

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ MEDEIROS DE NORONHA PESSOA FILHO

ESTUDO DA VARIABILIDADE E PREVISIBILIDADE DAS CHUVAS E VAZÕES
SAZONAIS NA BACIA DO RIO IGUAÇU

CURITIBA

2013

LUIZ MEDEIROS DE NORONHA PESSOA FILHO

ESTUDO DA VARIABILIDADE E PREVISIBILIDADE DAS CHUVAS E VAZÕES
SAZONAIS NA BACIA DO RIO IGUAÇU

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre K. Guetter

Co-orientador: Prof. Dr. Heinz D. Fill

CURITIBA

2013

Pessoa Filho, Luiz Medeiros de Noronha.

Estudo da variabilidade e previsibilidade das chuvas e vazões sazonais na Bacia do Rio Iguaçu / Luiz Medeiros de Noronha Pessoa Filho – Curitiba, 2013.

159 f. il.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre K. Guetter

Co-orientador: Prof. Dr. Heinz D. Fill.

Dissertação (Mestrado) – Dissertação apresentada como requisito parcial ao título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental no Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Inclui Bibliografia

1. Previsão de vazão. 2. Previsão de chuva. 3. Rio Iguaçu. I. Guetter, Alexandre K. II. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551.5



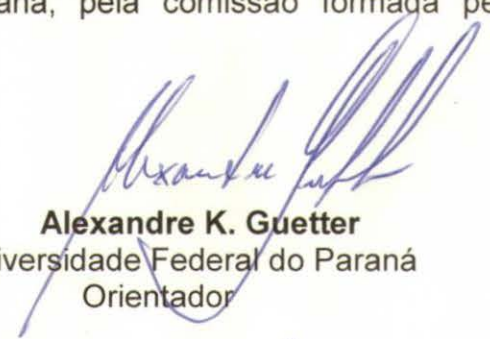
TERMO DE APROVAÇÃO

LUIZ MEDEIROS DE NORONHA PESSOA FILHO

“Estudo da Variabilidade e Previsibilidade das Chuvas e Vazões Sazonais na Bacia do Rio Iguaçu”


Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:



Alexandre K. Guetter
Universidade Federal do Paraná
Orientador


MEMBROS:



Heinz Dieter Fill
Universidade Federal do Paraná
Co-Orientador



Fábio Teodoro de Souza
Pontifícia Universidade Católica do Paraná



Júlio Gomes
Universidade Federal do Paraná



Marcelo Rodrigues Bessa
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 16 de setembro de 2013

Dedico esta dissertação de mestrado aos meus pais...

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Kolodynskie Guetter, pela extrema dedicação, apoio, confiança e amizade.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Heinz Dieter Oskar August Fill, pela experiência profissional e pessoal compartilhada, e ensinamentos únicos, os quais jamais serão esquecidos.

Ao Dr. Caio Coelho, pela recepção extremamente amigável e atenciosa, ao me receber no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

À Prof. Dr. Miriam Rita Moro Mine, e ao Prof. Dr. Marcelo Rodrigues Bessa, pelas fundamentais observações e críticas construtivas ao desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus irmãos Rodolfo e Amanda, pela amizade, companhia e apoio.

Aos meus amigos Marcel, Fernando, Paulo e Fidêncio, pela amizade e companheirismo.

À minha namorada Carolina, pelo amor, paciência e incentivo.

Aos meus pais Luiz e Glícia, a quem eu devo tudo e sou muito grato.

RESUMO

Desde a década de 2000 tem havido avanços científicos no âmbito da previsão climática de chuva, com o uso de modelos numéricos dinâmicos, implicando na necessidade de avaliação do impacto dessas novas tecnologias no índice de acerto das previsões de vazão com horizontes de alguns meses à frente. Este estudo está vinculado aos objetivos do projeto EUROBRISA, que forneceu as previsões de chuva sazonal usada como dado de entrada em um modelo hidrológico concentrado chuva-vazão. O modelo hidrológico 3-R foi calibrado com séries históricas de chuva média observada na bacia e evapotranspiração potencial. A estimativa da evapotranspiração potencial mensal foi obtida com o uso do método combinado de balanço energético e aerodinâmico, bem como as estimativas de variação de cultivo. Essa aplicação do sistema de previsão de vazão sazonal foi desenvolvida para a Bacia do Rio Iguaçu no sul do Brasil. Estudos anteriores indicaram que os índices de acerto das previsões sazonais de vazão eram baixos para a Bacia do Iguaçu. Este estudo visa desenvolver procedimentos que aumentem os índices de acerto, incorporando o uso de dados meteorológicos locais para a estimativa da evapotranspiração potencial mensal, além de aplicar um modelo simplificado de balanço hídrico para estimar a variação mensal dos índices de cultivo na Bacia do Iguaçu. Esse sistema de previsão de vazões sazonais para a Bacia do Iguaçu pode ser útil para a operação do reservatório durante condições de estiagem, para previsão da recuperação do volume armazenado. O sistema de previsão subestima as vazões de pico, não atendendo adequadamente a aplicação de controle de cheias com horizonte de vários meses.

Palavras-chave: Previsão de vazão sazonal. Previsão de chuva sazonal. Bacia do Rio Iguaçu. Modelo hidrológico chuva-vazão.

ABSTRACT

Seasonal rainfall prediction has been improved since 2000 due to the application of climate dynamic numerical models, yielding the need to estimate the impact of such technologies on the seasonal streamflow prediction skills. This work is related to the objectives of the EUROBRISA project, which produced the seasonal rainfall prediction used as input data to the rainfall-runoff-routing model. Basin-average precipitation and potential evapotranspiration were used as input data for the hydrologic model calibration. The energy balance and aerodynamic combination method was applied to estimate the potential evapotranspiration for the meteorological network on the basin. Basin-average plant-growth coefficients were estimated and applied to the combined model potential evapotranspiration to yield basin-average potential evapotranspiration. The seasonal streamflow prediction system was developed for the Iguaçu River Basin, in Southern Brazil. Previous studies have shown that streamflow prediction skill was low for the Iguaçu Basin. The objective of this work is to develop an improved streamflow prediction system for the Iguaçu Basin, using both meteorological data and plant-growth information for the potential evapotranspiration estimates. This prediction system might be useful for the hydropower optimization when the reservoir is depleted during a dry spell, due to its skill on predicting the transition from low to normal seasonal streamflow. The prediction system underestimates the hydrograph peaks, which hampers its application for flood control on 1-3 months lead time.

Keywords: Seasonal streamflow prediction. Seasonal rainfall prediction. Iguaçu River Basin. Rainfall-Runoff-Routing model

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS ENERGÉTICOS E HIDROLÓGICOS.....	27
TABELA 2 - ATRIBUTOS HIDROLÓGICOS E ENERGÉTICOS DAS GRANDES USINAS DO RIO IGUAÇU.....	46
TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE WILHELM KÖPPEN.....	49
TABELA 4 – USO DO SOLO / COBERTURA VEGETAL DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DA USINA DE SALTO CAXIAS.....	52
TABELA 5 - POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS NA BACIA INCREMENTAL ENTRE AS NASCENTES E FOZ DO AREIA.....	53
TABELA 6 - POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS NA BACIA INCREMENTAL ENTRE AS NASCENTES E SALTO CAXIAS.....	54
TABELA 7 – DADOS METEOROLÓGICOS SOLICITADOS AO SIMEPAR.....	57
TABELA 8 – ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS SOLICITADAS AO SIMEPAR.....	58
TABELA 9 - VALORES APROXIMADOS DA ALTURA DE RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIES NATURAIS.....	59
TABELA 10 – ESTIMATIVA INICIAL DO COEFICIENTE DE CULTIVO.....	72
TABELA 11 - PARÂMETROS DA FASE BACIA DO MODELO 3R.....	80
TABELA 12 – PARÂMETROS DA FASE CANAL DO MODELO 3R.....	80
TABELA 13 – PRESSÃO MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT) DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR, NO SENTIDO DE LESTE PARA OESTE NA BACIA DO IGUAÇU.....	81
TABELA 14 - TEMPERATURA MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT) DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR, NO SENTIDO DE OESTE PARA LESTE NA BACIA.....	86
TABELA 15 – UMIDADE RELATIVA MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT) DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR, NO SENTIDO DE OESTE PARA LESTE NA BACIA.....	89
TABELA 16 – RADIAÇÃO SOLAR MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT) DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR, NO SENTIDO DE OESTE PARA LESTE.....	93
TABELA 17 – VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT) DO VENTO MEDIDO A 10M DE ALTURA, ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR, SENTIDO OESTE - LESTE.....	97
TABELA 18 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT), ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR.....	101
TABELA 19 – TOTAL ANUAL PRECIPITADO MÉDIO DE LONGO TERMO (MLT) DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 1981-2010, NO SENTIDO DE OESTE PARA LESTE.....	105
TABELA 20 – MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) DA CHUVA OBSERVADA DO GPCP.....	110
TABELA 21 – MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) DA VAZÃO NATURALIZADA...	113
TABELA 22 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DA CHUVA PREVISTA COM RELAÇÃO À CHUVA OBSERVADA NOS PUVIÔMETROS.....	122
TABELA 23 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIA PREVISTA E OBSERVADA, 1981-2005, UHE FOZ DO AREIA.....	123

TABELA 24 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIA PREVISTA E OBSERVADA, 1981-2005, UHE SALTO CAXIAS	123
TABELA 25 – DIFERENÇAS DO SISTEMA EUROBRISA ENTRE BETTINARDI (2011) E O AUTOR (2013)	126
TABELA 26 – COMPARAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES DE CHUVA ENTRE BETTINARDI (2011) E O AUTOR (2013), USINA DE FOZ DO AREIA, PERÍODO 1987-2001.....	126
TABELA 27 - VALORES DO COEFICIENTE DE CULTIVO A SEREM ANALISADOS	129
TABELA 28 - PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R.....	131
TABELA 29 – MÉDIAS DOS FLUXOS OBSERVADOS E SIMULADOS MENSIS PARA O PERÍODO 1998-2010 EM FOZ DO AREIA E SALTO CAXIAS	131
TABELA 30 – DESVIO PADRÃO DOS FLUXOS OBSERVADOS E SIMULADOS MENSIS PARA O PERÍODO 1998-2010 EM FOZ DO AREIA E SALTO CAXIAS.....	132
TABELA 31 – ESTATÍSTICAS DOS ERROS DOS DEFLÚVIOS PREVISTOS EM FOZ DO AREIA 1 MÊS, 2 MESES E 3 MESES A FRENTE	136
TABELA 32 – ESTATÍSTICAS DOS ERROS DOS DEFLÚVIOS PREVISTOS EM SALTO CAXIAS 1 MÊS, 2 MESES E 3 MESES A FRENTE	137

