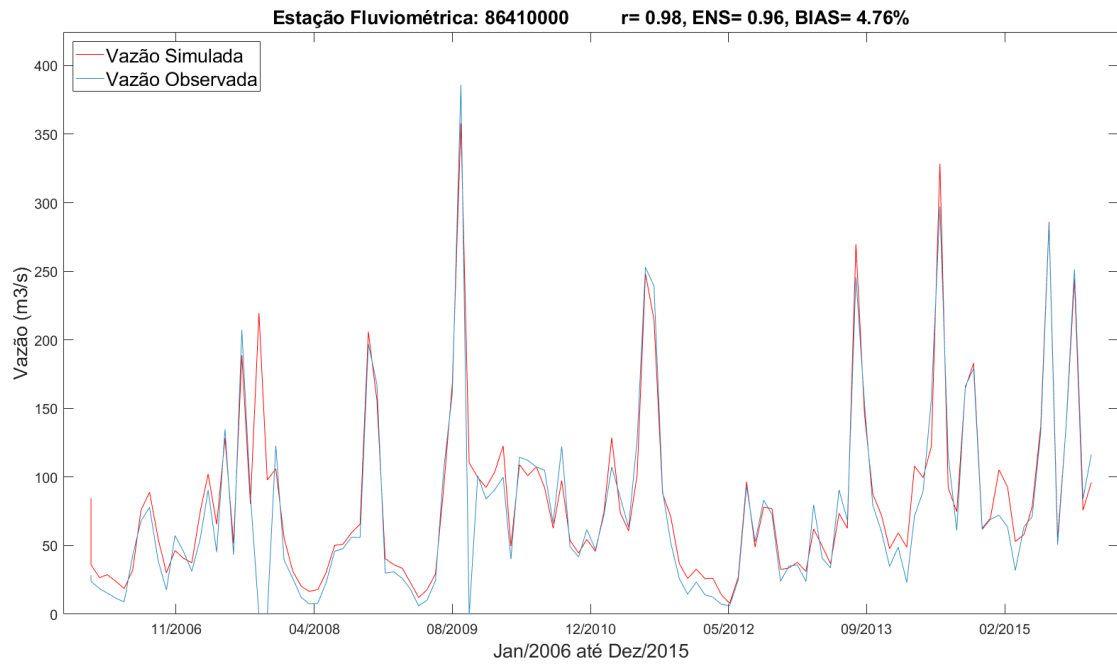


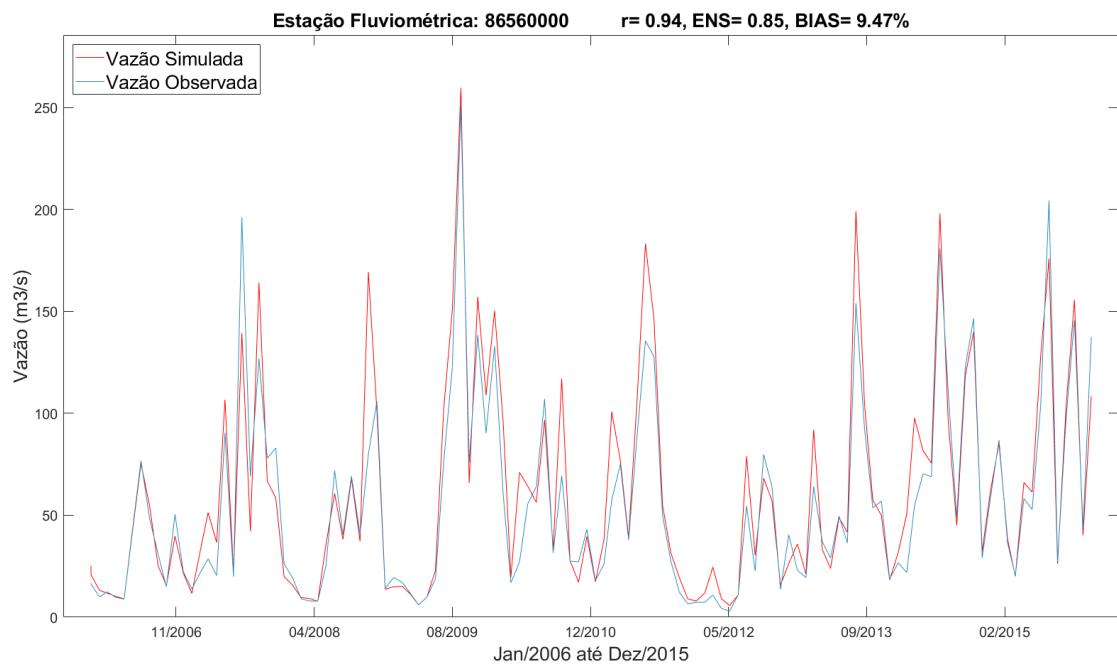
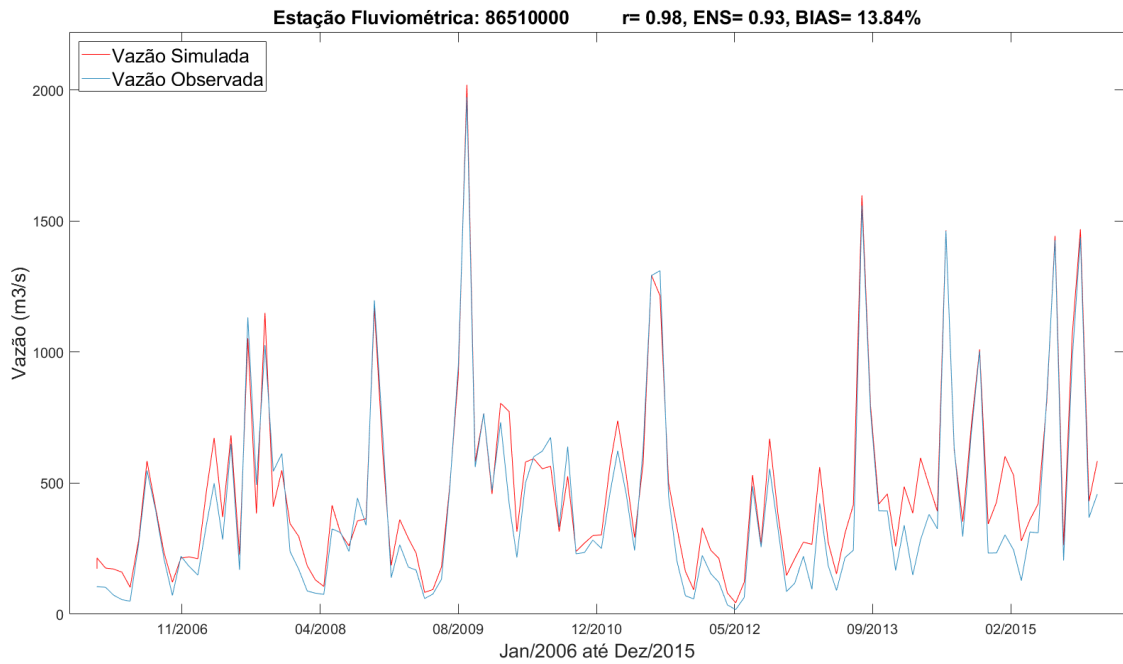
APÊNDICE IV: Hidrogramas mensais das vazões líquidas - Validação (2006 até 2015)

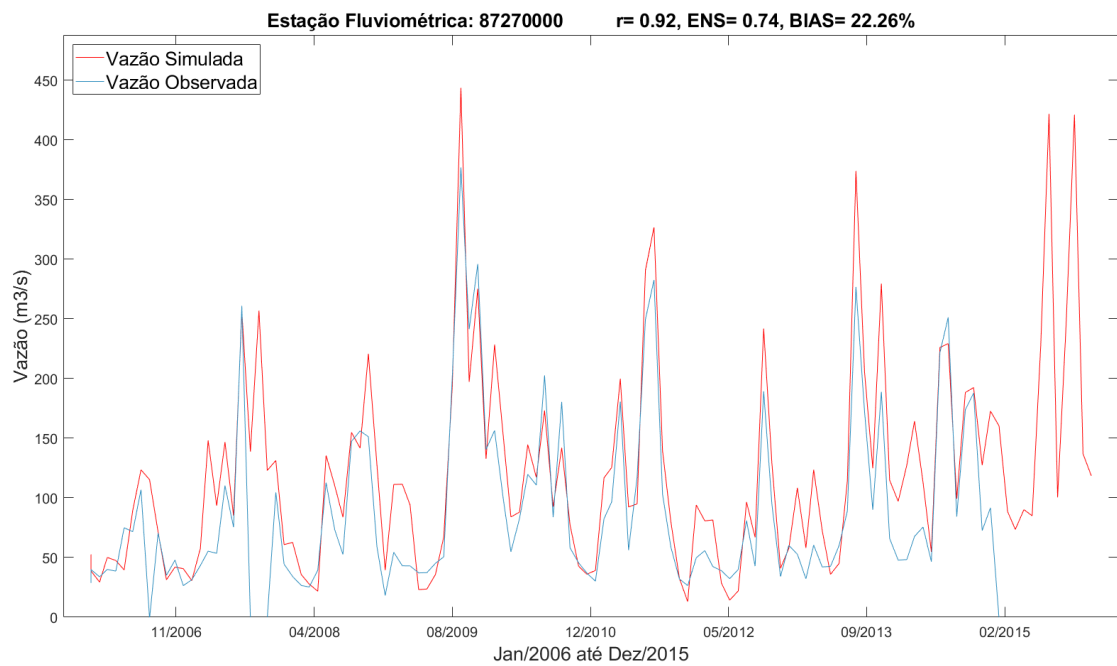
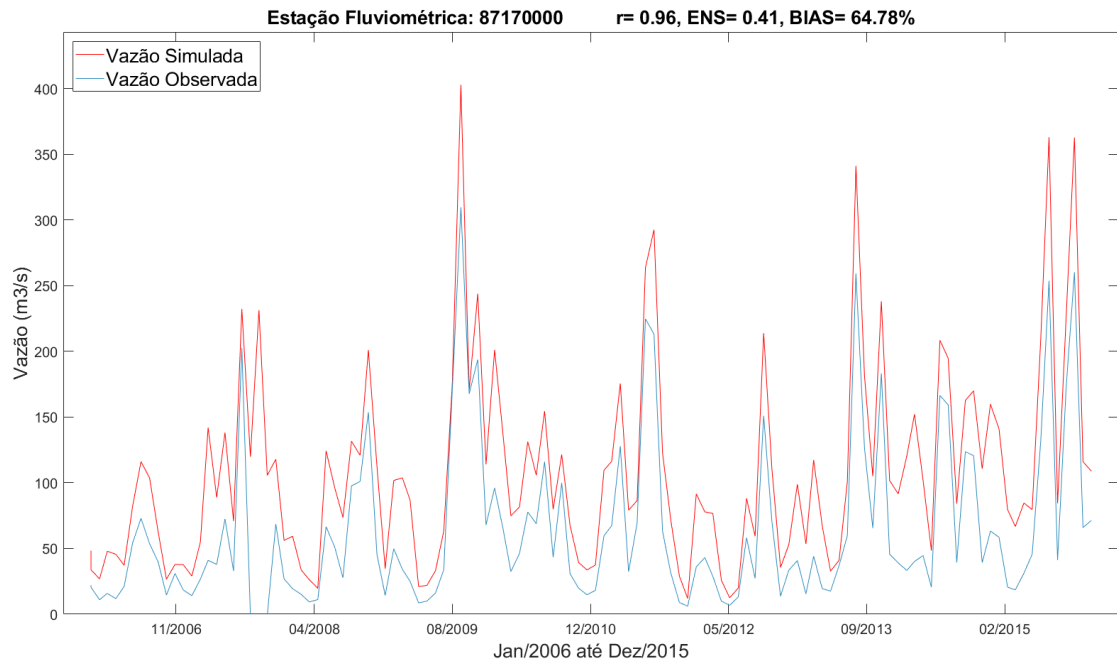