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA, ANO DE 2011	21
FIGURA 2 - INTEGRAÇÃO ELETRO-ENERGÉTICA DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	22
FIGURA 3 - TRANSFERÊNCIAS ENERGÉTICAS ENTRE AS REGIÕES SUDESTE/CENTRO-OESTE E REGIÃO SUL EM 2009	23
FIGURA 4 - ESQUEMA UNIFILAR DAS BACIAS DO SIN.....	25
FIGURA 5 - INTERAÇÃO ENTRE OS MODELOS HIDROLÓGICOS E A CADEIA DE PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DO SIN	28
FIGURA 6 - ANOMALIA MÉDIA DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA PARA O PRODUTO INTEGRADO.....	32
FIGURA 7 - ANOMALIA MÉDIA DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA PARA OS MODELOS QUE INTEGRAM O EUROBRISA	33
FIGURA 8 - PROBABILIDADE DO TERCIL MAIS PROVÁVEL PARA A PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO INTEGRADO	34
FIGURA 9 - PREVISÃO CATEGÓRICA DO MODELO INTEGRADO, VARIANDO ENTRE SECO E ÚMIDO	36
FIGURA 10 - PROBABILIDADE DE QUE A CHUVA ESTEJA ACIMA DA MÉDIA ...	37
FIGURA 11 - PROBABILIDADE DA CHUVA NO TERCIL INFERIOR	38
FIGURA 12 - PROBABILIDADE DA CHUVA NO TERCIL SUPERIOR.....	39
FIGURA 13 - PROBABILIDADE DO QUINTIL INFERIOR	40
FIGURA 14 - PROBABILIDADE DA CHUVA NO QUINTIL SUPERIOR	41
FIGURA 15 - CORRELAÇÃO ENTRE A ANOMALIA DE CHUVA PREVISTA E A ANOMALIA DE CHUVA OBSERVADA	43
FIGURA 16 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO IGUAÇU	46
FIGURA 17 – PRINCIPAIS USINAS HIDRELÉTRICAS DA BACIA DO RIO IGUAÇU	47
FIGURA 18 – UNIDADES HIDROGRÁFICAS DA BACIA DO IGUAÇU	48
FIGURA 19 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DO ESTADO DO PARANÁ.....	50
FIGURA 20 – USO DO SOLO NA BACIA DO IGUAÇU.....	51
FIGURA 21 – LOCALIZAÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE CHUVA OBSERVADA EXTRAÍDOS DO GPCP.....	56
FIGURA 22 – LOCALIZAÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS SOLICITADAS AO SIMEPAR NA BACIA DO IGUAÇU	58
FIGURA 23 – PONTOS DE PREVISÃO DE CHUVA SELECIONADOS PARA A BACIA DO IGUAÇU.....	64
FIGURA 24 – ÁREAS DE REFERÊNCIA PARA O CÔMPUTO DA PREVISÃO DA CHUVA MÉDIA NA BACIA	65
FIGURA 25 – EXEMPLO DO MÉTODO DA REGRESSÃO LINEAR PARA PREENCHIMENTO DE FALHAS	66
FIGURA 26 -CURVA DUPLO ACUMULATIVA DE UM POSTO INCONSISTENTE .	67
FIGURA 27 – CURVA DUPLO ACUMULATIVA DE UM POSTO CONSISTENTE ...	67
FIGURA 28 - ESTRUTURA DO MODELO 3R	76
FIGURA 29 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRESSÃO ANUAL MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) NA BACIA DO IGUAÇU	82
FIGURA 30 – CICLO ANUAL DA PRESSÃO NA BACIA DO RIO IGUAÇU, MÉDIA DAS ESTAÇÕES, PERÍODO 1998-2012	83

FIGURA 31 – HISTOGRAMA DA PRESSÃO DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012	84
FIGURA 32 – HISTOGRAMA DA PRESSÃO DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 2000 A 2012.....	85
FIGURA 33 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA TEMPERATURA ANUAL MÉDIA DE LONGO TERMO NA BACIA DO IGUAÇU	86
FIGURA 34 – CICLO ANUAL DA TEMPERATURA NA BACIA DO RIO IGUAÇU, PERÍODO 1998-2012	87
FIGURA 35 - HISTOGRAMA DA TEMPERATURA DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012.....	88
FIGURA 36 – HISTOGRAMA DA TEMPERATURA DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 2000 A 2012.....	89
FIGURA 37 - VARIABILIDADE ESPACIAL DA UMIDADE RELATIVA ANUAL MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) NA BACIA DO IGUAÇU	90
FIGURA 38 – CICLO ANUAL DA UMIDADE RELATIVA DO AR NA BACIA DO RIO IGUAÇU, PERÍODO 1998-2012	91
FIGURA 39 - HISTOGRAMA DA UMIDADE RELATIVA DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012.....	92
FIGURA 40 - HISTOGRAMA DA UMIDADE RELATIVA DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 2000 A 2012.....	93
FIGURA 41 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA RADIAÇÃO SOLAR ANUAL MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) NA BACIA DO IGUAÇU	94
FIGURA 42 – CICLO ANUAL DA RADIAÇÃO SOLAR NA BACIA DO RIO IGUAÇU, PERÍODO 1998-2012	95
FIGURA 43 - HISTOGRAMA DA RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012.....	96
FIGURA 44 - HISTOGRAMA DA RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 2000 A 2012.....	97
FIGURA 45 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA VELOCIDADE DO VENTO MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) NA BACIA DO RIO IGUAÇU	98
FIGURA 46 – CICLO ANUAL DA VELOCIDADE DO VENTO NA BACIA DO RIO IGUAÇU, PERÍODO 1998-2012	99
FIGURA 47 - HISTOGRAMA DA VELOCIDADE DO VENTO DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012.....	100
FIGURA 48 - HISTOGRAMA DA VELOCIDADE DO VENTO DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 2000 A 2012	101
FIGURA 49 - VARIABILIDADE ESPACIAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ANUAL MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) NA BACIA DO IGUAÇU	102

FIGURA 50 – CICLO ANUAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA BACIA DO RIO IGUAÇU	103
FIGURA 51 - HISTOGRAMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012.....	103
FIGURA 52 - HISTOGRAMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 2000 A 2012	104
FIGURA 53 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA CHUVA OBSERVADA NA BACIA DO IGUAÇU.....	106
FIGURA 54 - CICLO ANUAL DA CHUVA OBSERVADA NA BACIA DO RIO IGUAÇU, PERÍODO 1981-2010	107
FIGURA 55 - HISTOGRAMA DO TOTAL ANUAL PRECIPITADO NA ESTAÇÃO 2549004 (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1981 A 2010.....	107
FIGURA 56 - HISTOGRAMA DO TOTAL ANUAL PRECIPITADO NA ESTAÇÃO 2553005 (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1981 A 2010.....	108
FIGURA 57 – COMPARAÇÃO ENTRE A CHUVA OBSERVADA NOS PLUVIÔMETROS E A DO GPCP, REGIÃO ENTRE AS NASCENTES E FOZ DO AREIA, 1981-2010	109
FIGURA 58 - COMPARAÇÃO ENTRE A CHUVA OBSERVADA NOS PLUVIÔMETROS E A DO GPCP, REGIÃO ENTRE FOZ DO AREIA E SALTO CAXIAS, 1981-2010.....	110
FIGURA 59 – COMPARAÇÃO DA VARIABILIDADE SAZONAL (CICLO ANUAL) ENTRE A CHUVA OBSERVADA DO GPCP E A CHUVA OBSERVADA NOS PLUVIÔMETROS, PERÍODO 1981-2010	111
FIGURA 60 –VAZÃO NATURALIZADA MÉDIA ANUAL EM FOZ DO AREIA.....	112
FIGURA 61 - VAZÃO NATURALIZADA MÉDIA ANUAL EM SALTO CAXIAS.....	113
FIGURA 62 - CICLO ANUAL DA VAZÃO NATURAL MENSAL NA BACIA DO IGUAÇU.....	114
FIGURA 63 – HISTOGRAMA DA VAZÃO NATURAL MENSAL NA USINA DE FOZ DO AREIA, PERÍODO 1931-2010	115
FIGURA 64 – CURVA DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES NATURAIS MÉDIAS MENSAIS DE 1931 A 2010, USINA DE FOZ DO AREIA	116
FIGURA 65 - HISTOGRAMA DA VAZÃO NATURAL MENSAL NA USINA DE SALTO CAXIAS, PERÍODO 1931-2010	117
FIGURA 66 - CURVA DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES NATURAIS MÉDIAS MENSAIS DE 1931 A 2010, USINA DE SALTO CAXIAS.....	117
FIGURA 67 - SÉRIE TEMPORAL DA CHUVA PREVISTA E DA CHUVA OBSERVADA NA BACIA ENTRE AS NASCENTES E FOZ DO AREIA, PERÍODO 1981-2005	118
FIGURA 68 – CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS OBSERVADAS E PREVISTAS, REGIÃO ENTRE AS NASCENTES DO IGUAÇU E A UHE FOZ DO AREIA.....	119
FIGURA 69 - SÉRIE TEMPORAL DA CHUVA PREVISTA E DA CHUVA OBSERVADA NA BACIA INCREMENTAL ENTRE SALTO CAXIAS E FOZ DO AREIA, PERÍODO 1981-2005.....	120

FIGURA 70 - CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS OBSERVADAS E PREVISTAS, REGIÃO ENTRE FOZ DO AREIA E SALTO CAXIAS	120
FIGURA 71 - SÉRIE TEMPORAL DA CHUVA PREVISTA E DA CHUVA OBSERVADA NA BACIA ENTRE AS NASCENTES E SALTO CAXIAS, PERÍODO 1981-2005	121
FIGURA 72 – CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS OBSERVADAS E PREVISTAS, REGIÃO ENTRE AS NASCENTES DO IGUAÇU E A UHE SALTO CAXIAS.....	122
FIGURA 73 – MENOR CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIA PREVISTA E OBSERVADA, 1981-2005, USINA DE FOZ DO AREIA	124
FIGURA 74 - MAIOR CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIA PREVISTA E OBSERVADA, 1981-2005, USINA DE SALTO CAXIAS.....	125
FIGURA 75 - VARIAÇÃO DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA NO SOLO EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO, ENTRE AS NASCENTES E FOZ DO AREIA	129
FIGURA 76 - VARIAÇÃO DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA NO SOLO EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO, ENTRE AS NASCENTES E SALTO CAXIAS.....	130
FIGURA 77 – INTERCOMPARAÇÃO DOS DEFLÚVIOS MODELADO E OBSERVADO PRODUZIDAS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA MÉDIA EM FOZ DO AREIA	133
FIGURA 78 – INTERCOMPARAÇÃO DOS DEFLÚVIOS MODELADO E OBSERVADO PRODUZIDAS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA MÉDIA EM SALTO CAXIAS.....	133
FIGURA 79 – CORRELAÇÃO ENTRE OS DEFLÚVIOS SIMULADOS E OBSERVADOS EM FOZ DO AREIA	134
FIGURA 80 – CORRELAÇÃO ENTRE OS DEFLÚVIOS SIMULADOS E OBSERVADOS EM SALTO CAXIAS	134
FIGURA 81 – VARIAÇÕES DOS ARMAZENAMENTOS DA ÁGUA NO SOLO EM FOZ DO AREIA, SIMULADOS PELO MODELO 3-R.....	135
FIGURA 82 – VARIAÇÕES DOS ARMAZENAMENTOS DA ÁGUA NO SOLO EM FOZ DO AREIA, SIMULADOS PELO MODELO 3-R.....	135
FIGURA 83 – DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 1 MÊS EM FOZ DO AREIA	139
FIGURA 84 – DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 1 MÊS EM SALTO CAXIAS.....	139
FIGURA 85 – DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 2 MESES EM FOZ DO AREIA	140
FIGURA 86 – DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 2 MESES EM SALTO CAXIAS.....	140
FIGURA 87 – DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 3 MESES EM FOZ DO AREIA	141
FIGURA 88 – DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 3 MESES EM SALTO CAXIAS.....	141

LISTA DE SIGLAS

3R – Rainfall Runoff Routing

ANA – Agência Nacional de Águas

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

ECMWF – European Centre for Medium-Range and Weather Forecast

EU – University of Exeter

EUROBRISA – Euro-Brazilian Initiative for Improving South American Seasonal Forecasts