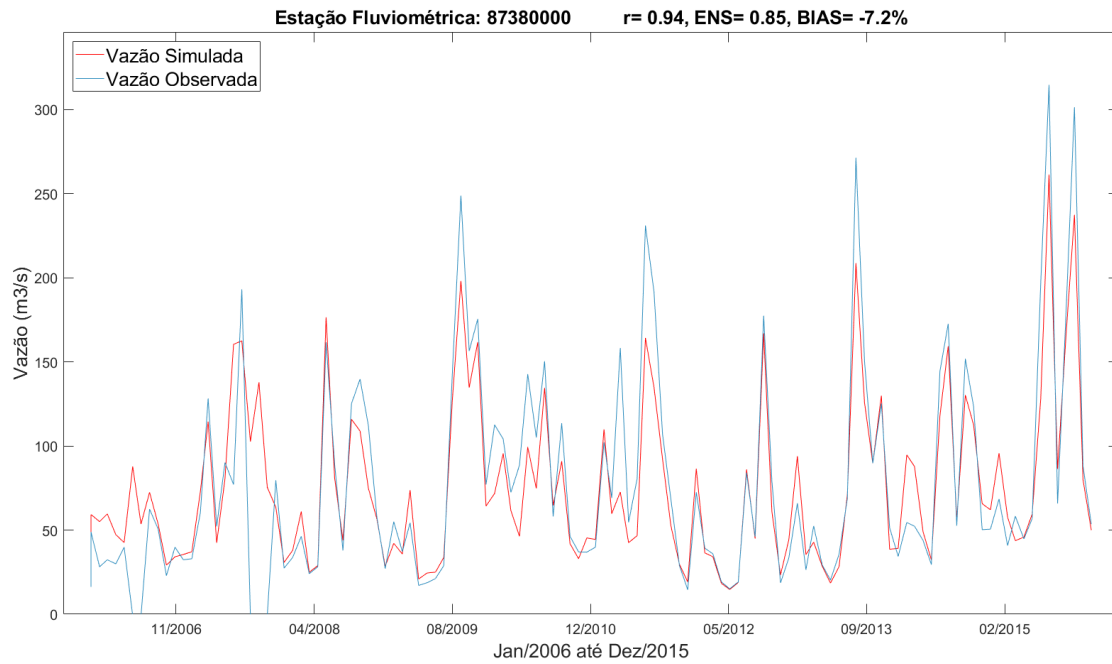




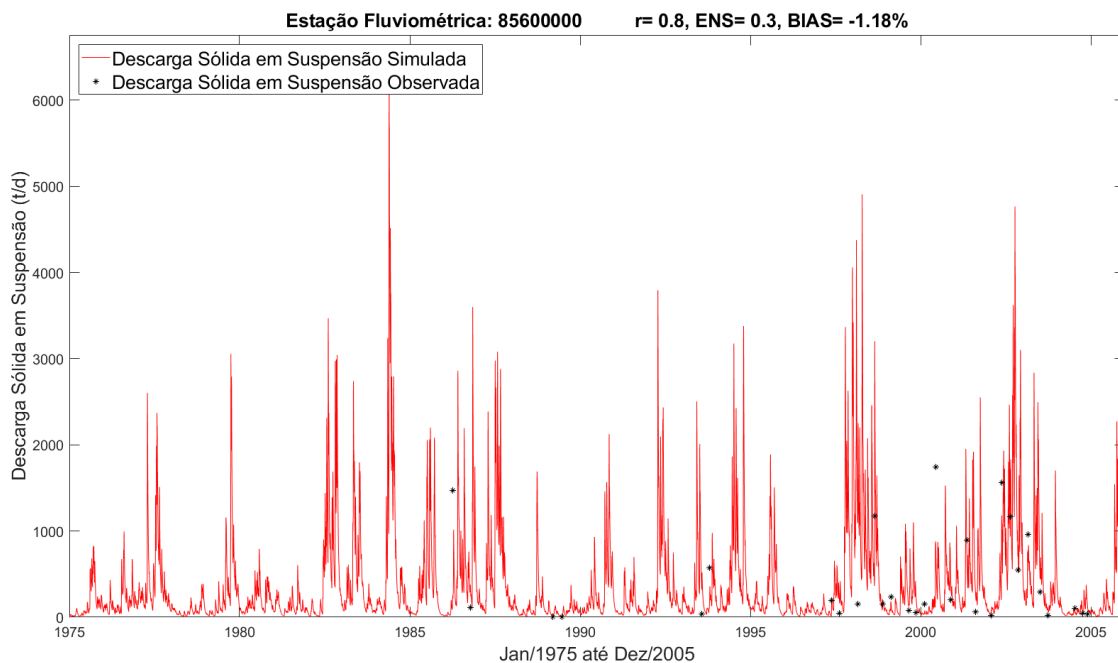
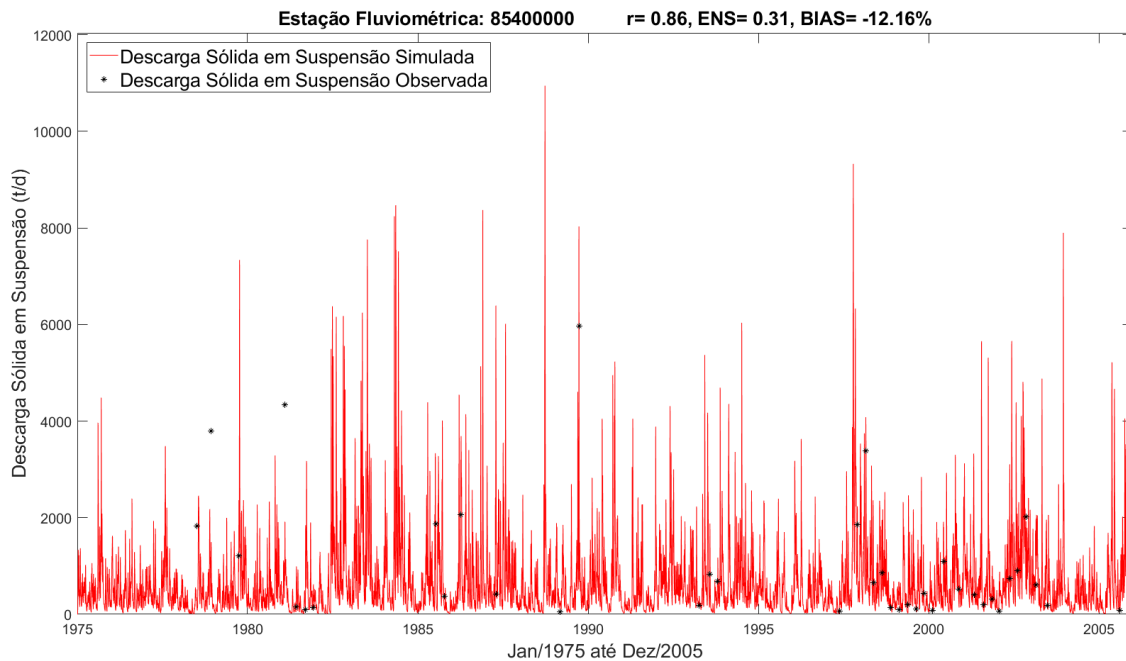


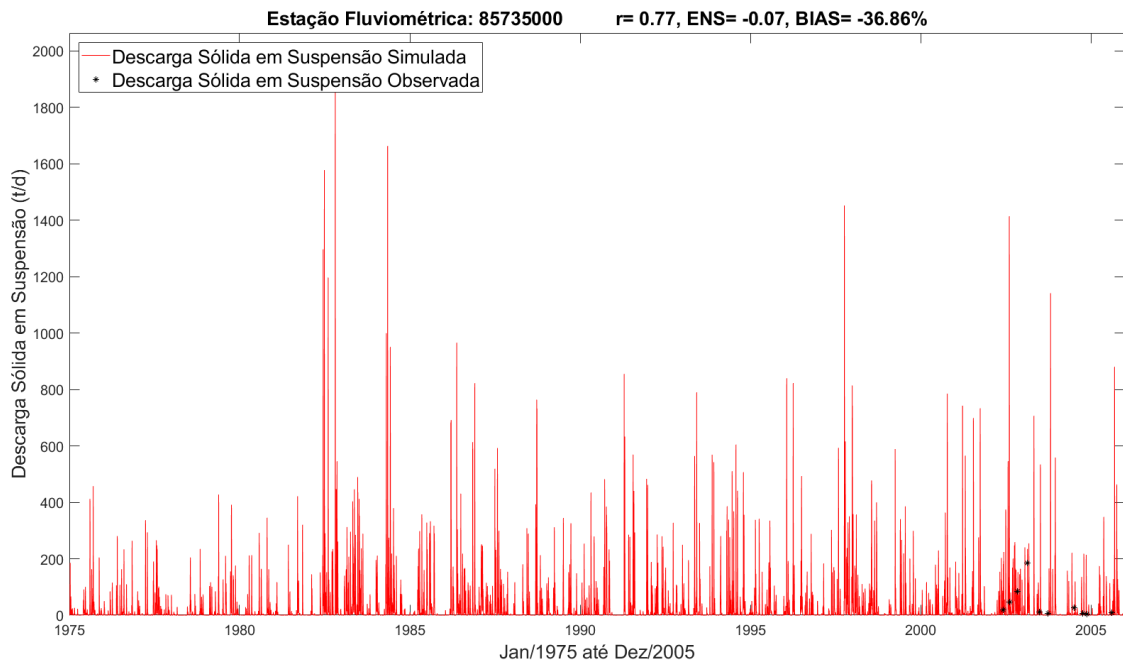
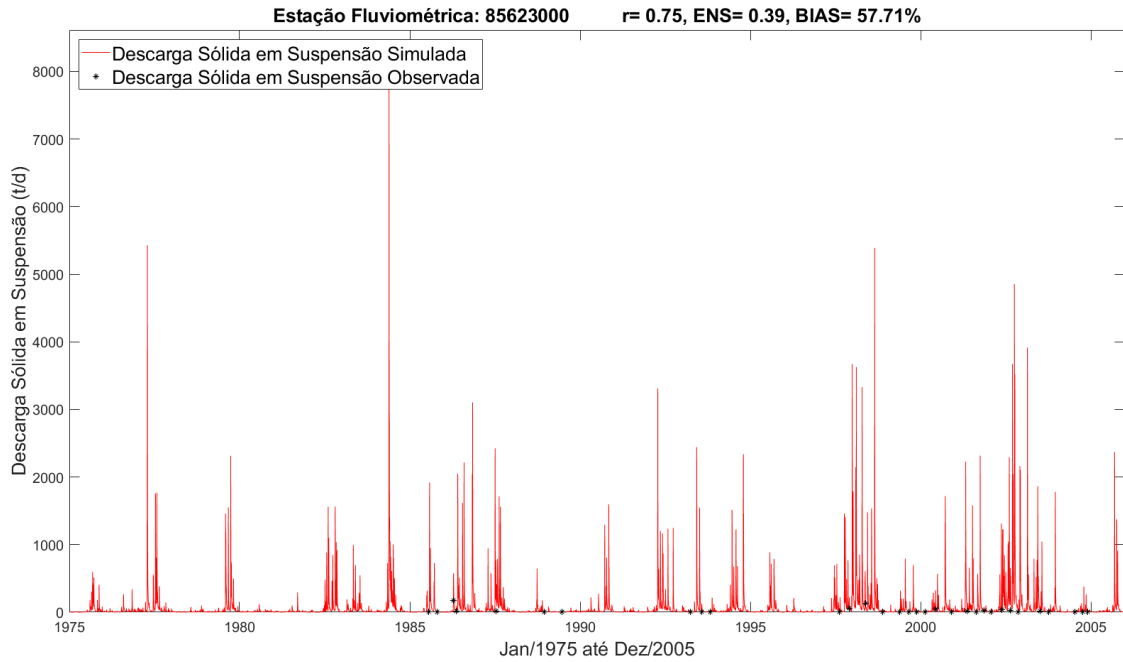


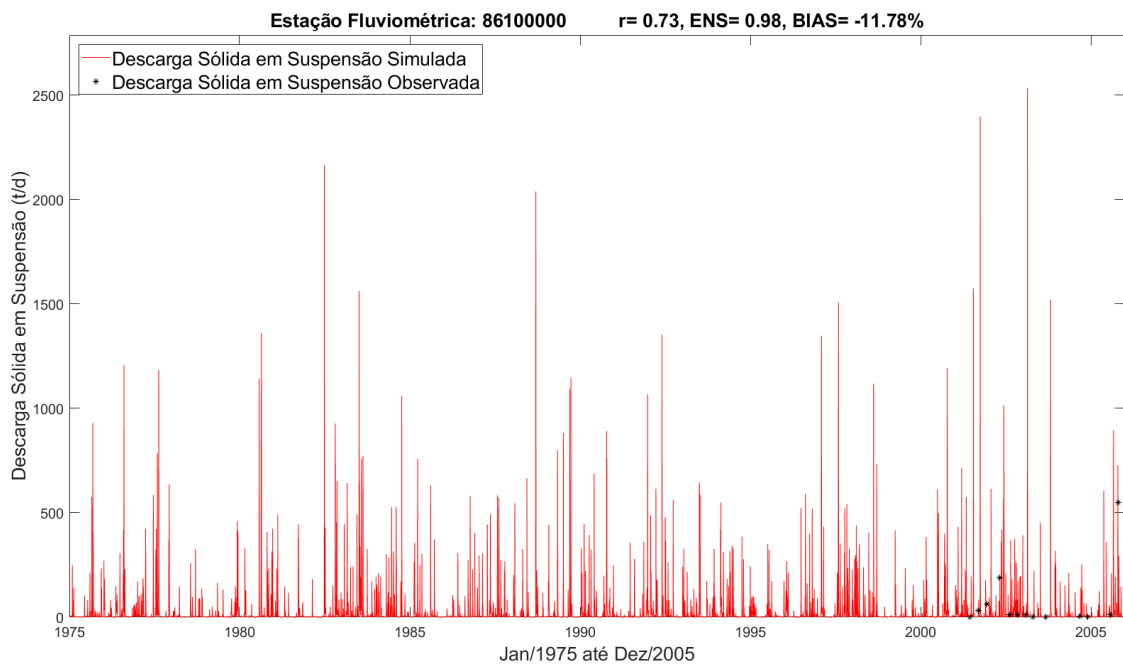
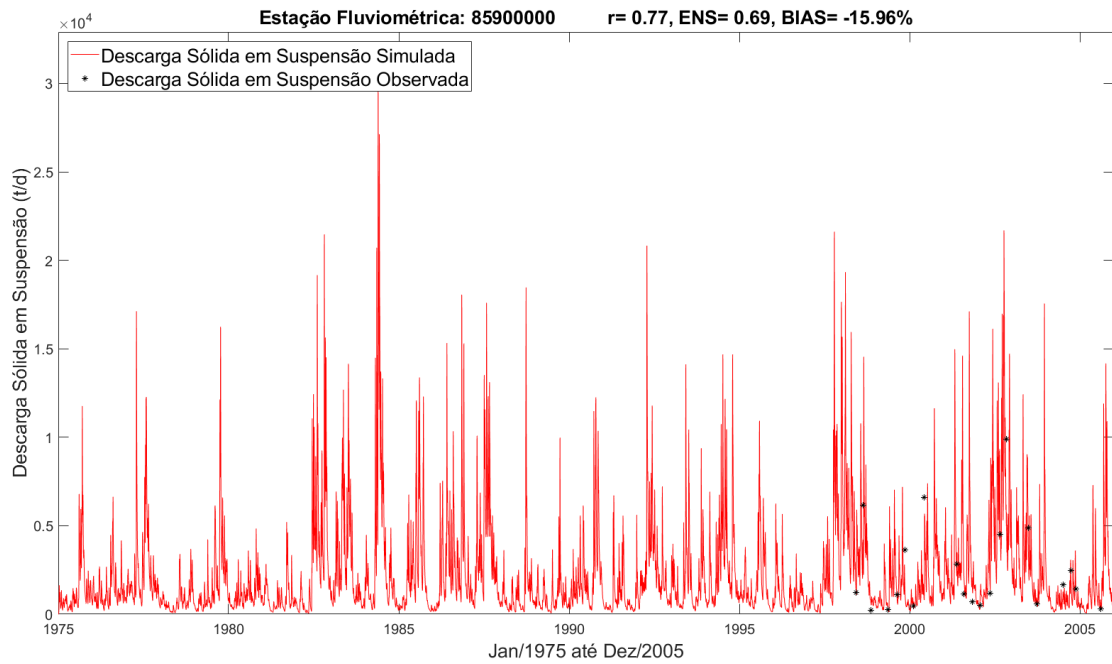