GPCP – Global Precipitation Climatology Project

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

Météo-France – Centre National de Recherches Météorologiques

MLT – Média de longo termo

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro

PDO – Programa Diário de Operação

PMO – Programa Mensal de Operação

SIN – Sistema Interligado Nacional

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UHE – Usina Hidrelétrica

UKMO – United Kingdom Met Office

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3	JUSTIFICATIVA	19
1.4	ORGANIZAÇÃO	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	21
2.2	PREVISÃO DE VAZÃO MENSAL	26
2.2.1	SISTEMA ATUAL DE PREVISÃO DE AFLUÊNCIAS DO ONS	26
2.2.2	MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-VAZÃO	28
2.3	PREVISÃO DE CHUVA SAZONAL DO PROJETO EUROBRISA	29
2.3.1	PRODUTOS DE PREVISÃO	31
2.3.2	PRODUTOS DE VERIFICAÇÃO	41
2.3.2.1	CORRELAÇÃO	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	ÁREA DE ESTUDO	45
3.1.1	HIDROGRAFIA	47
3.1.2	CLIMA	49
3.1.3	USO DO SOLO	51
3.2	DADOS	53
3.2.1	CHUVA OBSERVADA	53
3.2.1.1	PLUVIÔMETROS	53
3.2.1.2	GLOBAL PRECIPITATION CLIMATOLOGY PROJECT (GPCP)	55
3.2.2	CHUVA PREVISTA	56
3.2.3	VAZÃO NATURAL	57
3.2.4	DADOS METEOROLÓGICOS	57
3.3	ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES	60
3.3.1	ERRO MÉDIO ABSOLUTO	60
3.3.2	RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO	60
3.3.3	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO LINEAR	60
3.3.4	COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH-SUTCLIFFE	61
3.4	SOFTWARE "R"	61
3.5	MÉTODOS	62
3.5.1	RECONSTRUÇÃO DA PREVISÃO DA CHUVA MÉDIA NA BACIA	62
3.5.2	PREENCHIMENTO DE FALHAS E ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS	65
3.5.3	ALGORITMO PARA ESTIMATIVA DA CHUVA MÉDIA OBSERVADA NA BACIA	67
3.5.4	ALGORITMOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE LÍQUIDA	68
3.5.4.1	MÉTODO DO BALANÇO DE ENERGIA	69
3.5.4.2	MÉTODO AERODINÂMICO	69
3.5.4.3	MÉTODO COMBINADO	70
3.5.5	ALGORITMO PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA	71
3.5.6	ALGORITMO PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DE OUTROS CULTIVOS	72
3.5.7	MODELO BALMES	73
3.5.7.1	EQUAÇÃO GOVERNANTE	73
3.5.8	MODELO HIDROLÓGICO 3R	76

3.5.8.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES.....	78
3.5.8.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO.....	80
4 RESULTADOS.....	81
4.1 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DOS DADOS METEOROLÓGICOS	81
4.1.1 PRESSÃO.....	81
4.1.2 TEMPERATURA.....	85
4.1.3 UMIDADE RELATIVA.....	89
4.1.4 RADIAÇÃO SOLAR.....	93
4.1.5 VELOCIDADE DO VENTO.....	97
4.2 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	101
4.3 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CHUVA OBSERVADA	105
4.3.1 PLUVIÔMETROS	105
4.3.2 GPCP.....	109
4.4 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA VAZÃO NATURAL OBSERVADA.....	111
4.5 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CHUVA PREVISTA.....	118
4.5.1 EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ACURÁCIA DA PREVISÃO CLIMÁTICA DE CHUVA....	125
4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO BALMES.....	126
4.6.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO COEFICIENTE DE CULTIVO (KC)	128
4.7 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO HIDROLÓGICO 3R	130
4.8 ANÁLISE DA PREVISÃO DE VAZÃO	136
5 CONCLUSÃO.....	143
REFERÊNCIAS	145
ANEXOS	148
ANEXO 1 – ROTINA FORTRAN MET_ANALISE.F	149
ANEXO 2 – ROTINA FORTRAN BALMES.F	153

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro é constituído em sua maior parte por energia elétrica proveniente de fonte hidráulica, sendo regionalmente interligado através de um sistema de transmissão que transfere energia entre as regiões Norte e Nordeste e entre o Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul. A demanda de energia não suprida pelas hidrelétricas é atendida por usinas termelétricas, eólicas, nucleares e por transferências internacionais, cujos custos são mais elevados que o das hidrelétricas. A operação de todo o sistema elétrico interligado nacional (SIN), constituído por 103 usinas hidrelétricas e 37 usinas térmicas, é planejada com o objetivo de minimizar o uso das usinas térmicas, maximizando a confiabilidade e minimizando o custo (TUCCI *et. al.*, 2007). Além de minimizar o uso das usinas térmicas, o SIN busca minimizar o valor esperado do custo global.

Nas últimas décadas, têm-se observado avanços na previsão de tempo e clima, com a disponibilização de produtos cada vez de melhor qualidade para o horizonte de previsão de até três meses à frente. Desta forma, aponta-se como um desenvolvimento tecnológico recomendável a avaliação do uso destas informações climáticas para a obtenção de previsões de vazões mensais.

Atualmente, para a programação da geração de energia, o setor elétrico brasileiro usa modelos matemáticos baseados em séries de vazões mensais reconstituídas de 1931 até o presente, para todos os aproveitamentos hidrelétricos do SIN com o intuito de otimizar a geração de energia elétrica. Essa otimização da geração é fundamentada na minimização de uma função objetivo relacionada com o custo da energia produzida ao longo de um horizonte de doze meses, sendo atualizada mensalmente. Portanto, a otimização da geração de energia do SIN requer a previsão das afluições nos reservatórios de todas as usinas hidrelétricas do sistema.

Como no sistema atual de previsão de vazão se usam as séries históricas de vazões mensais nos aproveitamentos e processos estocásticos para a geração de cenários de vazões futuras, está implícita a hipótese de que todas as sequências climáticas do passado têm a mesma probabilidade de ocorrer no futuro (BETTINARDI, 2011).

O programa de colaboração multi-institucional EUROBRISA, que significa

“A Euro-Brazilian Initiative for Improving South American Seasonal Forecasts”, tem como alguns dos seus objetivos diagnosticar o impacto dos produtos de previsão climática sazonal de chuva do EUROBRISA sobre as previsões de vazões sazonais para as bacias do setor elétrico brasileiro, assim como desenvolver e validar um método para a incorporação da previsão climática sazonal de chuva no processo de gerenciamento dos reservatórios do SIN. Os aspectos de maior interesse no aprimoramento do gerenciamento dos reservatórios são a programação energética e o controle de cheias.

Bettinardi (2011) já avaliou as previsões de chuva e vazão para várias bacias das regiões Sul e Sudeste, que foram complementadas por Dalledonne (2011) para as previsões de vazões para as bacias do Norte e Nordeste.

Nesses dois estudos foram usadas as previsões climáticas de chuva do projeto EUROBRISA como dado de entrada em um modelo hidrológico chuva-vazão, cujo resultado era a previsão de vazão. Os resultados da previsão de vazão foram bastante satisfatórios para a maior parte das bacias, principalmente as do Sudeste, Norte e Nordeste que são caracterizadas por estações úmidas e secas bem definidas. Todavia, Bettinardi (2011) verificou que os índices de acerto das previsões de chuva, e conseqüentemente os índices de acerto das previsões de vazão, não foram satisfatórios para a Bacia do Rio Iguaçu, de forma que nesta dissertação pretendeu-se, dentre outros objetivos, refazer a avaliação de Bettinardi (2011), mas com a adoção de algumas alterações metodológicas, listadas abaixo:

- 1) Mudança do algoritmo de estimativa da evapotranspiração potencial, que havia sido estimada por Bettinardi (2011) com a aplicação do método de Thornthwaite (1948). Por se tratar de um método pouco robusto, optou-se nesta dissertação por estimar a evapotranspiração com o auxílio de outros métodos, que usassem um maior número de variáveis meteorológicas e procedimentos com uma base física mais consistente;
- 2) Utilização de uma quantidade maior de postos pluviométricos para estimativa da chuva média observada na bacia;
- 3) Utilização da base de dados de previsão de chuva atualizada do projeto EUROBRISA, estendendo o período de análise de 1987-2001 para

1981-2005;

- 4) Aumento da área estudada da Bacia do Rio Iguaçu. Bettinardi (2011) analisou a região entre as nascentes do Iguaçu e a UHE Foz do Areia, enquanto que nesta dissertação ampliou-se a área estudada até a UHE Salto Caxias.

Esta dissertação está inserida nos objetivos propostos do projeto EUROBRISA. As séries de *hindcast* (*i.e.* previsões feitas com referência ao período do passado) da previsão de chuva sazonal do EUROBRISA para 1981-2005 foram usadas como dados de entrada para a previsão de vazões mensais na Bacia do Iguaçu, com horizonte de previsão de três meses à frente.

Neste estudo adotou-se um modelo hidrológico concentrado chuva-vazão, cuja calibração foi feita usando como dados de entrada médias espaciais de chuva observada em pluviômetros na bacia, evapotranspiração de referência por Doorenbos e Pruitt (1977) e vazões naturais observadas do ONS. Os modelos hidrológicos concentrados, em comparação com os distribuídos, tem como vantagens demandar menores recursos para a calibração e desenvolvimento do sistema de previsão.

1.1 OBJETIVO GERAL

Verificar o impacto das previsões climáticas sazonais de chuva, no seu estado da ciência atual, sobre o aumento do acerto das previsões mensais de vazão, com horizonte de três meses. Havendo o aumento do acerto das previsões de vazão, então se pode usar essa tecnologia para a otimização da geração hidrelétrica no SIN. Desse modo, haverá redução do custo de energia através da minimização da geração térmica e, conseqüentemente, diminuição das emissões de dióxido de carbono (CO₂), contribuindo para a redução do fenômeno de Efeito Estufa, almejando ao desenvolvimento sustentável.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

As atividades relacionadas ao estudo a ser desenvolvido compreendem:

- 1) Modelagem da evaporação com o método combinado de Penman (1948), (seção 3.5.4.3), que acopla as informações do método aerodinâmico (seção 3.5.4.2) com o método do balanço de energia (seção 3.5.4.1), usando como dados de entrada séries temporais de radiação, temperatura, umidade relativa e vento obtidas das estações meteorológicas do SIMEPAR na Bacia do Iguaçu;
- 2) Estudo de sensibilidade mensal do coeficiente de cultivo na Bacia do Iguaçu com um modelo de balanço hídrico mensal, que usa como dados de entrada as séries de chuva observada, a evapotranspiração de referência (Doorenbos e Pruitt, 1977), e o deflúvio (vazão dividida pela área de drenagem) da bacia. O modelo de balanço hídrico estima a variabilidade temporal da água armazenada no solo em função dos coeficientes de cultivo na bacia, dessa forma os coeficientes de cultivo são analisados tendo como função objetivo a amplitude da variabilidade da água armazenada no solo;
- 3) Construção da série espaço-temporal da chuva observada;
- 4) Construção da série espaço-temporal da chuva prevista;
- 5) Análise das estatísticas de acerto da chuva prevista;
- 6) Calibração de modelos chuva-vazão para duas sub-bacias selecionadas, entre as nascentes do Rio Iguaçu e a usina de Foz do Areia, e entre as nascentes e a usina de Salto Caxias;
- 7) Simulação das vazões mensais previstas usando como dado de entrada a série espaço-temporal da chuva prevista do sistema EUROBRISA;
- 8) Análise das estatísticas de acerto da vazão prevista.

1.3 JUSTIFICATIVA

A partir do estudo a ser desenvolvido, pretende-se avaliar se existe aumento do acerto das previsões de vazões afluentes aos aproveitamentos hidrelétricos utilizando-se previsões climáticas de chuva. Atualmente, os modelos estocásticos utilizam séries históricas de vazões observadas para produzir cenários

de previsão de vazão. Com o emprego das tecnologias de previsão climática associadas à modelagem chuva-vazão, pretende-se aumentar o acerto da previsão de vazão mensal. Se for demonstrado que essas novas tecnologias aumentam o acerto das previsões de aflúncias aos reservatórios das usinas hidrelétricas, então o uso operacional dessa tecnologia irá aumentar a eficiência da geração hidrelétrica, através da otimização da operação do conjunto do sistema hidrotérmico.

1.4 ORGANIZAÇÃO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, incluindo esta introdução. No capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura, a qual aborda temas sobre previsões de chuva e vazão. O capítulo 3 descreve a área de estudo, os dados e os modelos e métodos utilizados. Os dados são de natureza hidrológica (chuva observada, chuva prevista e vazão) e meteorológica (radiação, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento). Na seção de métodos é descrito o método das composições para estimativa da previsibilidade da chuva, os modelos para evapotranspiração, o modelo chuva-vazão, e os índices estatísticos para caracterização da taxa de acerto das previsões. O capítulo 4 apresenta os resultados da dissertação, os quais incluem a descrição detalhada da variabilidade espaço-temporal de todos os dados meteorológicos e hidrológicos usados para a concretização das previsões de vazão. Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões da dissertação, incluindo as recomendações/sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura foi organizada em três blocos. O primeiro bloco descreve brevemente o sistema elétrico brasileiro, enfatizando a hidroeletricidade e a otimização hidrotérmica. O segundo bloco trata da previsão de vazões mensais, enquanto que o terceiro apresenta os produtos relacionados ao projeto EUROBRISA que se referem às previsões de chuva sazonal.

2.1 O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (ONS, 2013a).

A geração de energia elétrica no Brasil é dominada pela hidroeletricidade (81,9%), conforme ilustra a FIGURA 1, referente ao ano de 2011. Portanto, as questões associadas à variabilidade e previsibilidade das vazões são extremamente relevantes para a geração elétrica no Brasil.

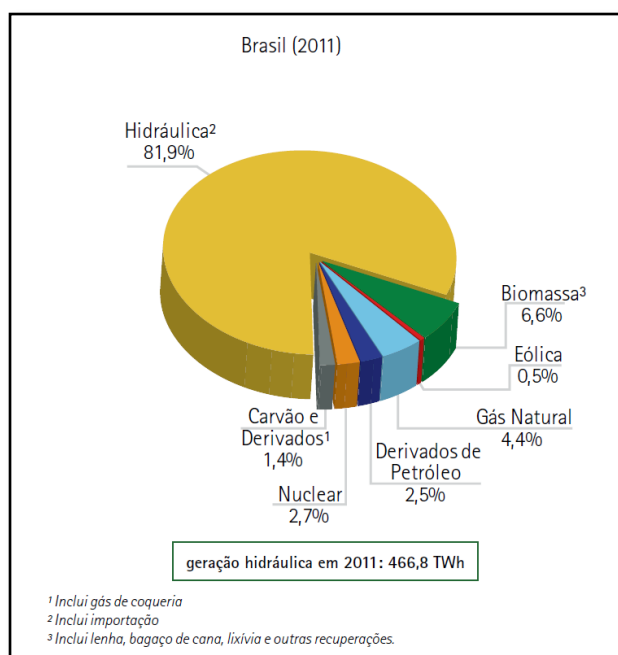


FIGURA 1- MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA, ANO DE 2011
FONTE: EPE (2012)

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é a instituição brasileira responsável pela programação da geração de energia elétrica no Brasil. A geração e transmissão de energia elétrica no Brasil são realizadas de duas formas: (1) em um grande sistema interligado e (2) em um conjunto de sistemas isolados.

A FIGURA 2 ilustra o Sistema Interligado Nacional (SIN) que é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (ONS, 2013a).

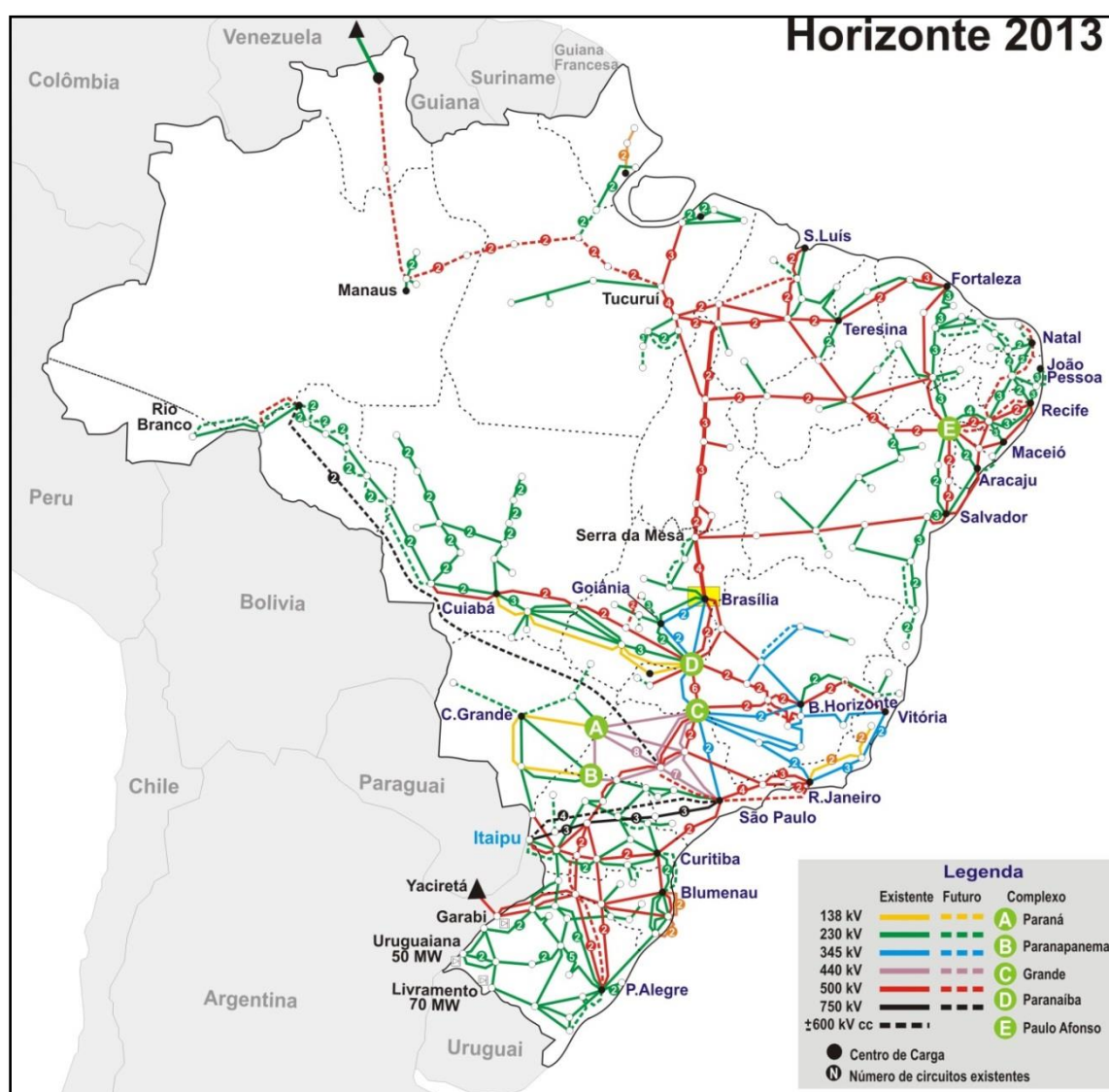


FIGURA 2- INTEGRAÇÃO ELETRO-ENERGÉTICA DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO
 FONTE: ONS (2013a)

O Brasil tem dimensões continentais e suas regiões têm climas distintos, ou seja, o regime de chuvas varia entre as regiões do país. Conseqüentemente, o comportamento das vazões varia de acordo com os períodos secos e úmidos de cada bacia hidrográfica.

A principal vantagem da escala continental e da variabilidade espacial do regime hidrológico brasileiro é que se pode transferir a energia elétrica produzida em regiões em que os rios estejam cheios para as regiões que atravessam um período de baixas vazões.

A FIGURA 3 ilustra as transferências energéticas entre as regiões Sudeste/Centro-Oeste e Sul em 2009. Note que durante o período de janeiro a julho a região Sudeste transferiu energia para a região Sul, enquanto que o Sul transferiu energia para o Sudeste entre agosto e dezembro.

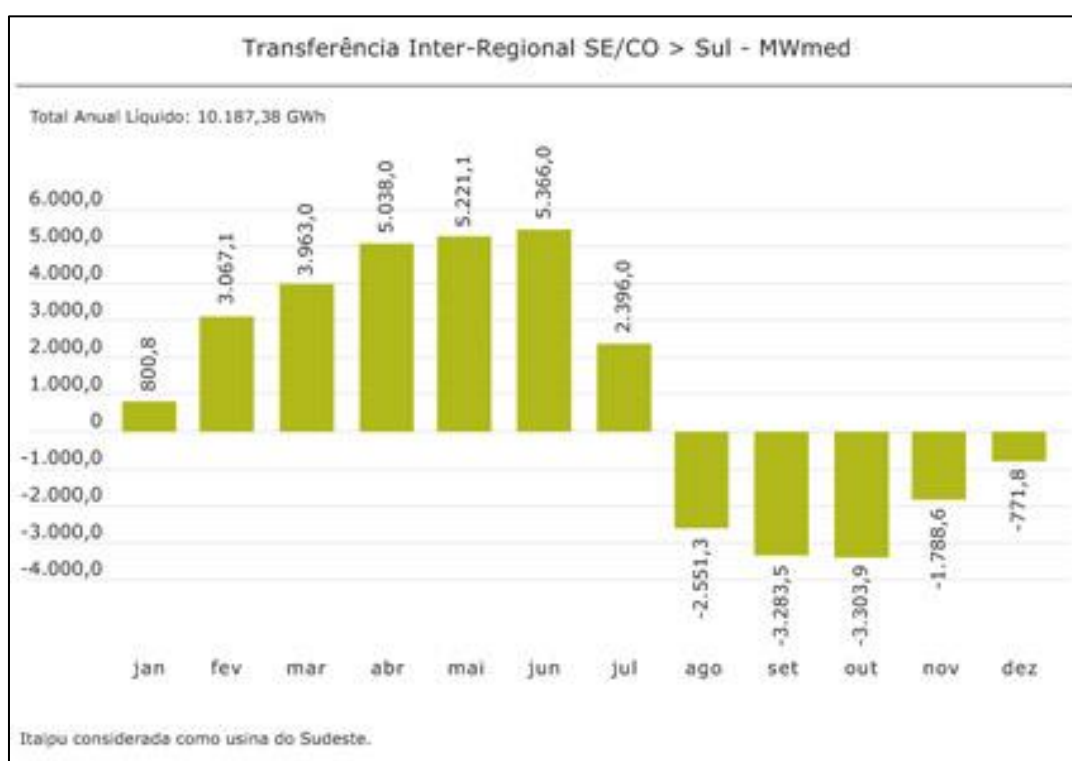


FIGURA 3- TRANSFERÊNCIAS ENERGÉTICAS ENTRE AS REGIÕES SUDESTE/CENTRO-OESTE E REGIÃO SUL EM 2009
FONTE: ONS (2013a)

As chuvas são abundantes no Sudeste durante o verão e seus reservatórios permanecem cheios, viabilizando assim a exportação energética entre janeiro e julho. O período seco na Região Sudeste vai de abril a setembro, portanto