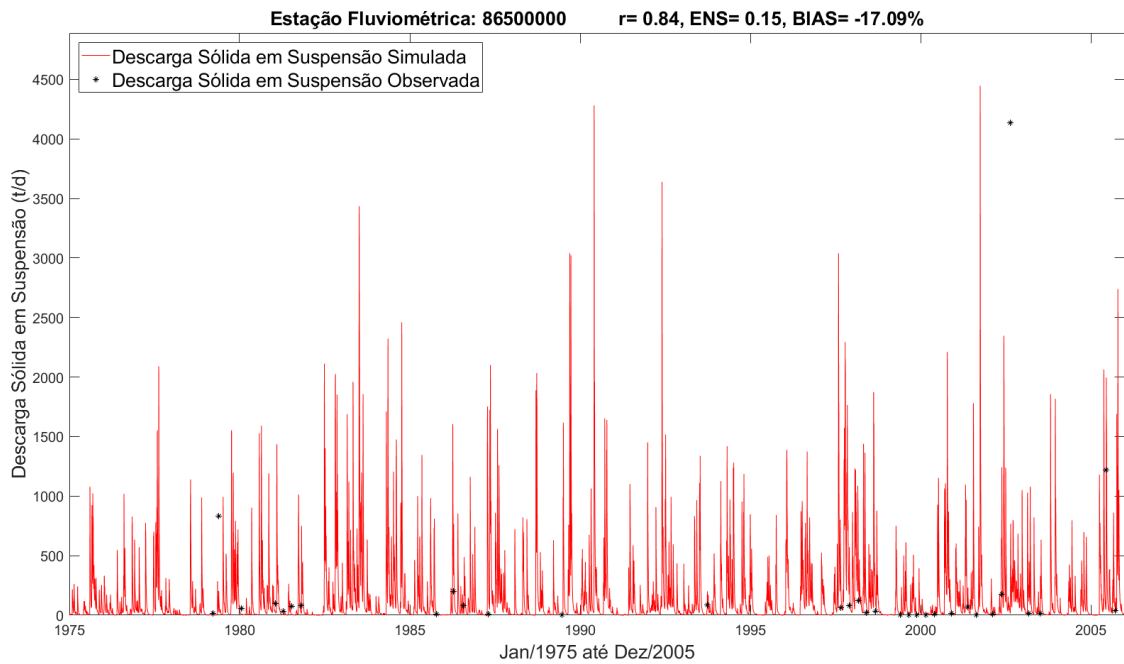
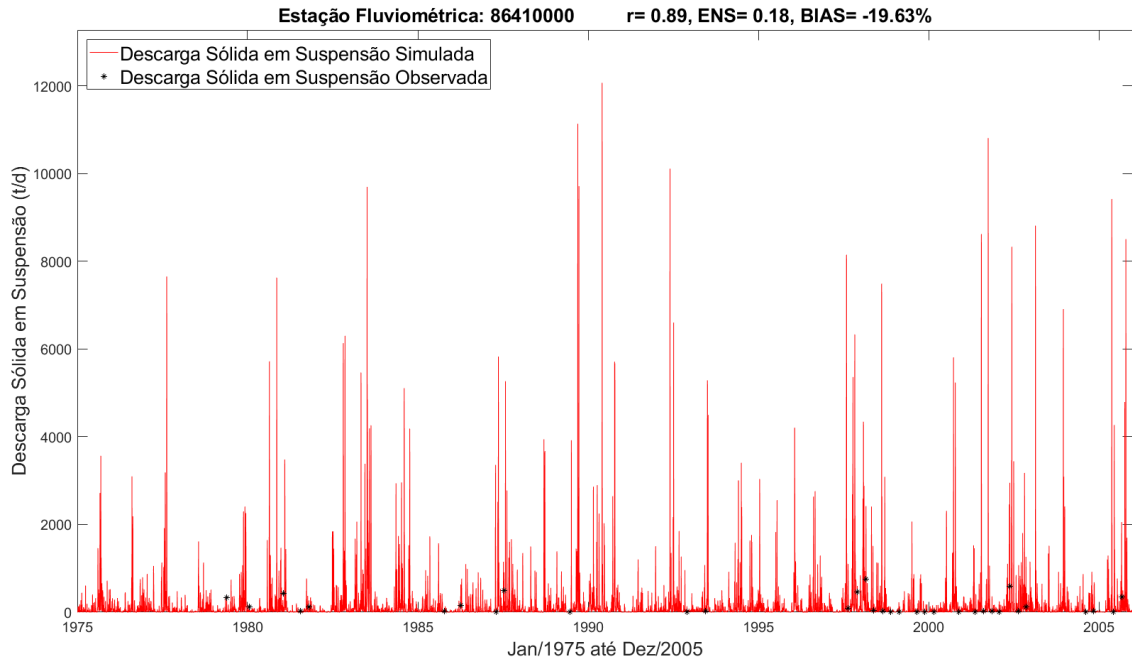


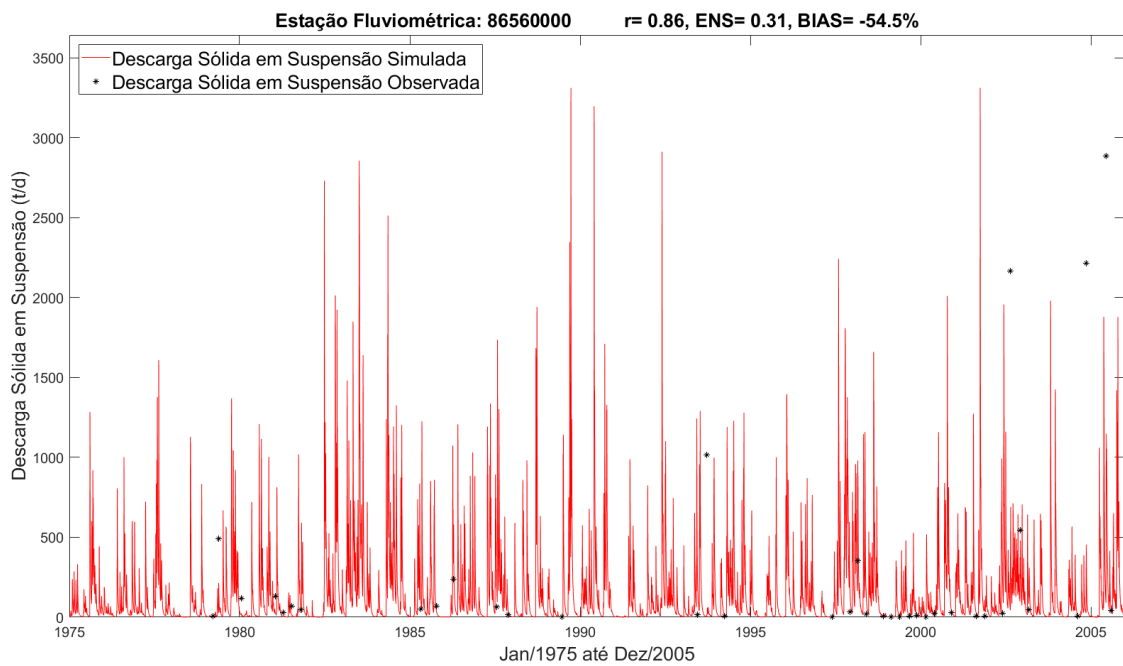
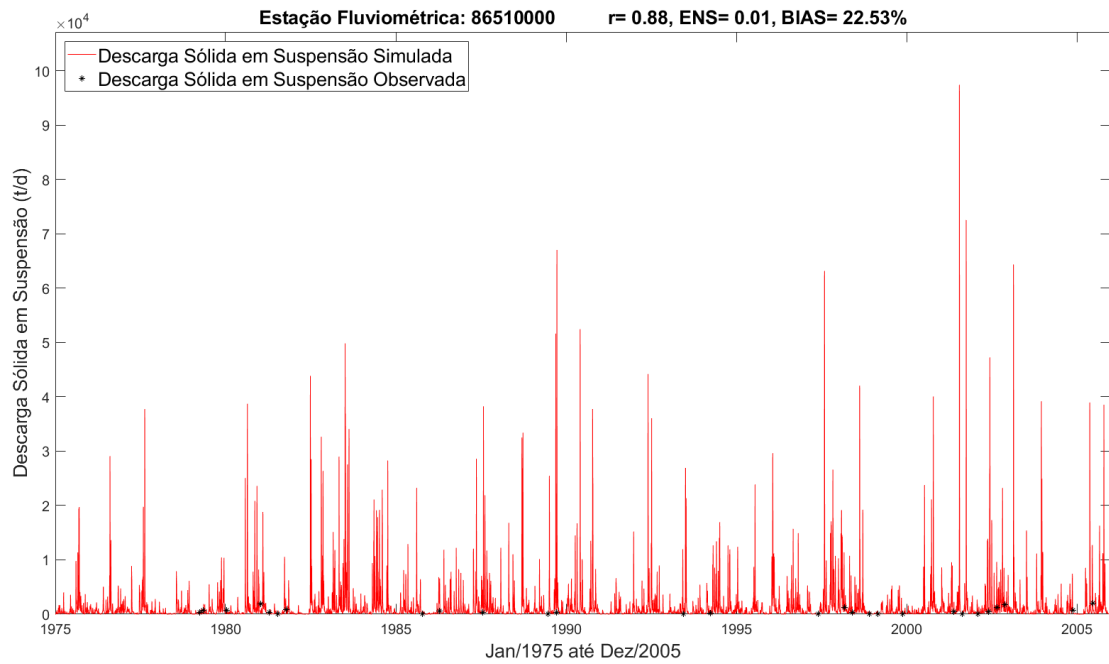
APÊNDICE V: Sedimentogramas diários das descargas sólidas em suspensão - Calibração (1975 até 2005)

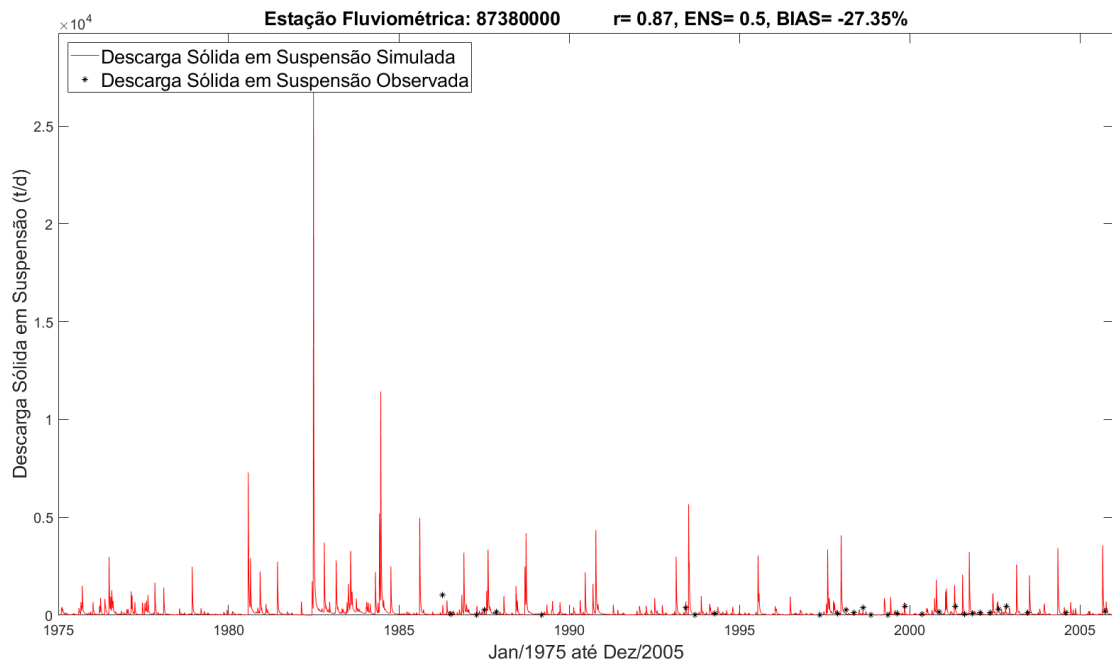
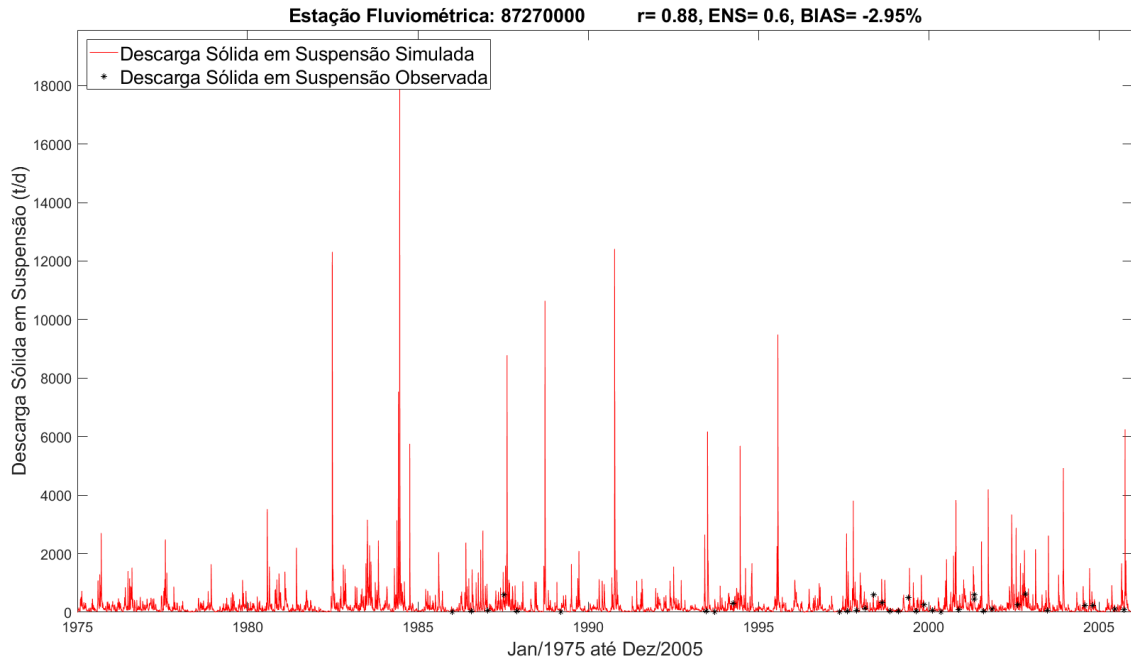