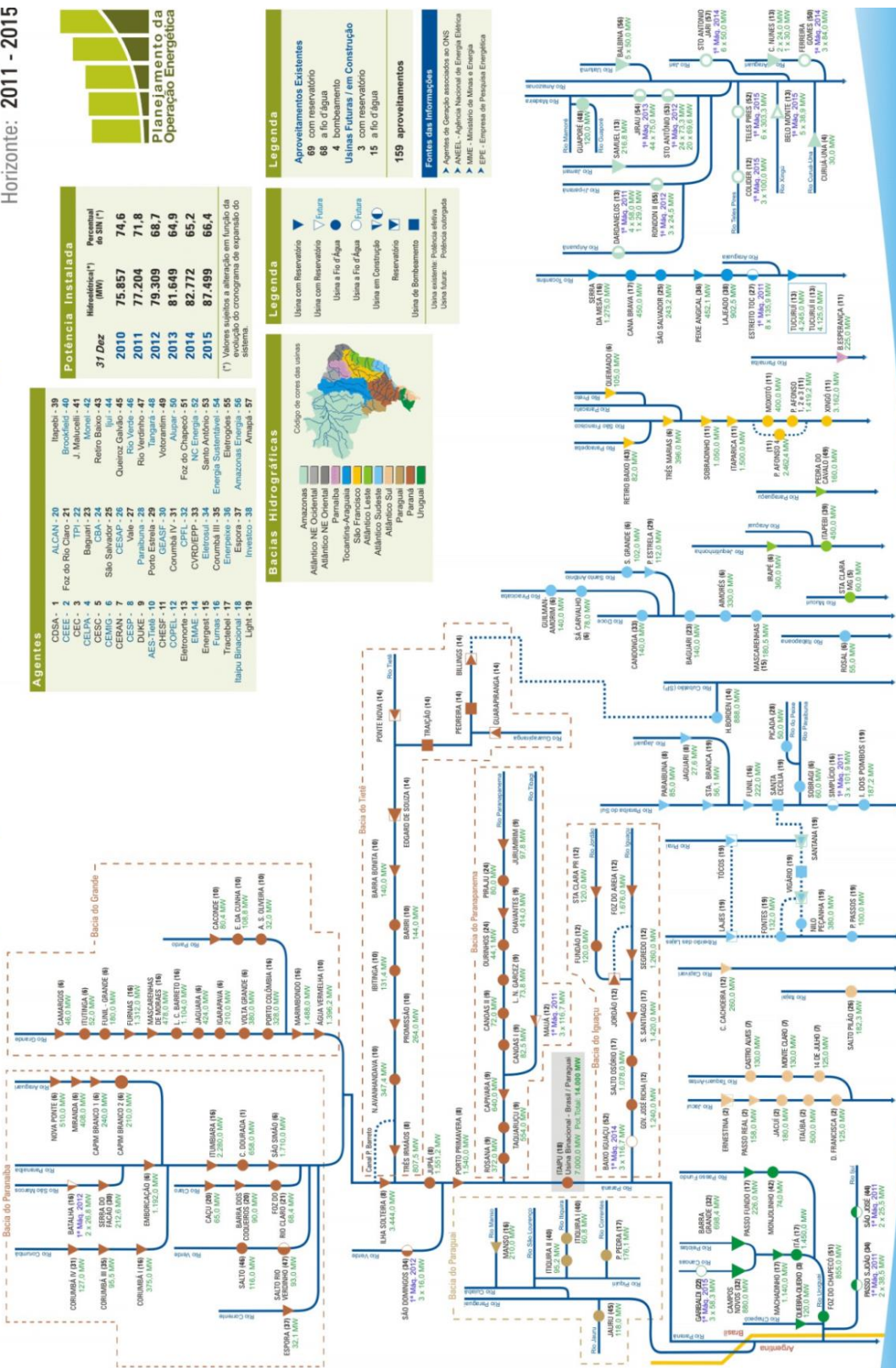
os reservatórios do sudeste atingem seus volumes mínimos após setembro. Todavia, a região Sul tem um regime de chuvas mais uniforme e tipicamente ocorrem chuvas abundantes em setembro, dessa forma a região Sul exporta energia para o sudeste entre agosto e dezembro. Esse exemplo de transferência energética regional se estende para as transferências entre Sudeste-Norte, Sudeste-Nordeste e Norte-Nordeste.

A complexidade do SIN é ilustrada na FIGURA 4, que mostra, de forma esquemática, o conjunto de bacias e a configuração dos aproveitamentos hidrelétricos do SIN. Note que a Bacia do Paraná abrange as regiões Sul e Sudeste/Centro-Oeste. A Bacia do São Francisco também abrange duas regiões, uma vez que o alto São Francisco está na região Sudeste e o médio e baixo São Francisco estão na região Nordeste. A Bacia do Tocantins corresponde à região Norte.

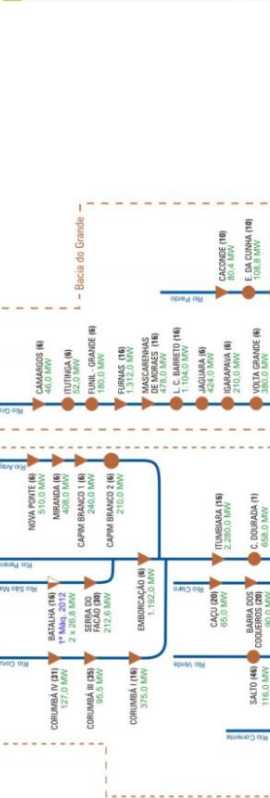
Diagrama Esquemático das Usinas Hidroelétricas do SIN

Usinas Hidroelétricas Despachadas pelo ONS na Otimização da Operação Eletroenergética do Sistema Interligado Nacional

Horizonte: 2011 - 2015



Agentes	Alcance	Instalada	Porcentual de SIN (%)
CRSA - 1	ALCAN - 20	Itaipu - 30	74,6
CEC - 2	Foz do Rio Claro - 22	Brookfield - 40	71,8
CELPA - 3	J. Malucelli - 41	Movel - 41	68,7
CESC - 4	Biguari - 23	Reiro Baixo - 43	64,9
CERAN - 5	São Sebastião - 25	Quenzes Galvão - 45	65,2
CESP - 6	Vale - 27	Rio Verde - 46	66,4
DUKE - 7	Parabubim - 28	Rio Verde - 47	67,2
AES Tietê - 8	Porto Estrela - 29	Tangará - 48	68,7
COPEL - 9	Volta Redonda - 30	Volta Redonda - 49	69,9
Eletronorte - 10	Corumbá IV - 31	Foz do Chapeco - 51	71,8
EMAE - 11	CPFL - 32	NC Antonio - 52	74,6
Energipet - 12	Elétronal - 33	Santo Antonio - 53	77,2
Tractebel - 13	Enel - 34	Energia São Paulo - 54	79,9
Itaipu Binacional - 14	Espera - 35	Amazônicas Energia - 55	82,7
	Light - 19	Ampl - 57	85,2



Legenda

Usinas com Reservatório: Usinas sem Reservatório: Usinas a Fio d'Água: Usinas em Construção: Reservatório: Usina de Bombamento:

Legenda

Usinas Existentes: Usinas em Construção: Usinas a Fio d'Água: Usinas em Construção: Reservatório: Usina de Bombamento:

Fonte das Informações

- Agência de Planejamento e Desenvolvimento Energético (ANEEL)
- MME - Ministério de Minas e Energia
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FIGURA 4- ESQUEMA UNIFILAR DAS BACIAS DO SIN
 FONTE: ONS (2013a)

2.2 PREVISÃO DE VAZÃO MENSAL

2.2.1 Sistema atual de previsão de aflúências do ONS

O planejamento da operação de um sistema hidrotérmico de energia elétrica deve definir para cada instante a geração de cada usina de tal forma que a demanda seja atendida a um custo mínimo. Esse planejamento é feito no Brasil no âmbito do chamado Planejamento da Operação do Sistema Interligado, executado atualmente no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (MACEIRA, COSTA E DAMAZIO, 2007).

O ONS elabora rotineiramente previsões de vazões naturais afluentes a todos os aproveitamentos do SIN. Vazões naturais afluentes a um determinado aproveitamento são aquelas que ocorreriam em uma seção do rio caso não houvesse a operação de reservatórios a montante, nem a vazão evaporada pelos lagos artificiais, nem mesmo retiradas de água consumidas com abastecimento e irrigação a montante. Em síntese, são as vazões providas pela própria natureza.

A previsão de vazões tem como objetivo subsidiar a tomada de decisão para o planejamento e a operação eletro energética, no âmbito do Programa Mensal de Operação (PMO) e de suas revisões semanais, bem como promover o despacho centralizado das usinas de forma otimizada (ONS, 2013a).

Para o PMO e suas revisões, são previstas vazões diárias para o fechamento da semana em curso e vazões semanais para o restante do mês, para a todos os aproveitamentos hidroelétricos do SIN. As previsões para a primeira semana à frente são obtidas para um conjunto de bacias com o uso de modelos que utilizam previsão de chuva: modelo SMAP para os aproveitamentos da Bacia do Rio Grande até Porto Colômbia e para todos os aproveitamentos da Bacia do Rio Paranapanema; modelo MGB-IPH para a Bacia do Rio Paranaíba, no trecho entre a UHE Itumbiara e a UHE São Simão; modelo SMAP-MEL para a previsão de aflúências incrementais à Itaipu no Rio Paraná; modelo FUZZY para os aproveitamentos da Bacia do Rio Iguaçu; modelo MPCV para a Bacia do Rio Uruguai; modelo NEURO3M para previsão ao aproveitamento de Três Marias no Rio São Francisco. Para o trecho incremental entre as usinas de Três Marias e Sobradinho, os resultados são obtidos com uso do modelo de propagação CPINS

para as duas primeiras semanas à frente. Em todos os demais casos, as previsões são obtidas utilizando o modelo estocástico PREVIVAZ (ONS, 2013a).

No modelo PREVIVAZ, os algoritmos de previsão, definidos por um modelo, método de estimação específico e transformação da série de vazões, são testados por um esquema robusto de validação cruzada, onde cada série é dividida em duas partes. Inicialmente, apenas a primeira parte da série é utilizada para a estimação dos parâmetros (estimação) e a segunda parte apenas para o cálculo de erros de previsão (verificação). Em seguida, a estimação dos parâmetros passa a ser feita com a segunda parte da série, ficando a primeira parte apenas para cálculo de erros de previsão. Para cada parte da série é computado o erro padrão de previsão (raiz quadrada da média dos quadrados dos erros de previsão - EQM) um passo à frente obtendo-se, a seguir, a média dos dois valores. O modelo PREVIVAZ utiliza a cada semana o algoritmo de previsão de menor erro médio quadrático de previsão um passo a frente (MACEIRA, COSTA E DAMAZIO, 2007); chuva, prevista ou observada, não é usada no procedimento da previsão.

O planejamento da operação do sistema hidrotérmico interligado brasileiro, SIN, devido à sua complexidade, é atualmente feito em etapas com o auxílio da cadeia de modelos desenvolvidos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Em cada etapa, os modelos utilizados possuem diferentes horizontes de planejamento, discretização do tempo e graus de detalhamento em suas representações, em particular das afluências hidrológicas futuras (MACEIRA, COSTA E DAMAZIO, 2007). A TABELA 1 apresenta as características dos modelos energéticos e hidrológicos desta cadeia.

TABELA 1– CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS ENERGÉTICOS E HIDROLÓGICOS

ETAPA	MÉDIO PRAZO	CURTO PRAZO	PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO
Modelo Hidrológico	GEVAZP	PREVIVAZ/GEVAZP	PREVIVAZH
Modelo de Otimização	NEWAVE	DECOMP	DESSEM
Horizonte de Planejamento	Até 10 anos	Até 1 ano	Até 14 dias
Discretização Temporal	Mensal	Semanal/Mensal	Horária/patamares
Afluências Hidrológicas	Estocástico	Determinístico/Estocástico	Determinístico

FONTE: Maceira, Costa e Damazio (2007)

A FIGURA 5 apresenta a interação entre os modelos hidrológicos e a

cadeia de planejamento da operação do SIN.

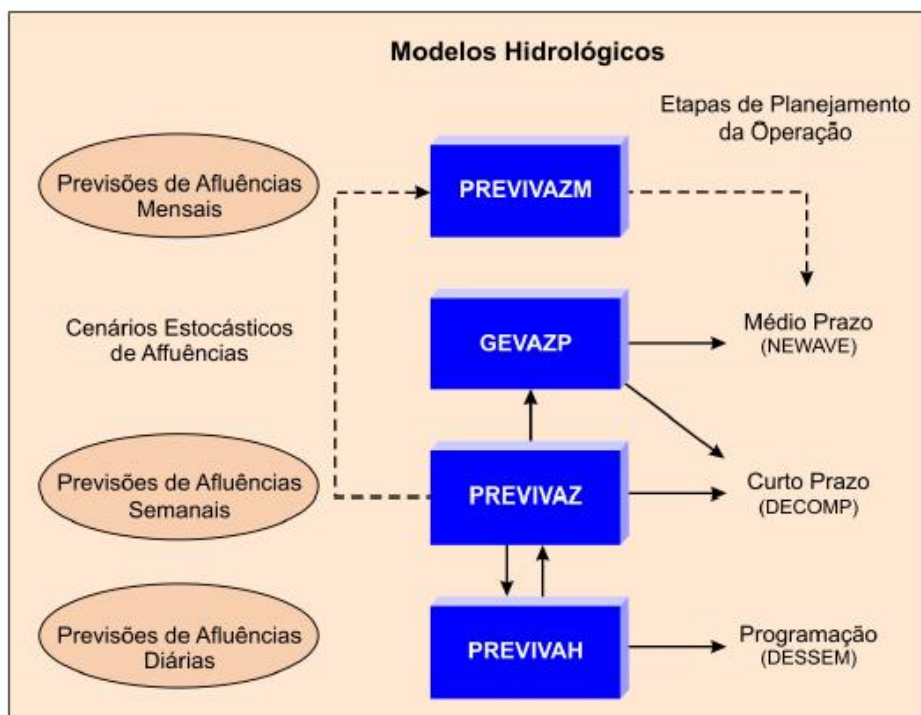


FIGURA 5- INTERAÇÃO ENTRE OS MODELOS HIDROLÓGICOS E A CADEIA DE PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DO SIN

FONTE: Maceira, Costa e Damazio (2007)

As alternativas do ONS para promover avanços no sistema atual de previsões de vazões são:

- 1) Implementação de modelos conceituais (físicos), que contemplam a transformação de chuva em vazão e a propagação de vazões em rios e reservatórios, com a utilização de chuva observada e prevista como dados de entrada;
- 2) Implementação de modelos empíricos, baseados em técnicas de hidrologia estocástica, de redes neurais, de sistemas especialistas e de inteligência artificial.

2.2.2 Modelo hidrológico chuva-vazão

Guetter, Krauskopf e Mine (2007) descreveram o modelo hidrológico 3R

aplicado com resolução temporal diária. Bettinardi (2011) e Dalledonne (2011) aplicaram o modelo 3R, com resolução mensal, para produzir as previsões de vazão em vários aproveitamentos nas regiões Sudeste, Sul, Nordeste e Norte do Brasil.

O modelo 3R é uma adaptação do modelo de Sacramento (BURNASH *et al.*, 1973). No modelo Sacramento, o solo é dividido em duas camadas, a superior e a inferior, sendo que cada uma apresenta subcamadas modeladas por reservatórios não lineares. O modelo 3R representa o armazenamento da água no solo em duas camadas, cada qual representada por um reservatório não linear, que simulam os escoamentos superficial, sub-superficial e de base. A propagação da vazão no canal natural do rio é modelada através de uma cascata de reservatórios não lineares. O modelo 3R é indicado para aplicação em grandes bacias (áreas maiores que 2000 km²) e resolução temporal mínima de algumas horas, que é o caso da maior parte das bacias do SIN.

2.3 PREVISÃO DE CHUVA SAZONAL DO PROJETO EUROBRISA

O EUROBRISA (A **EURO-BR**azilian research network for **Improving South American seasonal climate forecasts**) é um programa de pesquisa do qual fazem parte parceiros brasileiros e europeus, cujo objetivo geral é aprimorar a qualidade das previsões sazonais da região da América do Sul (CPTEC, 2013). Nesse sentido, o EUROBRISA busca:

- 1) Fortalecer a colaboração e promover o intercâmbio de conhecimentos e informações entre os pesquisadores climáticos sul-americanos e europeus;
- 2) Produzir melhores previsões climáticas sazonais para a América do Sul, utilizando recentes avanços científicos na modelagem acoplada oceano-atmosfera e também na calibração e combinação estatística de um conjunto de modelos de previsão;
- 3) Desenvolver para uso governamental da América do Sul produtos de previsão sem fins lucrativos, auxiliando em questões importantes como: operação de reservatórios, produção de energia hidráulica, agricultura e saúde.

As instituições envolvidas no projeto EUROBRISA são:

- 1) *University of Exeter* (UE), U.K.;
- 2) Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Brasil;
- 3) *European Centre for Medium-range Weather Forecasts* (ECMWF), U.K.;
- 4) *U.K. Met Office* (UKMO), Exeter, U.K.;
- 5) *Météo-France* (MF), Toulouse, France;
- 6) Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil;
- 7) Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Brasil;
- 8) Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil.

Os produtos do projeto EUROBRISA podem ser visualizados em mapas disponíveis no *website* do CPTEC (2013), onde os produtos de previsão e verificação estão disponíveis para os seguintes modelos climáticos:

- 1) Modelo dinâmico acoplado oceano-atmosfera ECMWF-System 4 (ANDERSON *et al.*, 2007; STOCKDALE *et al.*, 2011);
- 2) Modelo dinâmico acoplado oceano-atmosfera UKMO GloSea 4 do *UK Met Office* (ARRIBAS *et al.*, 2011);
- 3) Modelo dinâmico acoplado oceano-atmosfera da *Meteo-France* (GUEREMY *et al.*, 2005);
- 4) Modelo dinâmico acoplado oceano-atmosfera do CPTEC (NOBRE *et al.*, 2012);
- 5) Modelo empírico, que usa as temperaturas da superfície dos oceanos Atlântico e Pacífico como variáveis de predição da precipitação sobre a América do Sul (COELHO *et al.*, 2006);
- 6) Modelo integrado, que combina e calibra os modelos dinâmicos acoplados com o modelo empírico (COELHO *et al.*, 2006).

Os modelos climáticos citados acima correspondem à versão do sistema EUROBRISA de março de 2012, o qual forneceu uma base de dados de previsão

referente ao período histórico de 1981-2005. Recentemente, em julho de 2013, o sistema EUROBRISA sofreu uma atualização de seus modelos climáticos, além da base de dados disponível ter sido estendida para 1981-2010. Entretanto, como nessa atualização foi suprimido o Modelo dinâmico acoplado do CPTEC, optou-se nesta dissertação pela versão anterior do sistema, por ser mais indicada para pesquisas e estudos.

2.3.1 Produtos de previsão

A previsão climática do EUROBRISA é trimestral, ou seja, uma previsão realizada em Fevereiro de 2013 é válida para o trimestre seguinte Março-Abril-Maio (MAM) de 2013.

No *website* do CPTEC (2013) são atualizados mensalmente os produtos experimentais de previsão do EUROBRISA para cada um dos modelos que compõem o sistema, incluindo a previsão integrada. A previsão integrada combina e calibra as previsões dos modelos climáticos dinâmicos e do modelo empírico, juntamente com os índices de acerto desses vários modelos para produzir uma previsão de chuva sazonal expressa em termos da média e desvio padrão da previsão (COELHO *et al.*, 2006). Estas médias e desvios padrão são processados para apresentar mapas com estatísticas da chuva sazonal prevista, as quais são resumidas nos parágrafos seguintes.

O produto de previsão “anomalia prevista média” é uma estimativa da localização central da distribuição probabilística da previsão. O termo “anomalia prevista” refere-se à diferença entre a informação prevista do período de interesse e a informação prevista média de longo período, logo essa previsão indica a distribuição espacial dos locais com chuvas acima (anomalia positiva) ou abaixo (anomalia negativa) da média sazonal prevista.

Anomalias previstas médias positivas são representadas em azul e anomalias negativas pelas cores variando entre amarela, laranja e vermelha, como pode ser visto na FIGURA 6 para a previsão do modelo integrado.

Pode-se perceber, pela FIGURA 6, que para o trimestre fevereiro-março-abril de 2012, foi previsto um período chuvoso para parte dos estados da região nordeste (e.g. Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí), enquanto que para a região sul

(e.g. Paraná, Santa Catarina) foi previsto um período com chuvas abaixo da média sazonal observada.

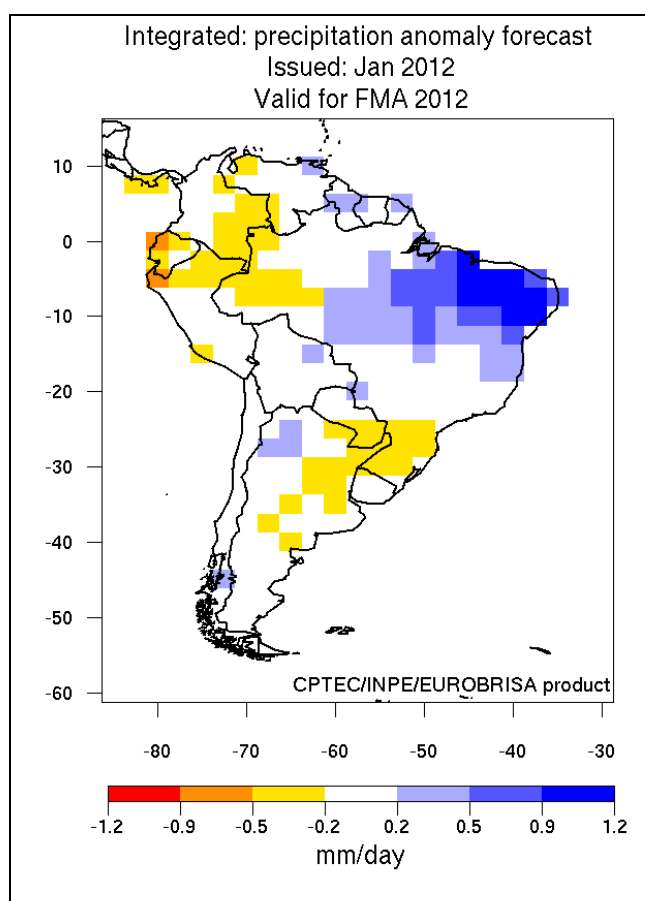


FIGURA 6- ANOMALIA MÉDIA DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA PARA O PRODUTO INTEGRADO
FONTE: CPTec (2013)

Os mapas da FIGURA 7 permitem comparar a anomalia prevista média para todos os modelos que integram o EUROBRISA, os quais, neste exemplo, apresentaram diferenças significativas.