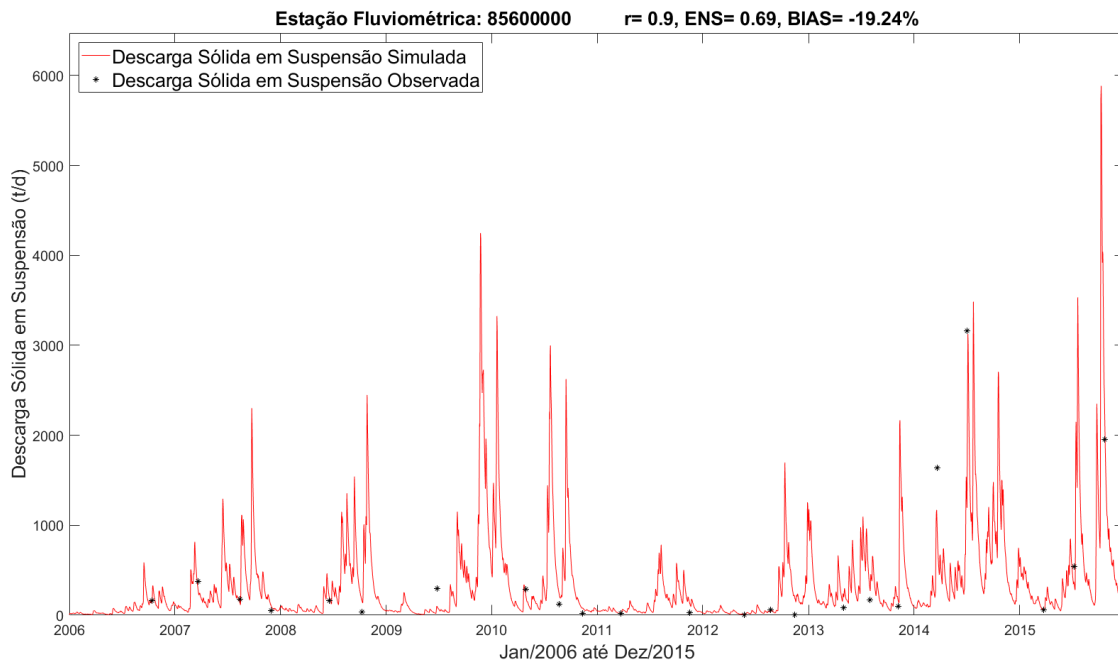
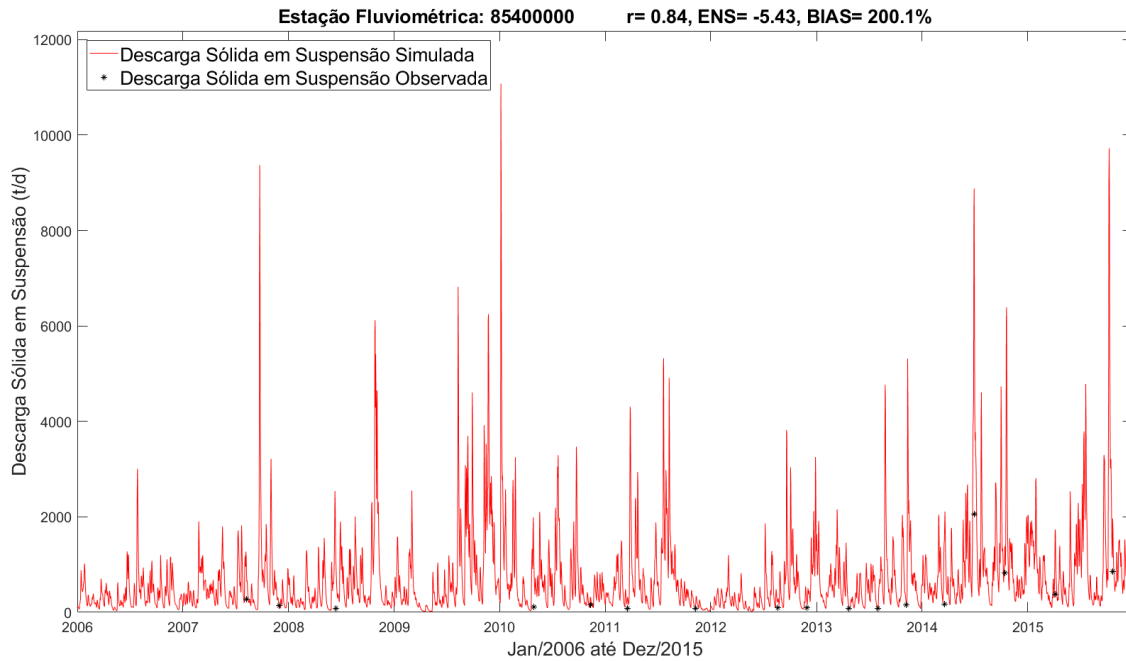


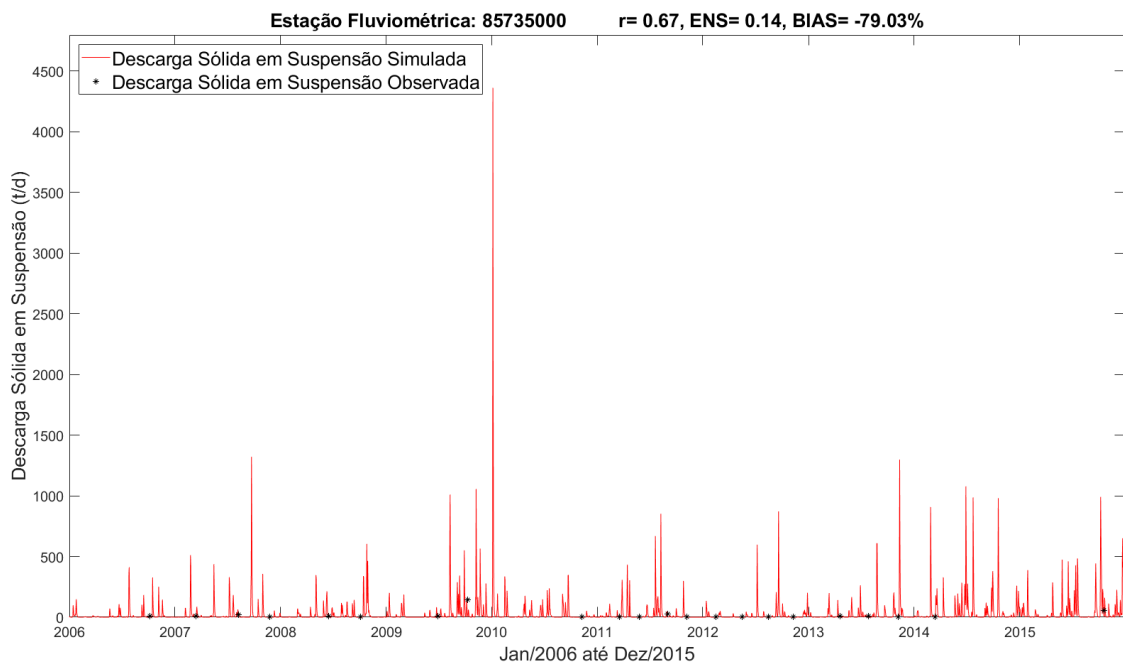
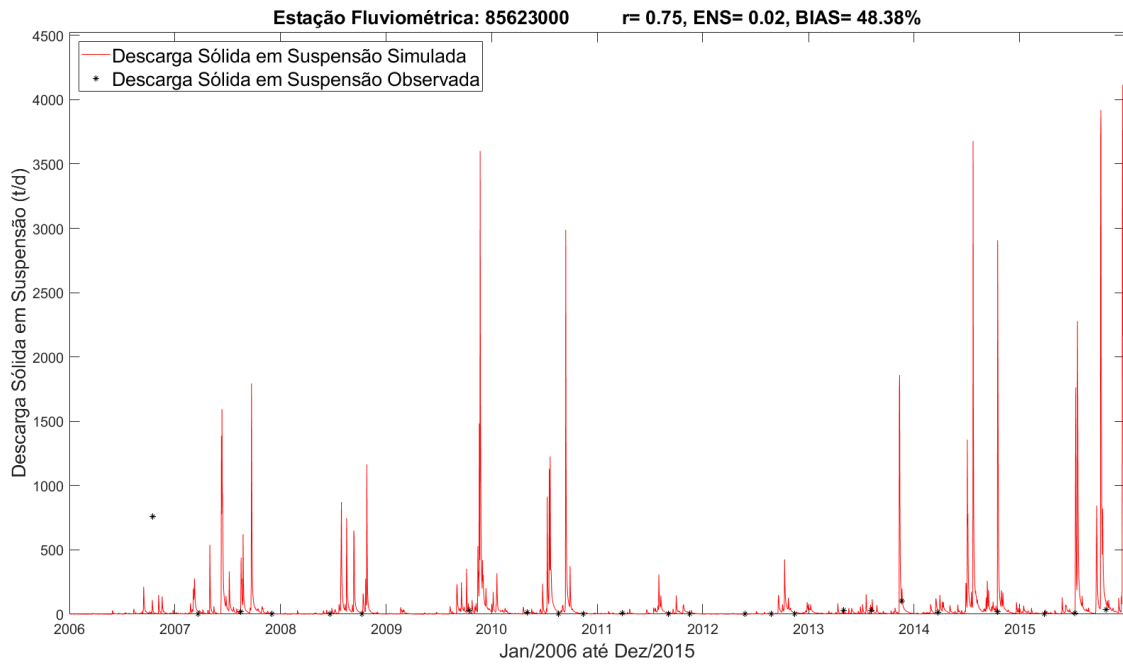


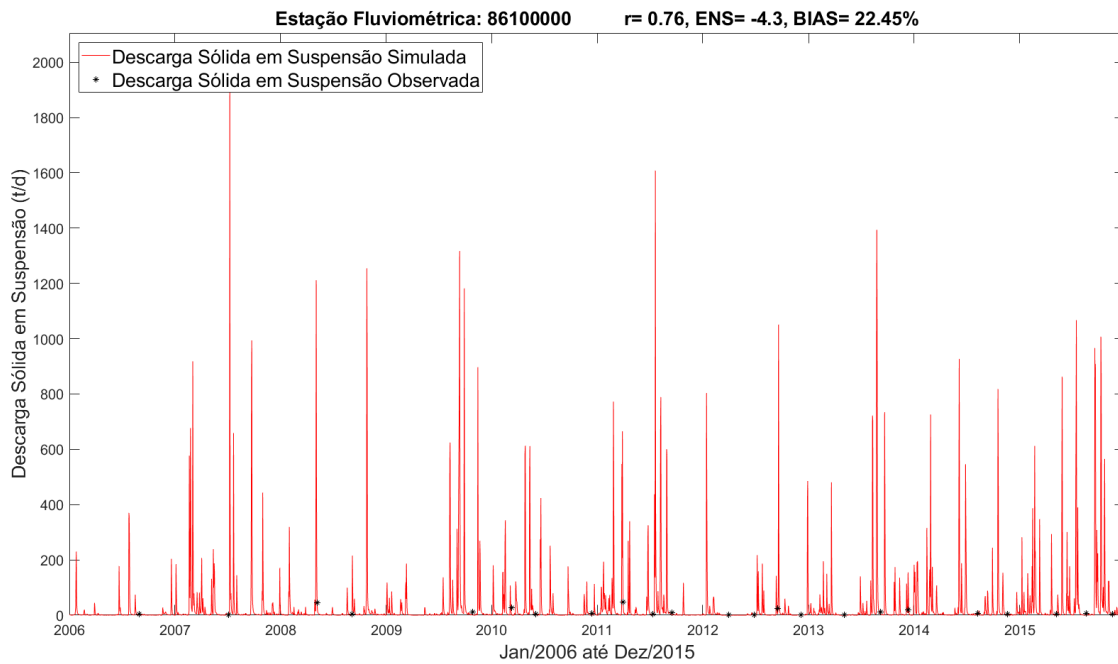
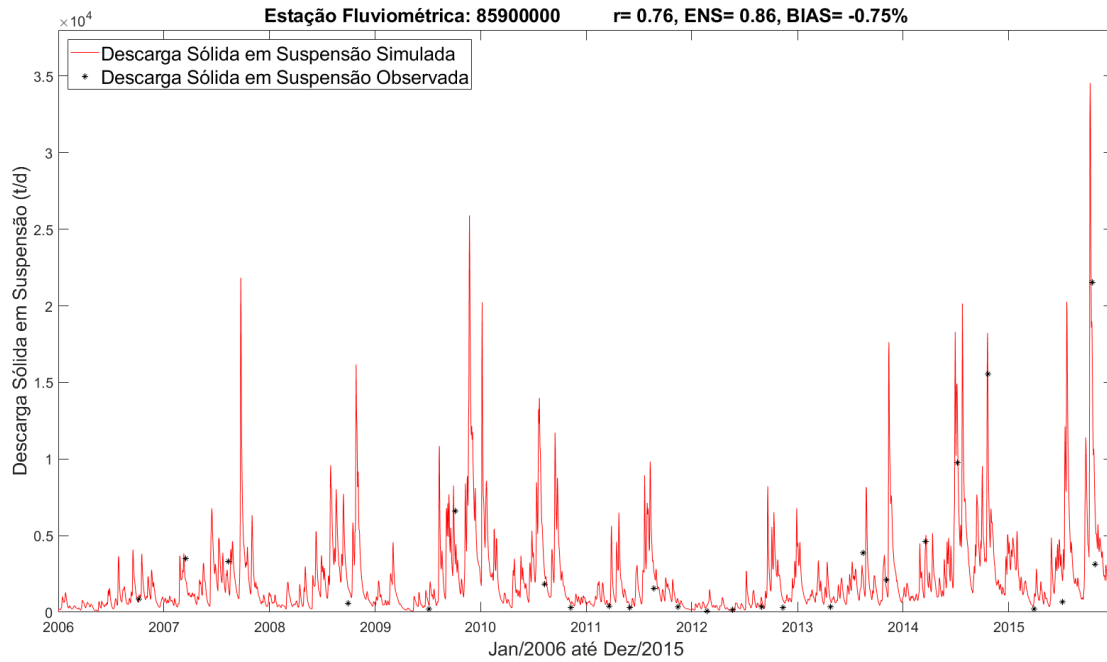