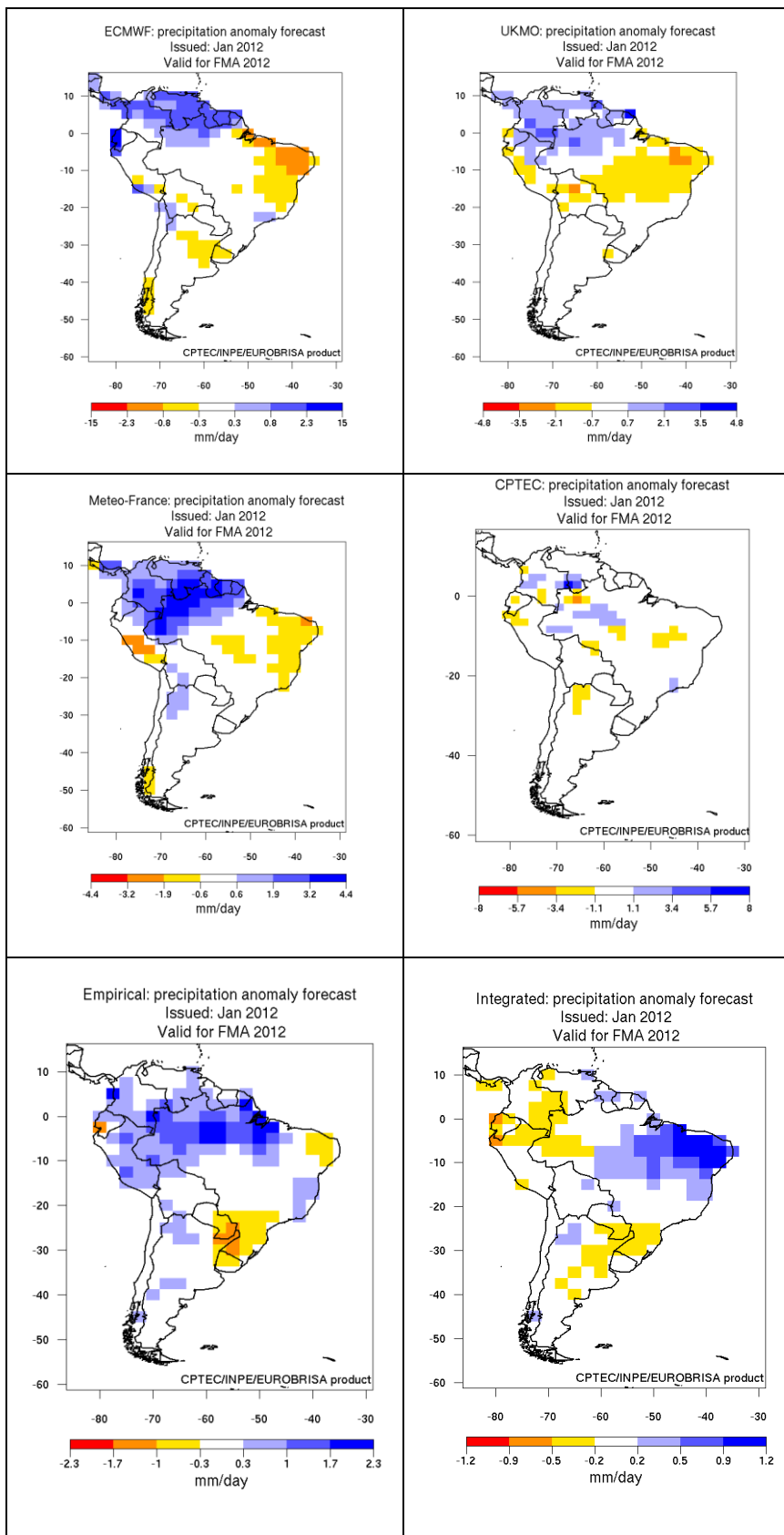


FIGURA 7- ANOMALIA MÉDIA DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA PARA OS MODELOS QUE INTEGRAM O EUROBRISA
FONTE: CPTEC (2013)

O produto de previsão “probabilidade do tercil mais provável” apresenta a distribuição espacial da previsão de chuva sazonal em termos do tercil inferior, tercil central e tercil superior, os quais são definidos usando a chuva sazonal observada estimada pelo GPCP. O mapa da FIGURA 8 ilustra a probabilidade do tercil mais provável, onde as tonalidades de azul indicam maiores probabilidades que a chuva prevista esteja no tercil superior (mais chuvoso que as condições normais), enquanto que as tonalidades de vermelho, laranja e amarelo indicam maiores probabilidades de que a chuva prevista esteja no tercil inferior (mais seco do que as condições normais). A cor branca indica que a chuva prevista ficará no tercil central (condições normais).

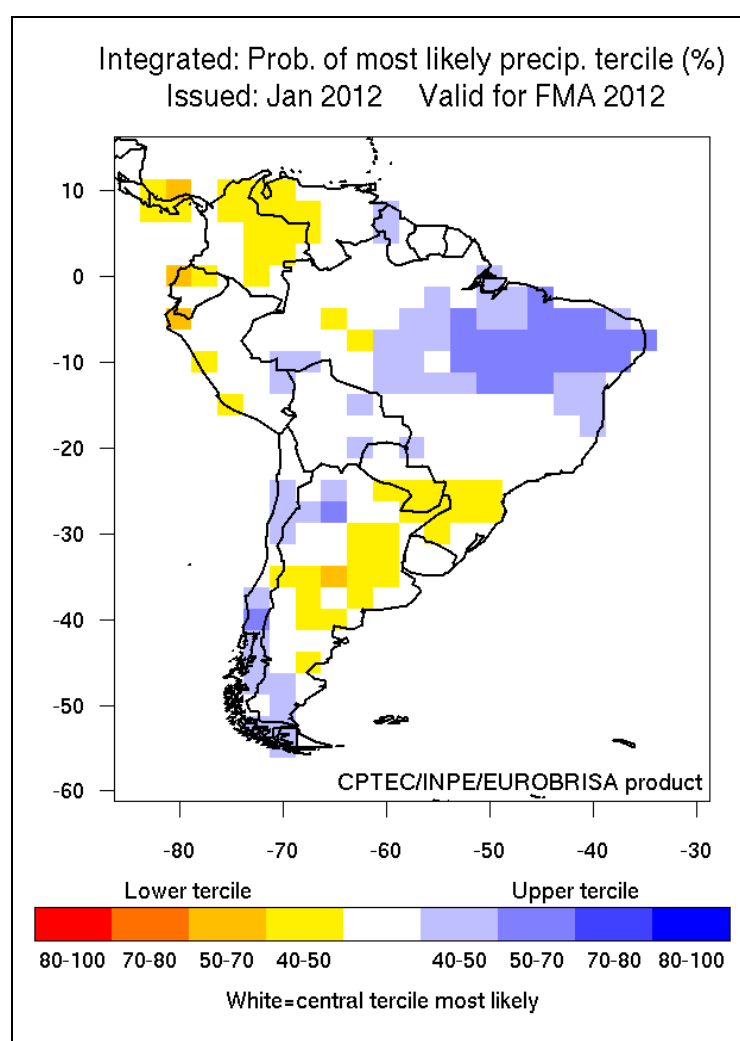


FIGURA 8- PROBABILIDADE DO TERCIL MAIS PROVÁVEL PARA A PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO INTEGRADO
FONTE: CPTEC (2013)

O produto “previsão categórica” ilustra a variabilidade espacial da chuva sazonal prevista em função da magnitude das probabilidades que a chuva sazonal prevista esteja nos tercils inferior (B), central (N) e superior (A). As cinco categorias foram definidas segundo os critérios abaixo:

- 1) Seco: representado pela cor vermelha, ocorre quando $A < 33,3\%$, $N < 33,3\%$ e $B > 40\%$, indicando maior probabilidade para o tercil inferior (mais seco do que as condições normais);
- 2) Seco ou Médio: em laranja, ocorre quando $B > 40\%$ e $N > 33,3\%$, ou $B > 33,3\%$ e $N > 40\%$, indicando maior probabilidade para os tercils inferior e central (mais seco do que o normal ou condições normais);
- 3) Médio: representado pela cor branca, ocorre quando $A < 33,3\%$, $N > 40\%$ e $B < 33,3\%$, ou seja, quando há maior probabilidade para o tercil central (condições normais);
- 4) Úmido ou médio: representado em azul claro, ocorre quando $A > 40\%$ e $N > 33,3\%$ ou $A > 33,3\%$ e $N > 40\%$, indicando maior probabilidade para os tercils superior e central (mais chuvoso que o normal ou condições normais);
- 5) Úmido: em azul escuro, ocorre quando $A > 40\%$, $N < 33,3\%$ e $B < 33,3\%$, indicando maior probabilidade para o tercil superior (mais chuvoso do que as condições normais).

O mapa da FIGURA 9 ilustra a previsão categórica de chuva do modelo integrado para a América do Sul.

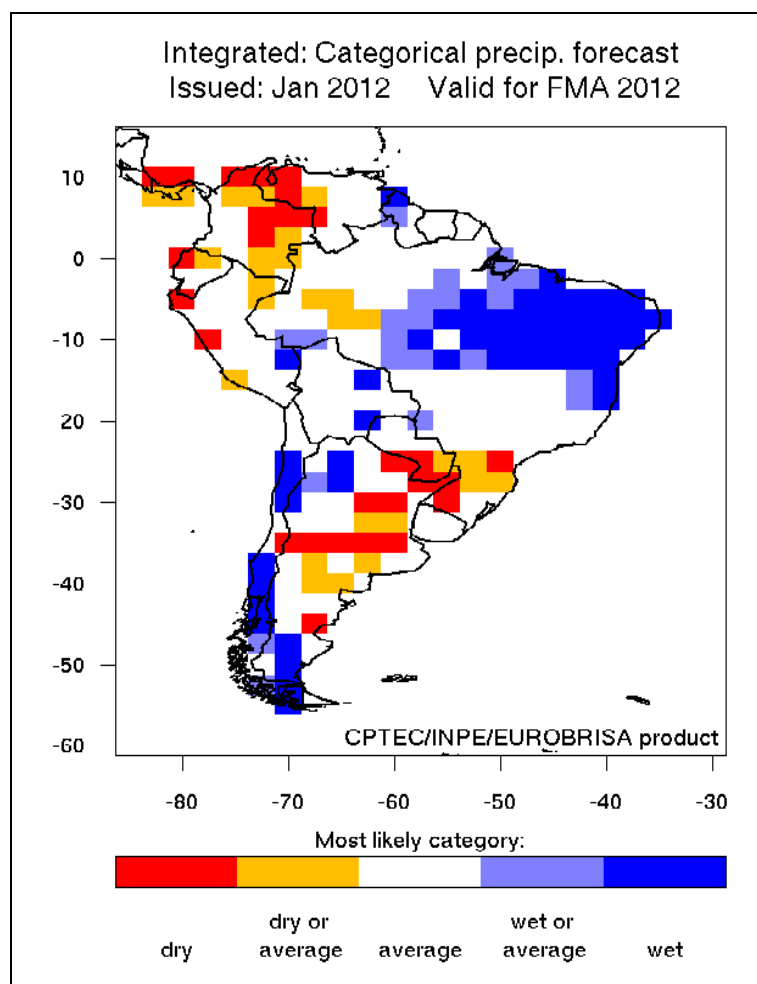


FIGURA 9- PREVISÃO CATEGÓRICA DO MODELO INTEGRADO, VARIANDO ENTRE SECO E ÚMIDO
 FONTE: CPTEC (2013)

O produto de previsão “probabilidade da média superior” mostra a distribuição espacial dos locais com probabilidade da chuva estar acima das condições médias (*i.e.* probabilidade de anomalia positiva). A FIGURA 10 ilustra esse produto, onde:

- 1) Cor azul: mostra as regiões com probabilidade superior a 60% de que a chuva esteja acima da média (*i.e.* maior probabilidade de período chuvoso);
- 2) Cores laranja e amarelo: mostra as regiões com probabilidade inferior a 40% de que a chuva esteja acima da média (*i.e.* maior probabilidade de período seco);
- 3) Cor branca: mostra as regiões com probabilidade entre 40% e 60% de

que a chuva esteja acima da média (*i.e.* previsão probabilística balanceada entre os extremos seco e chuvoso).