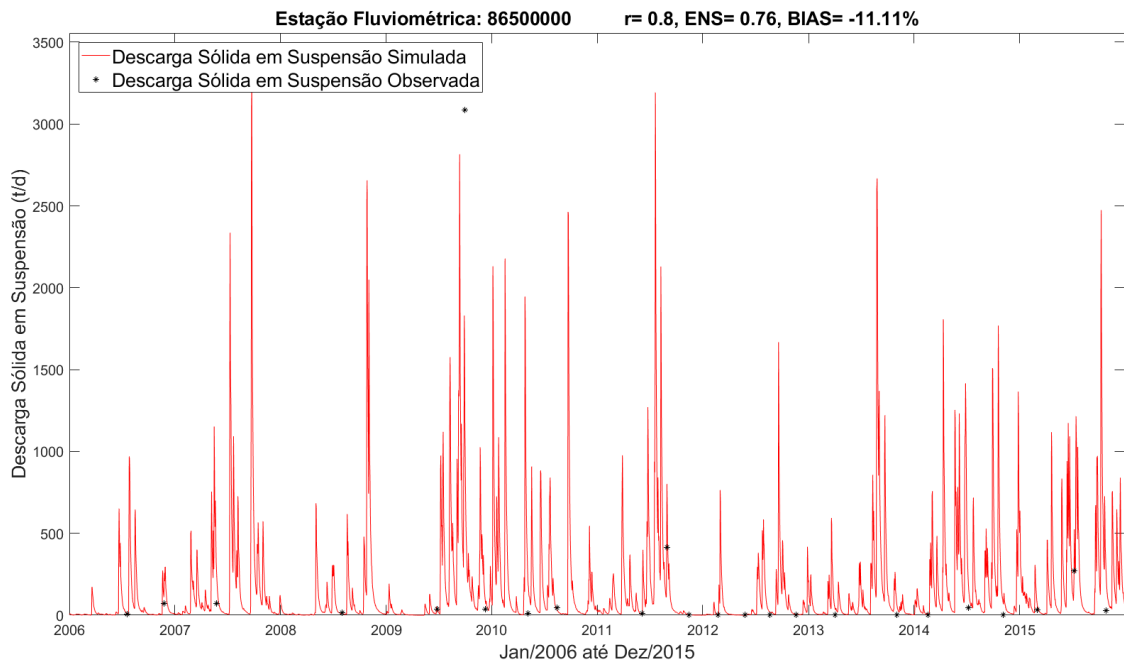
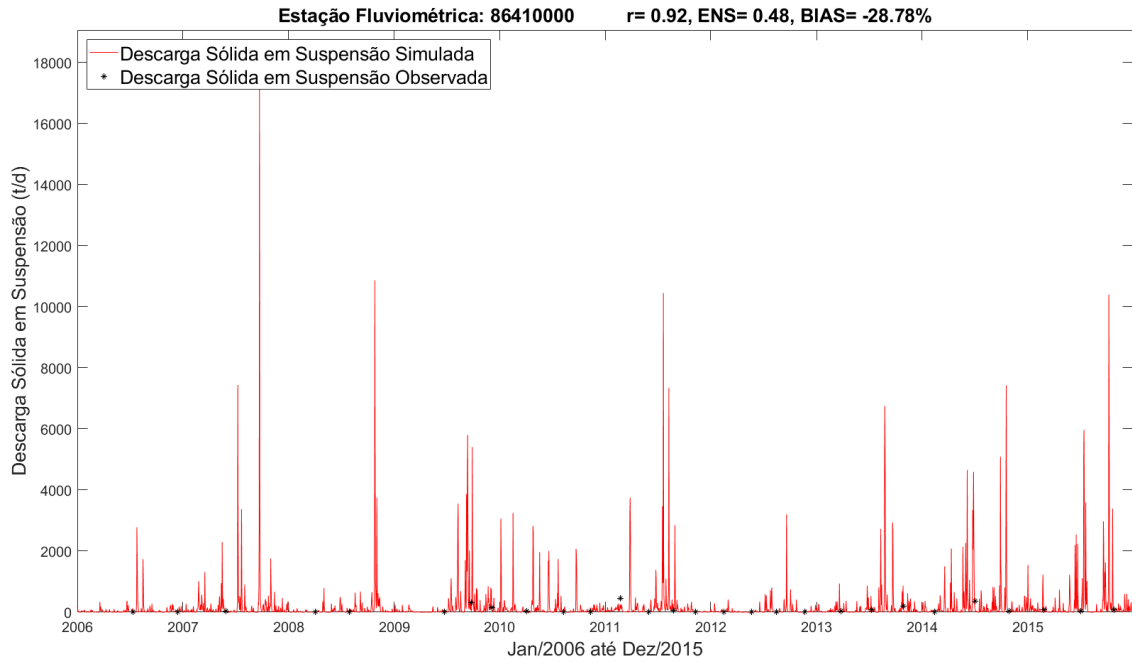


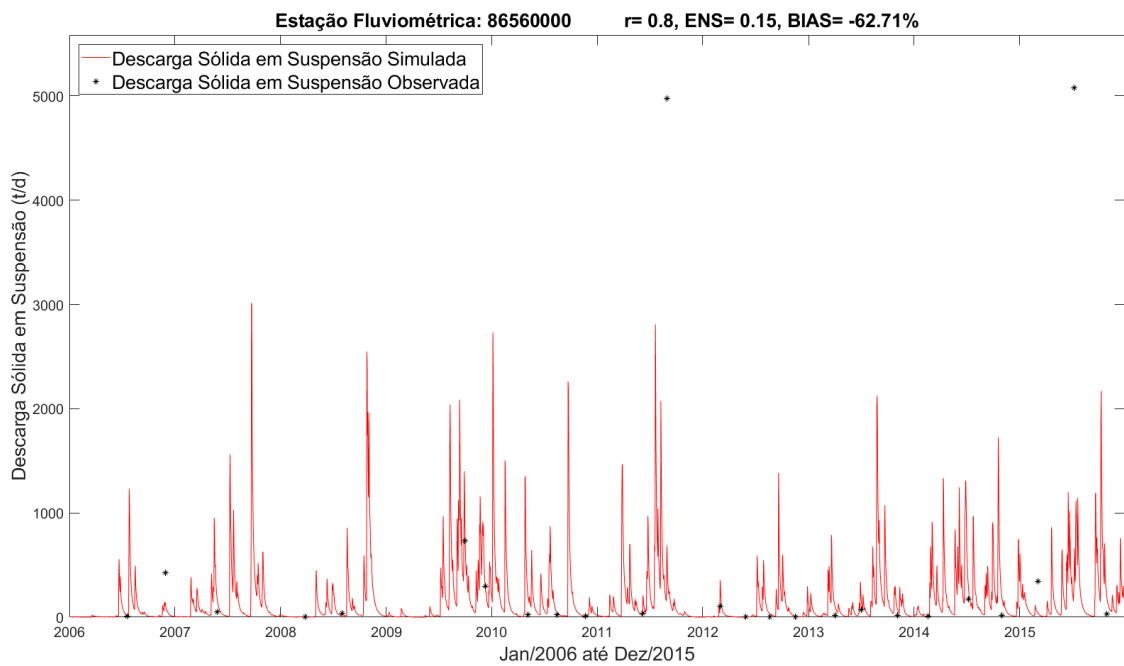
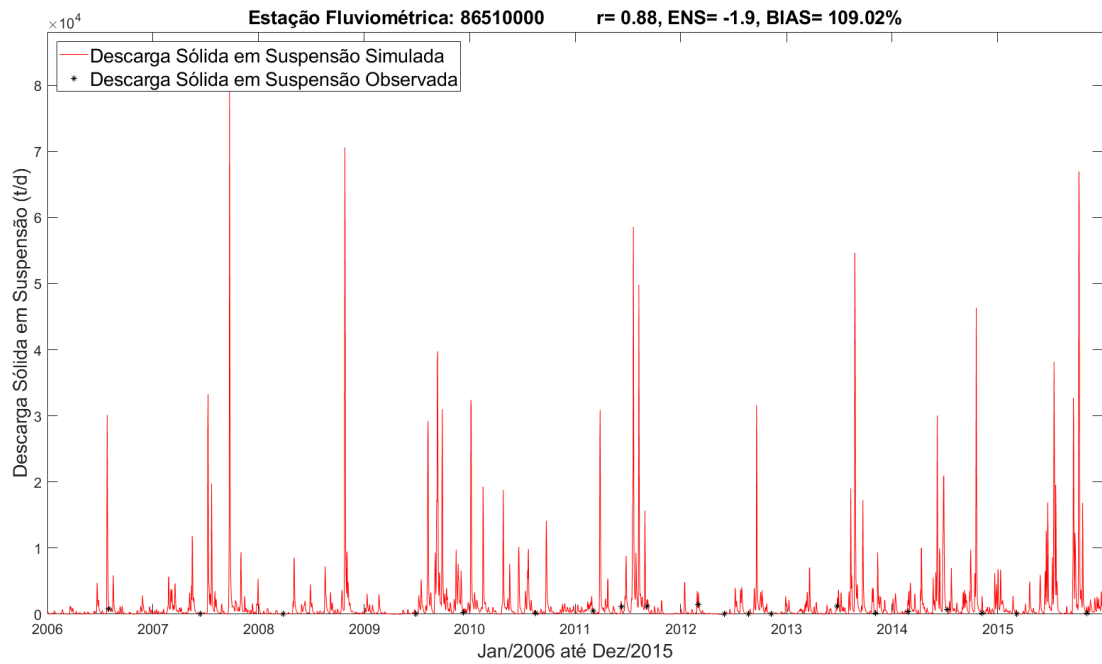
**APÊNDICE VI: Sedimentogramas diários das descargas sólidas em suspensão -
Validação (2006 até 2015)**

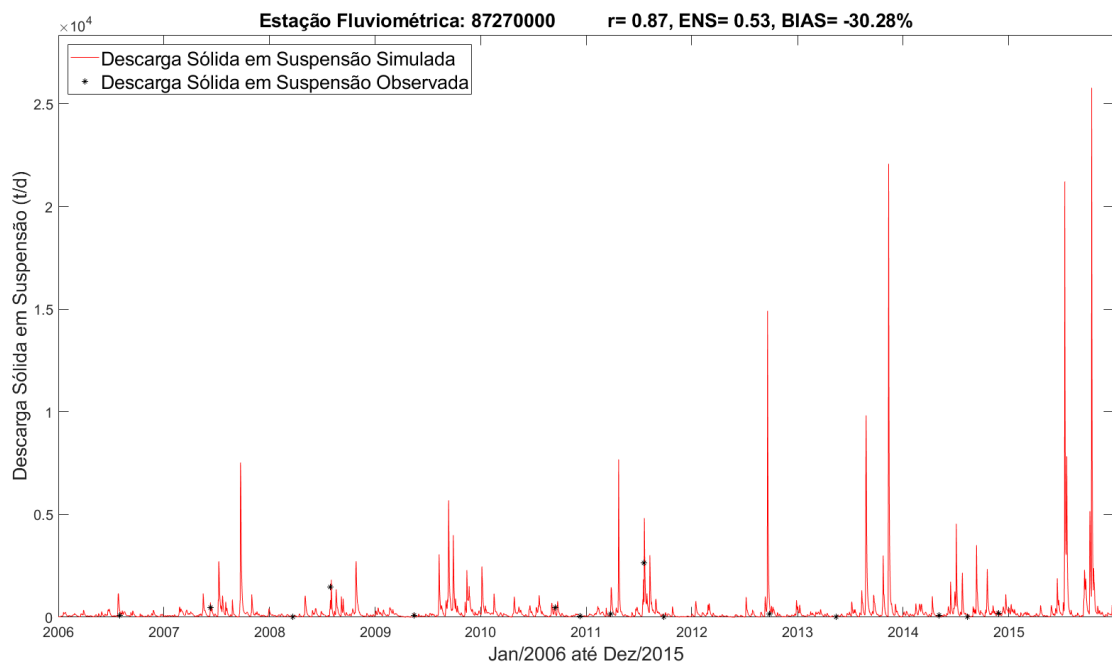
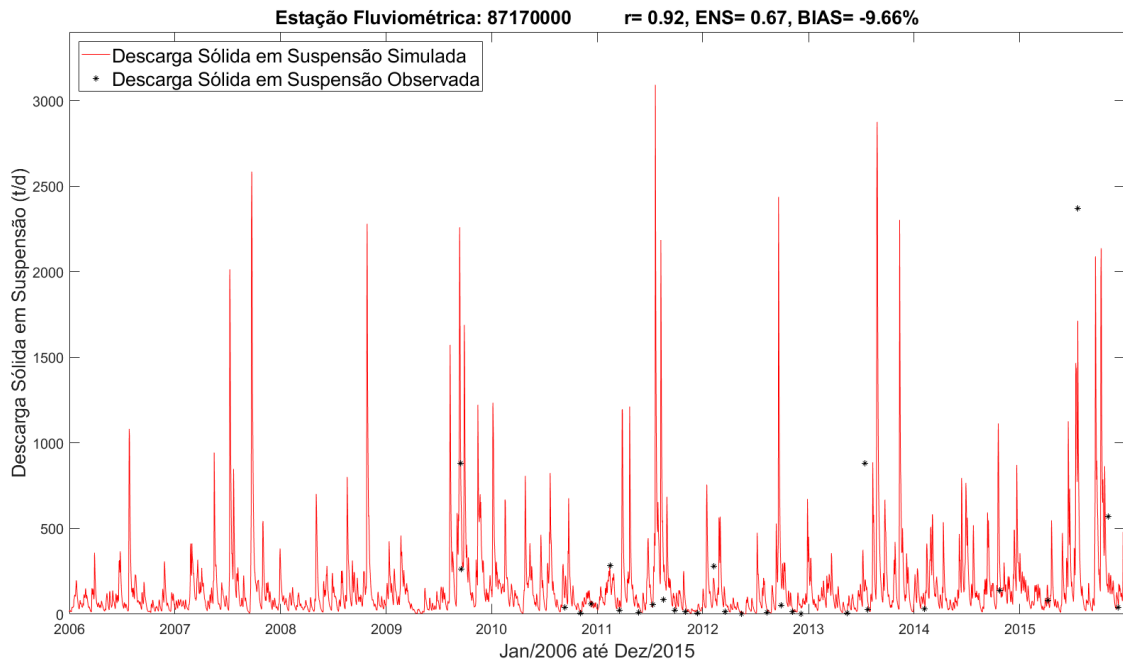


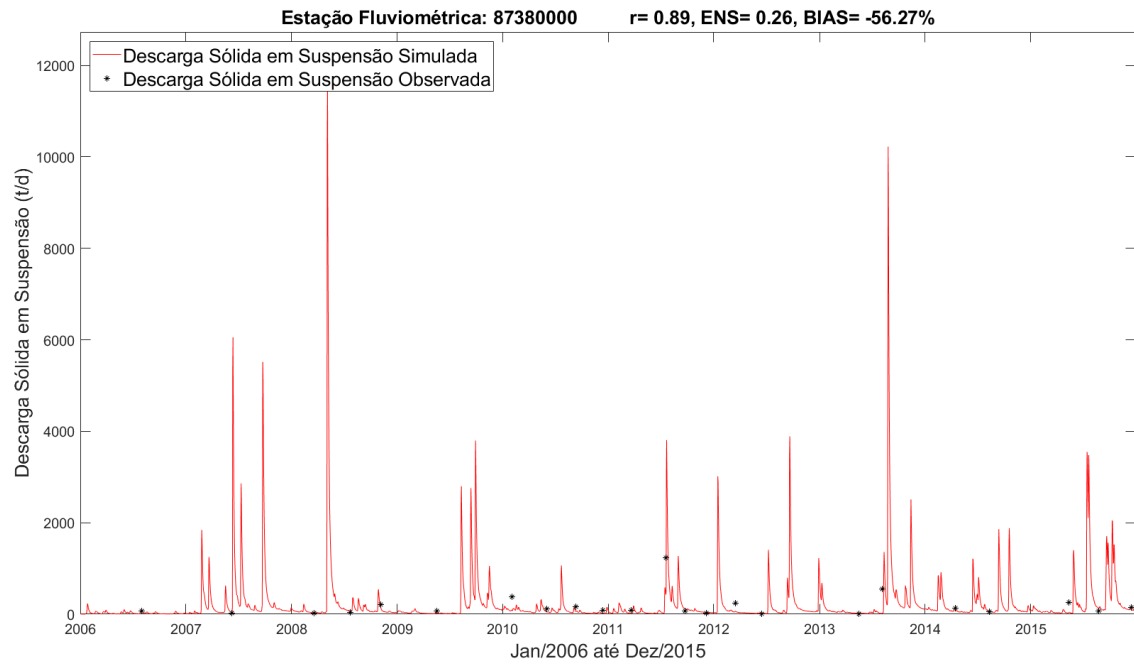




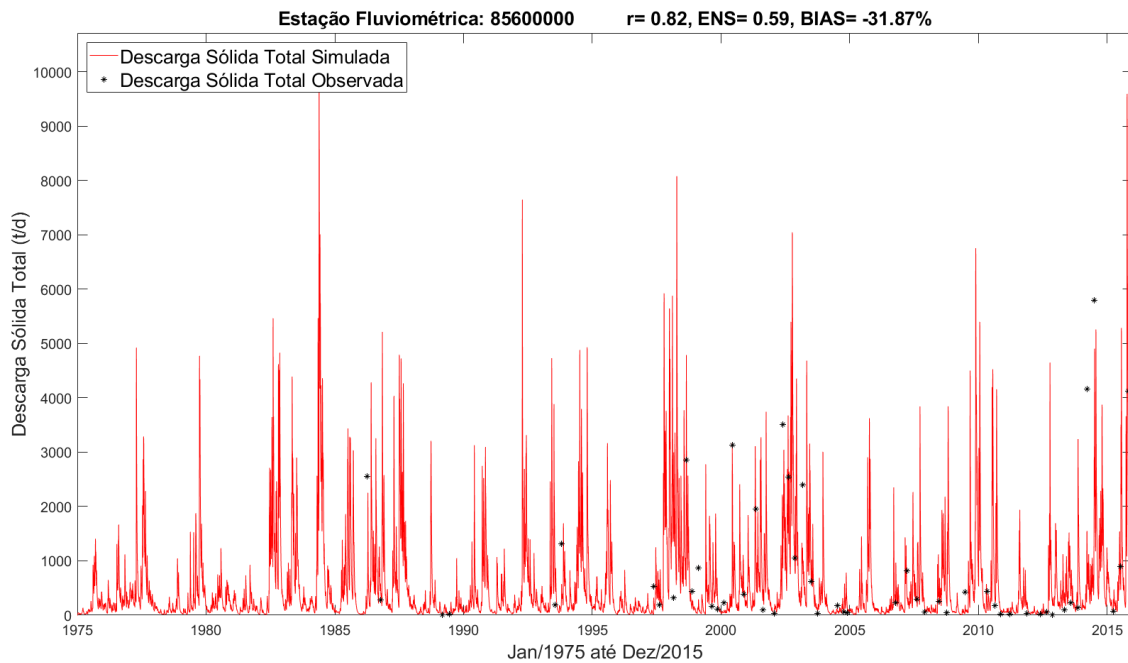
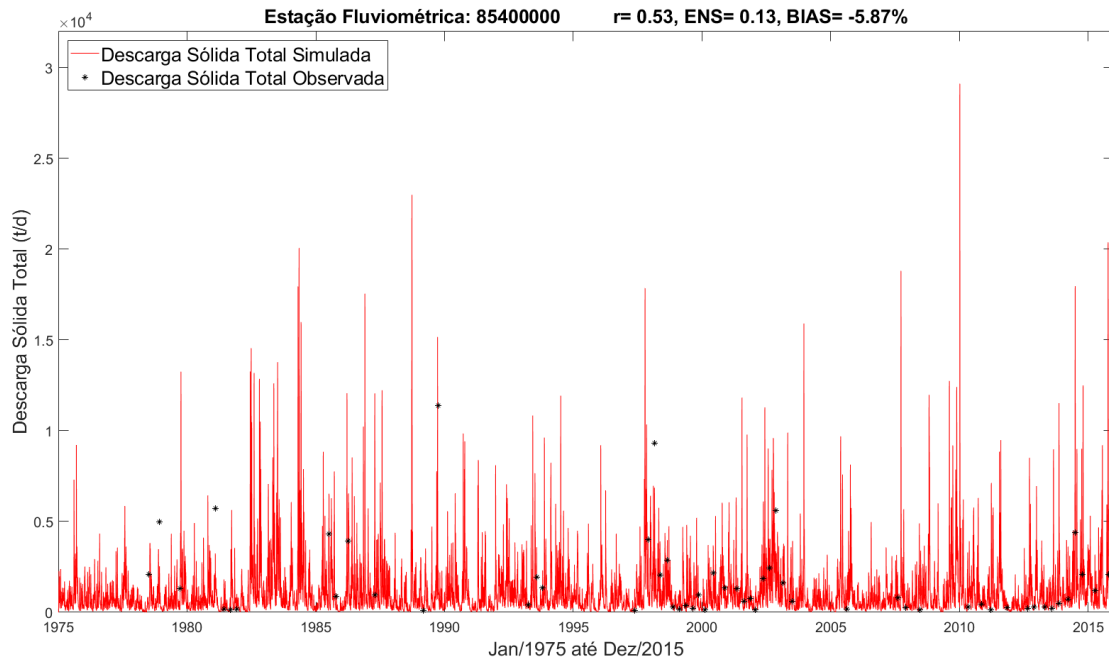


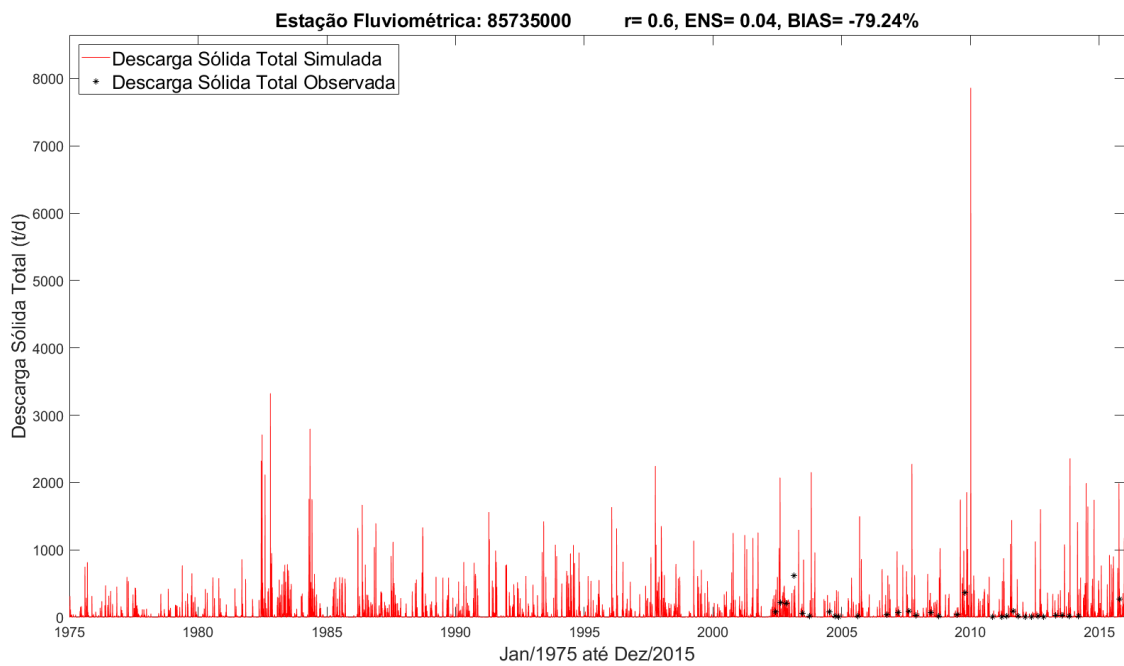
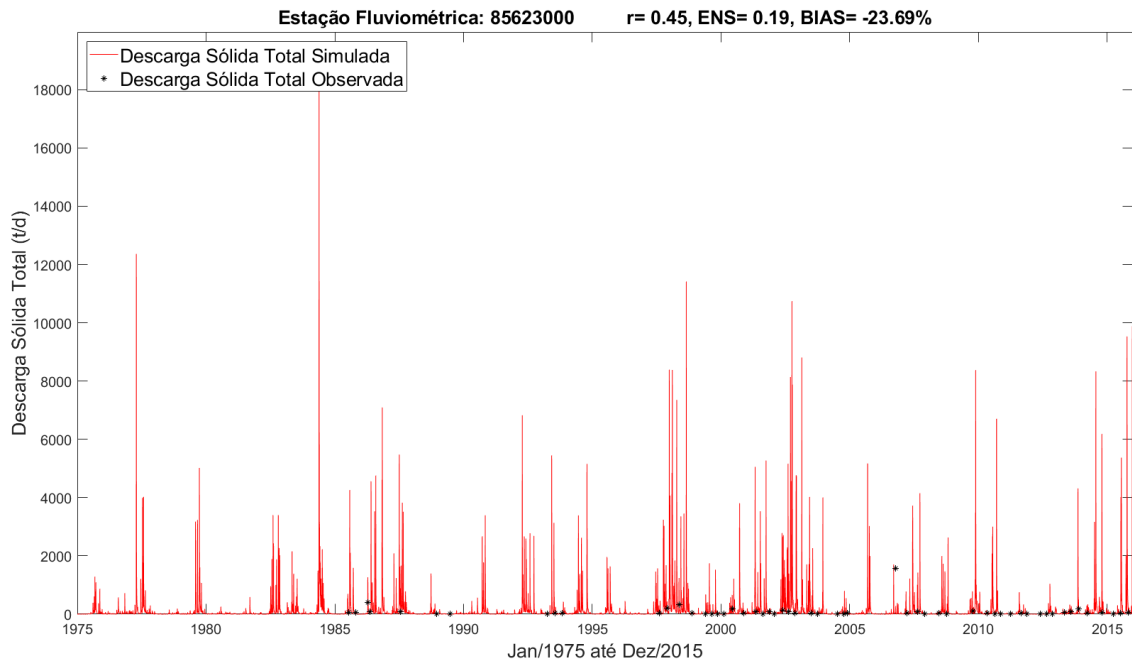


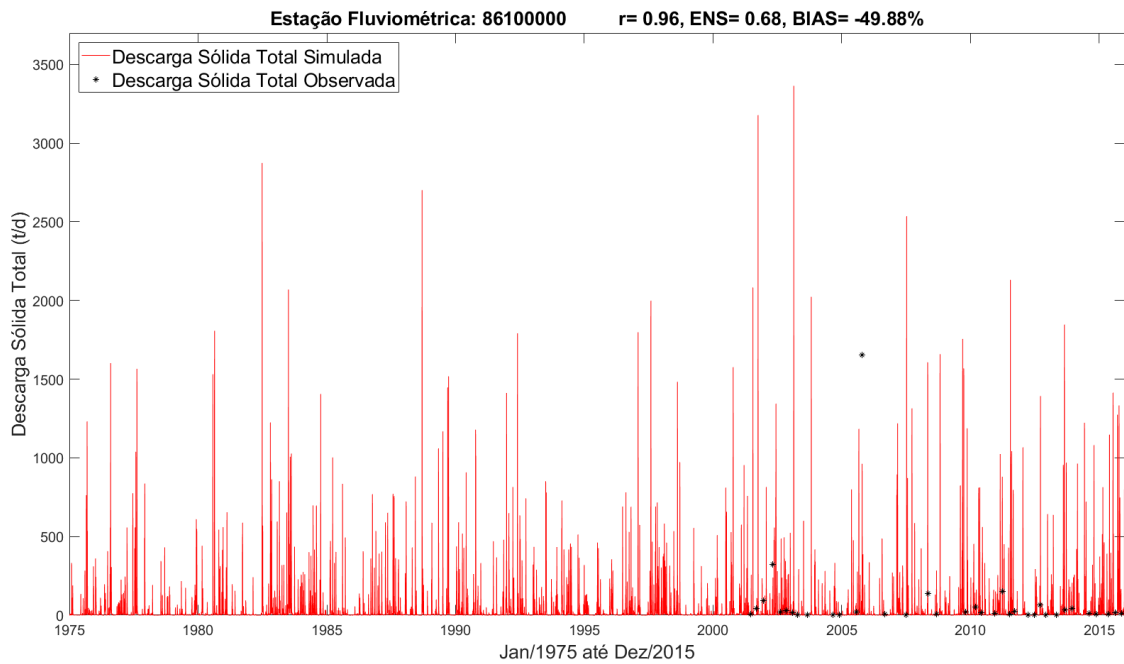
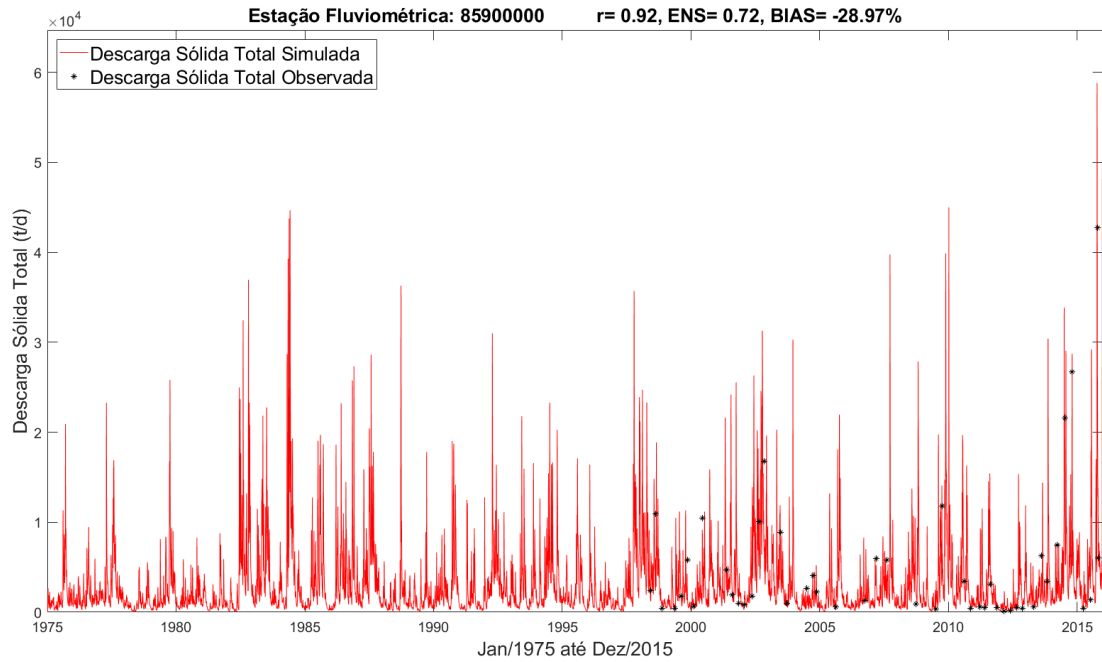


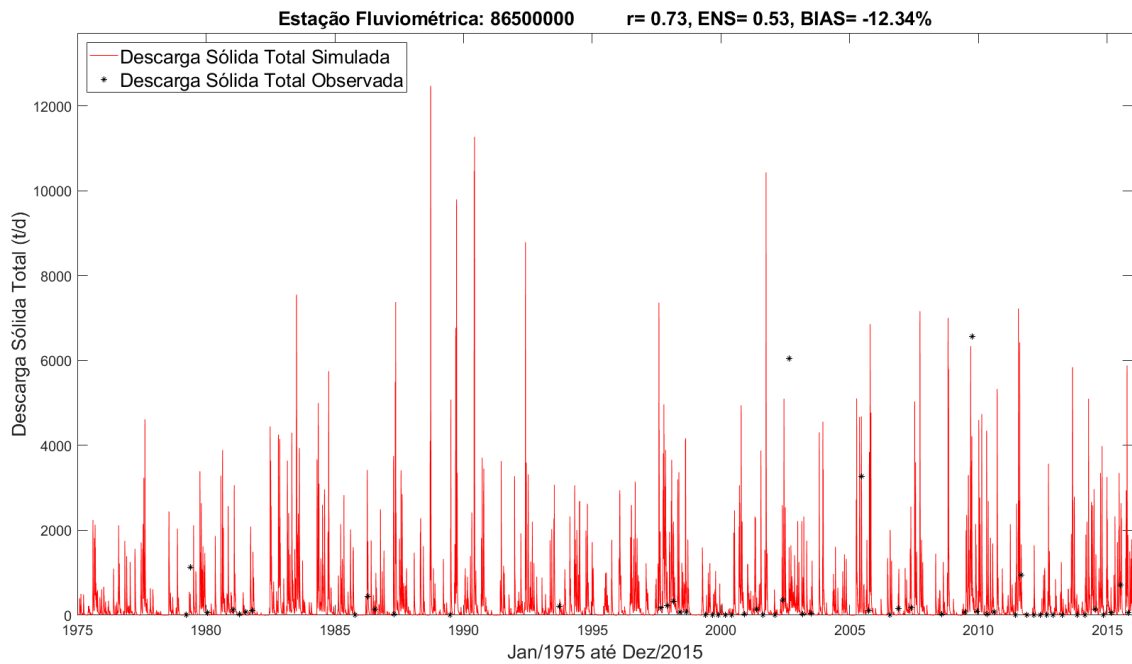
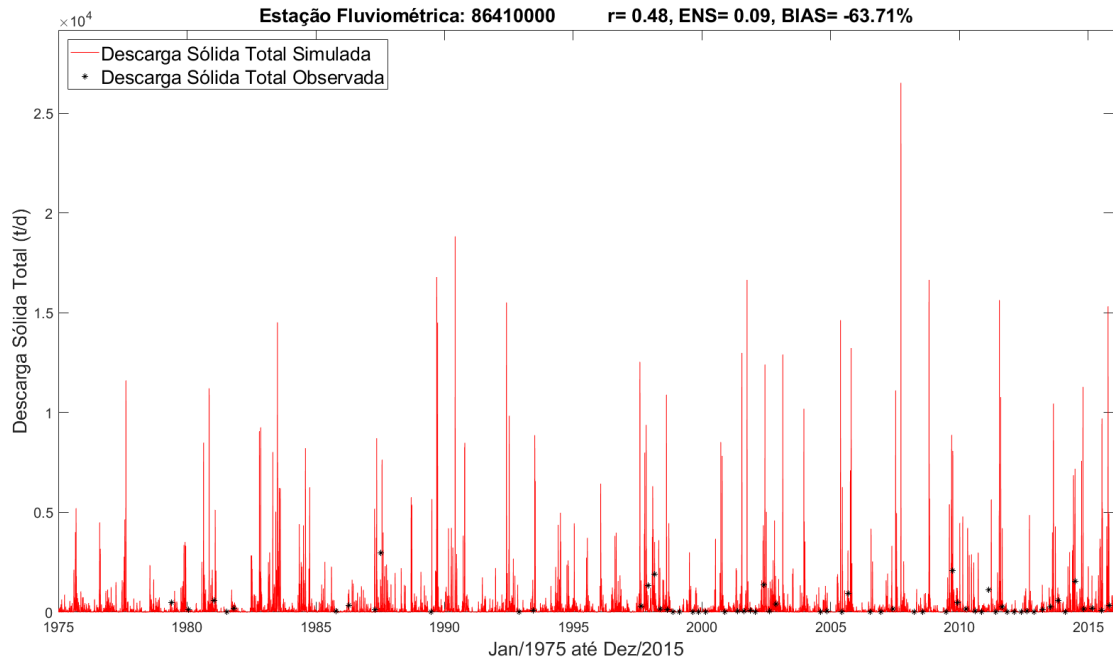


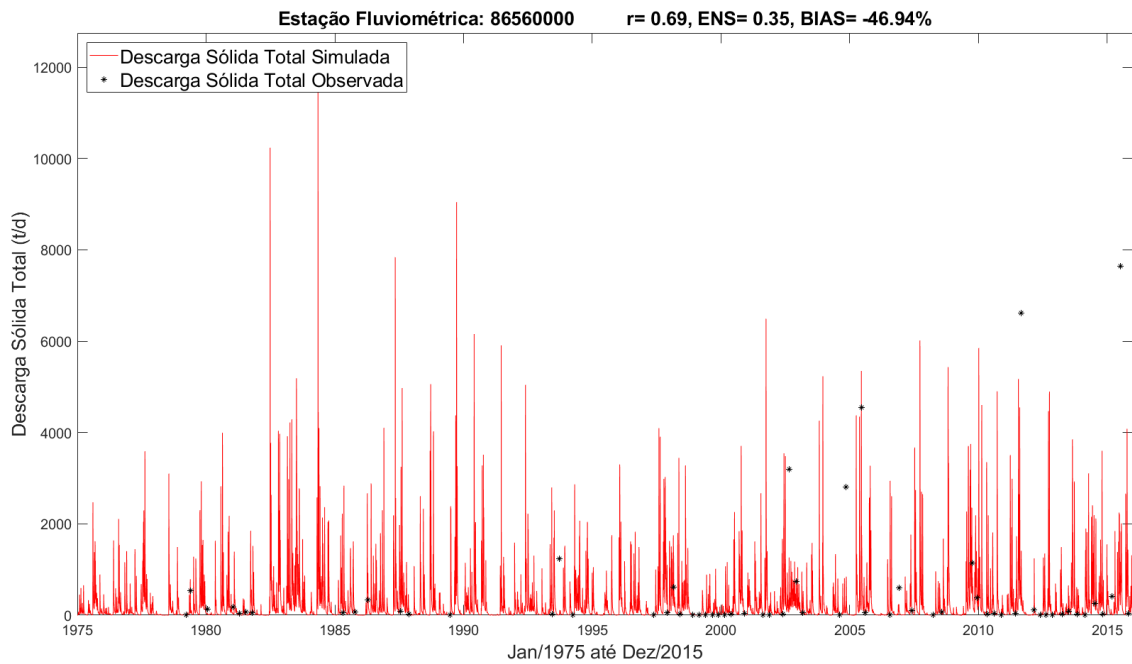
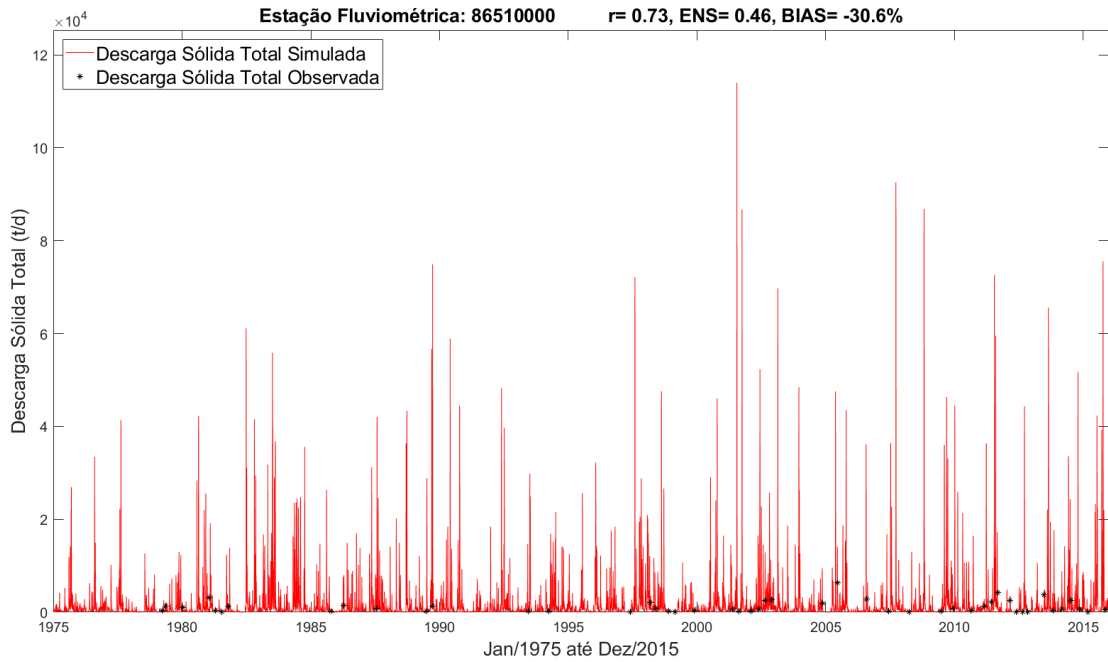
APÊNDICE VII: Sedimentogramas diários das descargas sólidas totais – Período Total (1975 até 2015)

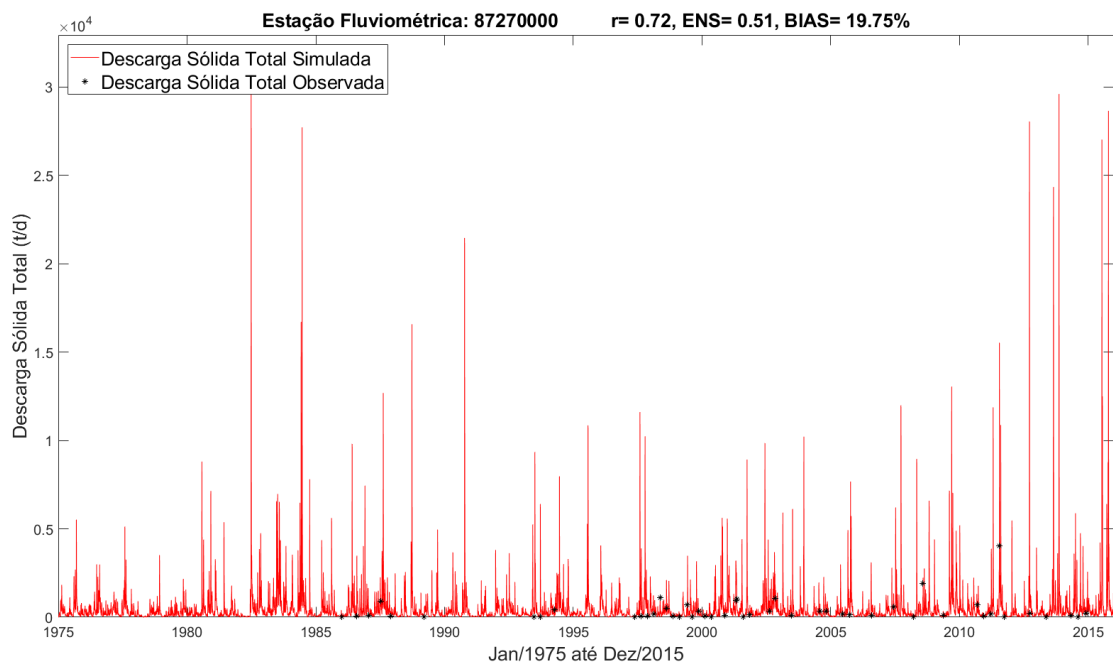
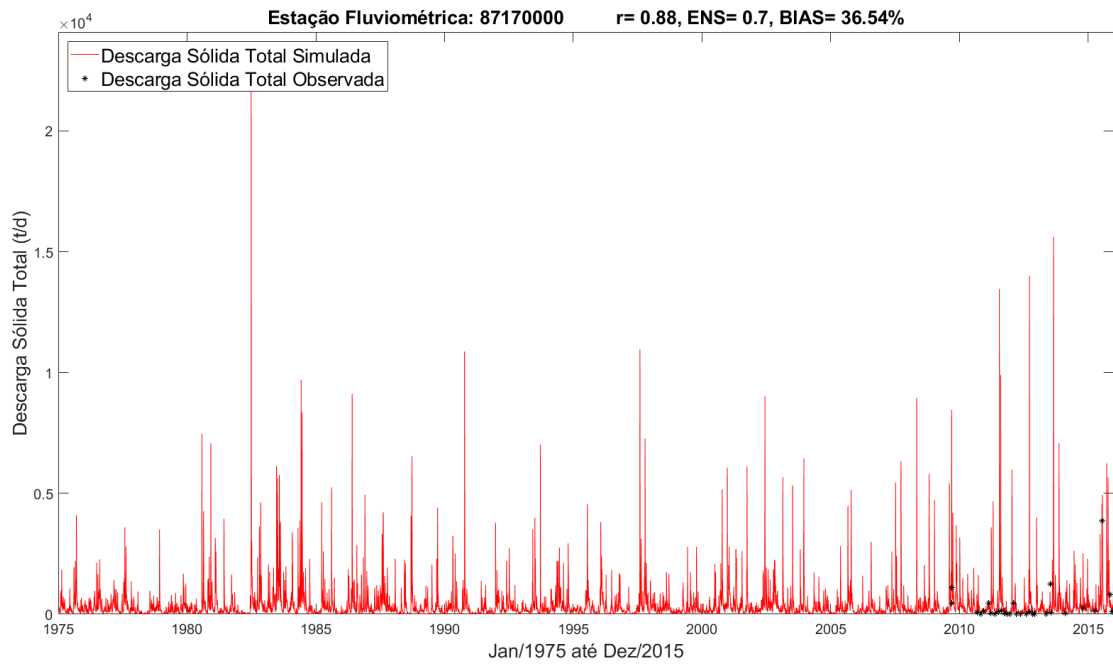


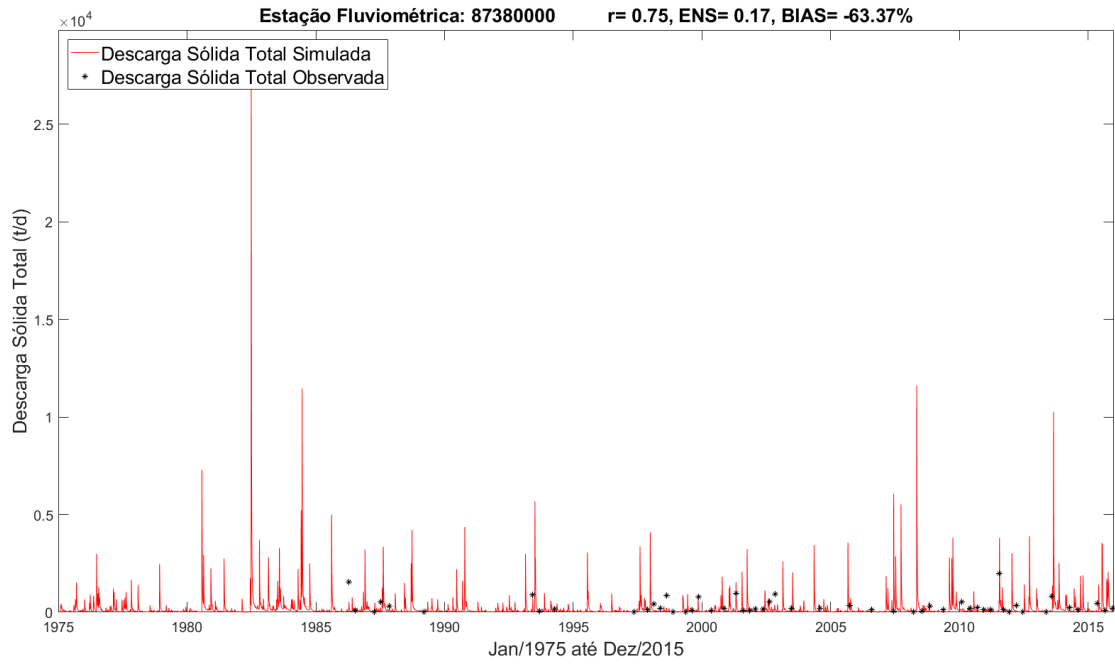




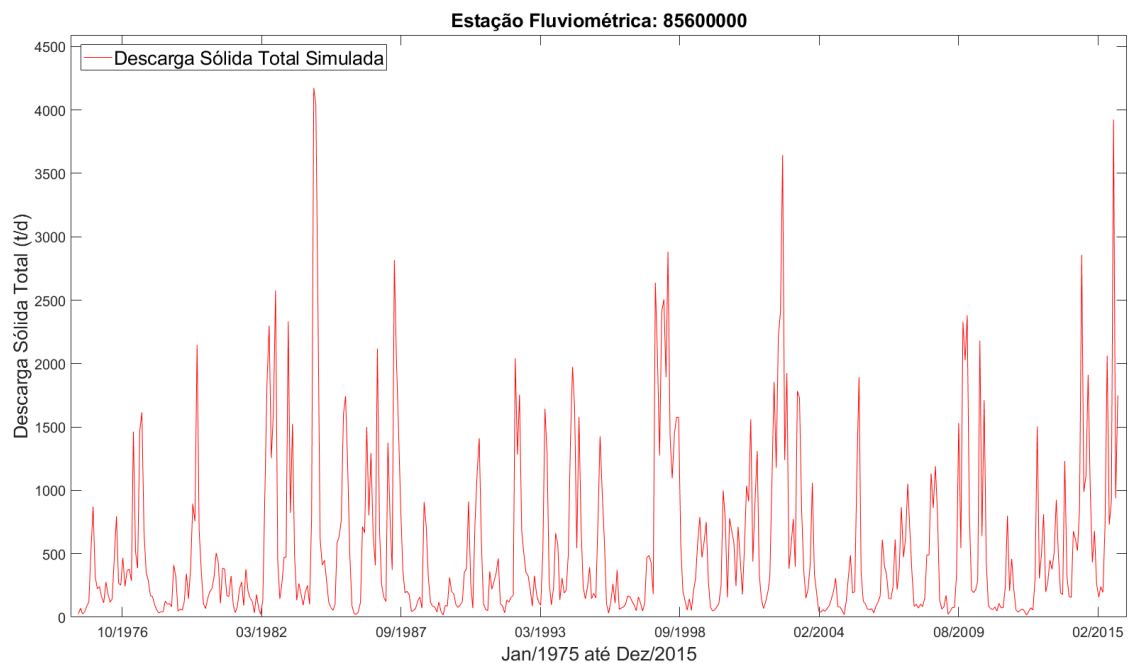
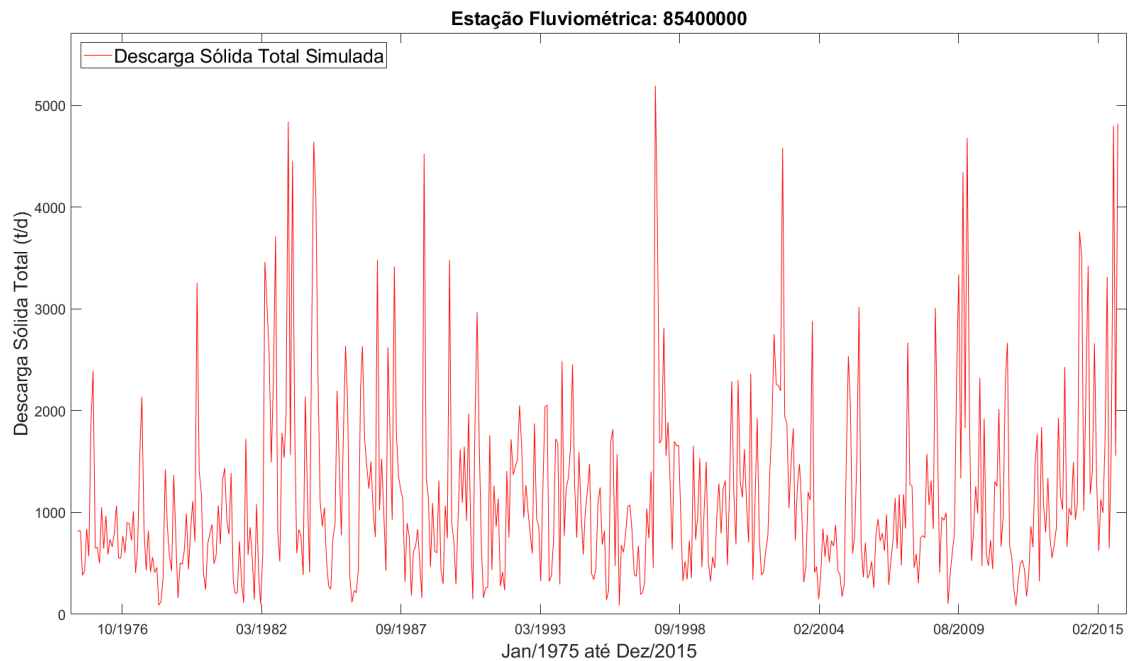




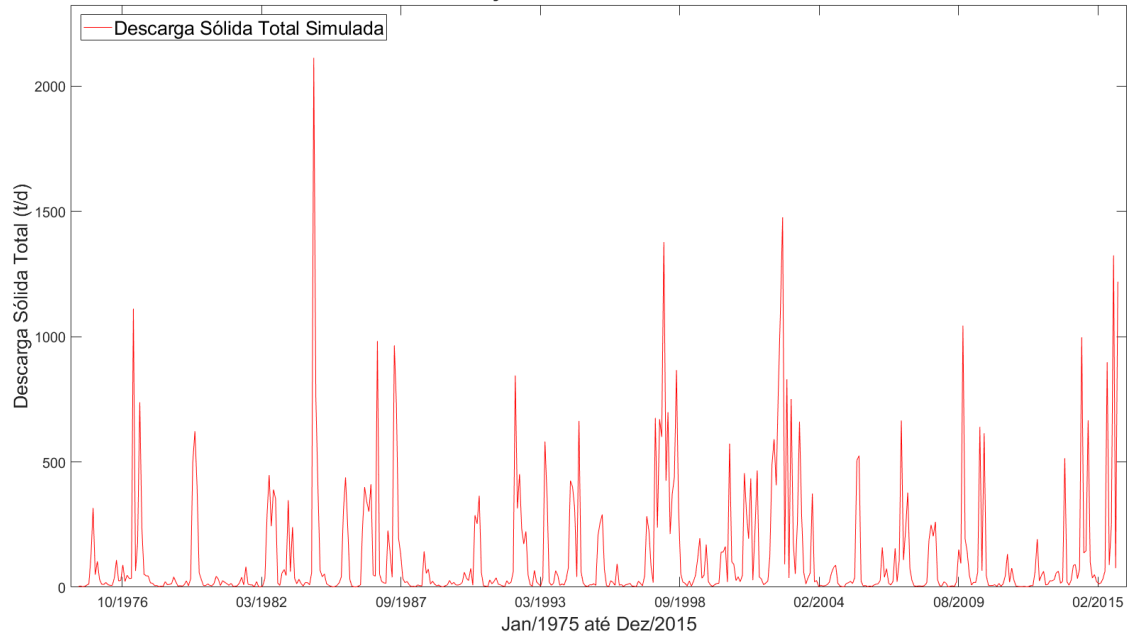




APÊNDICE VIII: Sedimentogramas mensais das descargas sólidas totais - Período Total (1975 até 2015)



Estação Fluviométrica: 85623000



Estação Fluviométrica: 85735000