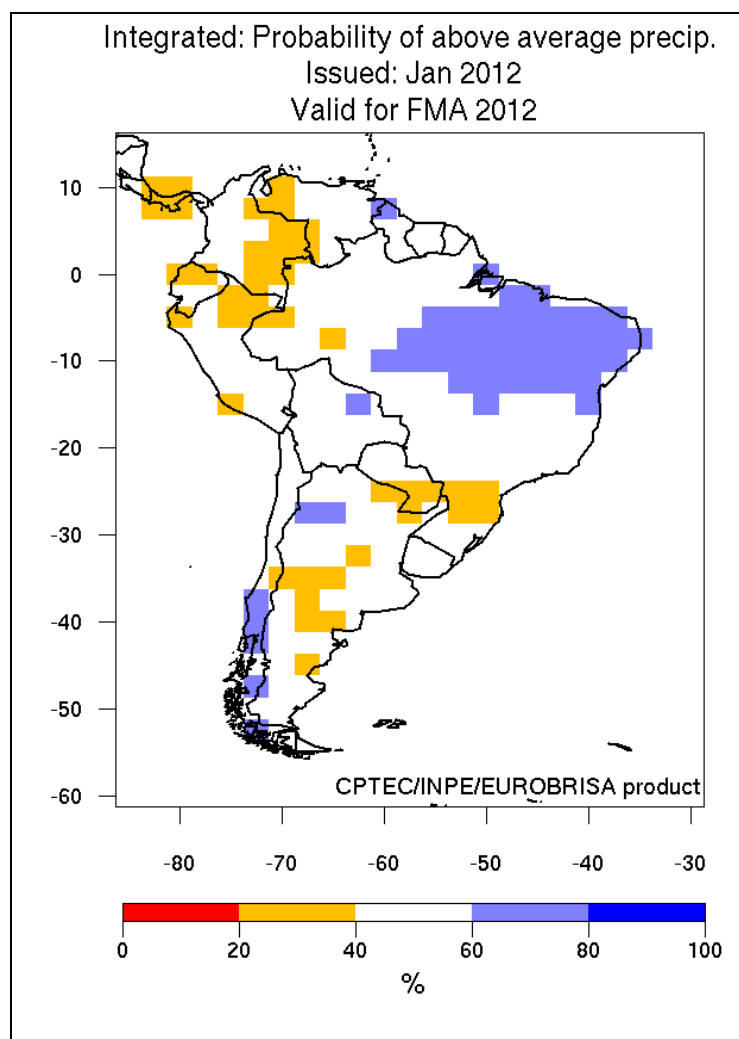


FIGURA 10- PROBABILIDADE DE QUE A CHUVA ESTEJA ACIMA DA MÉDIA
 FONTE: CPTEC (2013)

O produto de previsão “probabilidade do tercil inferior” mostra a distribuição espacial dos locais que terão uma estação mais seca. A FIGURA 11 ilustra esse produto, onde:

- 1) Cores vermelha, laranja e amarela: mostra as regiões com probabilidade superiores a 40% de que a chuva esteja no tercil inferior (*i.e.* maior probabilidade de período seco);
- 2) Cor azul: mostra as regiões com probabilidade inferior a 20% de que a chuva esteja no tercil inferior (*i.e.* maior probabilidade de período

chuvoso);

- 3) Cor branca: mostra as regiões com probabilidade entre 20% e 40% de que a chuva esteja no tercil inferior;

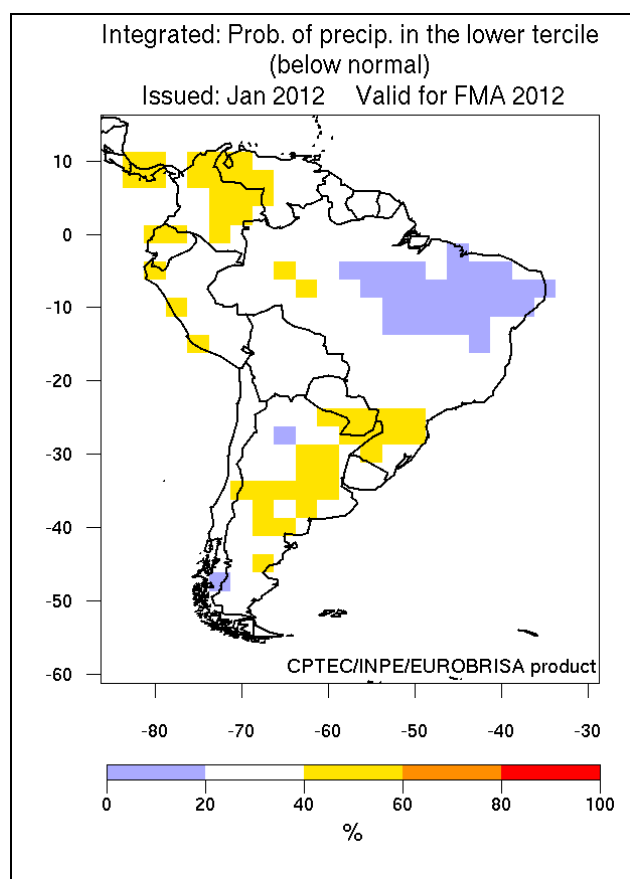


FIGURA 11- PROBABILIDADE DA CHUVA NO TERCIL INFERIOR
FONTE: CPTEC (2013)

O produto “probabilidade do tercil superior” mostra a distribuição espacial dos locais que terão uma estação mais chuvosa. A FIGURA 12 ilustra esse produto, onde:

- 1) Cor vermelha, laranja e amarela: mostra as regiões com probabilidade superiores a 40% de que a chuva esteja no tercil superior (*i.e.* maior probabilidade de período chuvoso);
- 2) Cor azul: mostra as regiões com probabilidade inferior a 20% de que a chuva esteja no tercil superior (*i.e.* maior probabilidade de período seco).

- 3) Cor branca: mostra as regiões com probabilidade entre 20% e 40% de que a chuva esteja no tercil superior;

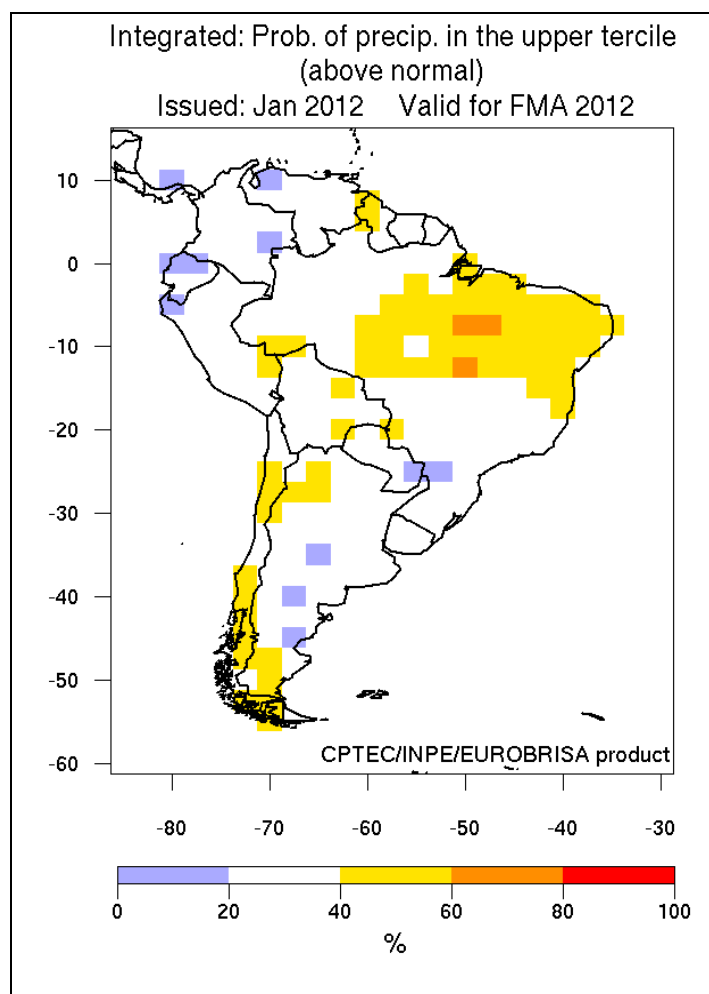


FIGURA 12- PROBABILIDADE DA CHUVA NO TERCIL SUPERIOR
 FONTE: CPTEC (2013a)

O produto “probabilidade do quintil inferior” mostra as regiões que terão uma estação extremamente seca, quantificada pelo quintil inferior da chuva. A FIGURA 13 ilustra esse produto, onde:

- 1) Cores vermelha, laranja e amarela: mostra as regiões com probabilidade superiores a 25% de que a chuva esteja no quintil inferior (*i.e.* maior probabilidade de período extremamente seco);
- 2) Cor azul: mostra as regiões com probabilidade inferior a 5% de que a chuva esteja no quintil inferior (*i.e.* maior probabilidade de período

extremamente chuvoso);

- 3) Cor branca: mostra as regiões com probabilidade entre 5% e 25% de que a chuva esteja no quintil inferior.

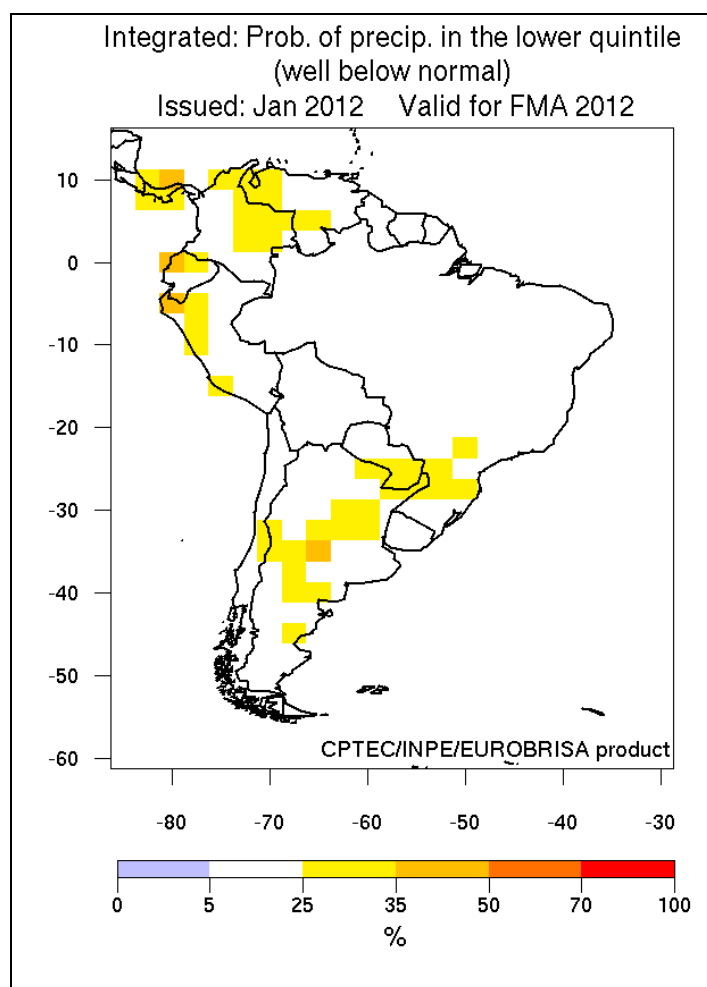


FIGURA 13- PROBABILIDADE DO QUINTIL INFERIOR
FONTE: CPTEC (2013)

O produto “probabilidade do quintil superior” mostra as regiões que terão uma estação extremamente chuvosa, quantificada pelo quintil superior da chuva. A FIGURA 14 ilustra esse produto, onde:

- 1) Cores vermelha, laranja e amarela: mostra as regiões com probabilidade superiores a 25% de que a chuva esteja no quintil superior (*i.e.* maior probabilidade de período extremamente chuvoso);
- 2) Cor azul: mostra as regiões com probabilidade inferior a 5% de que a

chuva esteja no quintil superior (*i.e.* maior probabilidade de período extremamente seco);

- 3) Cor branca: mostra as regiões com probabilidade entre 5% e 25% de que a chuva esteja no quintil inferior.

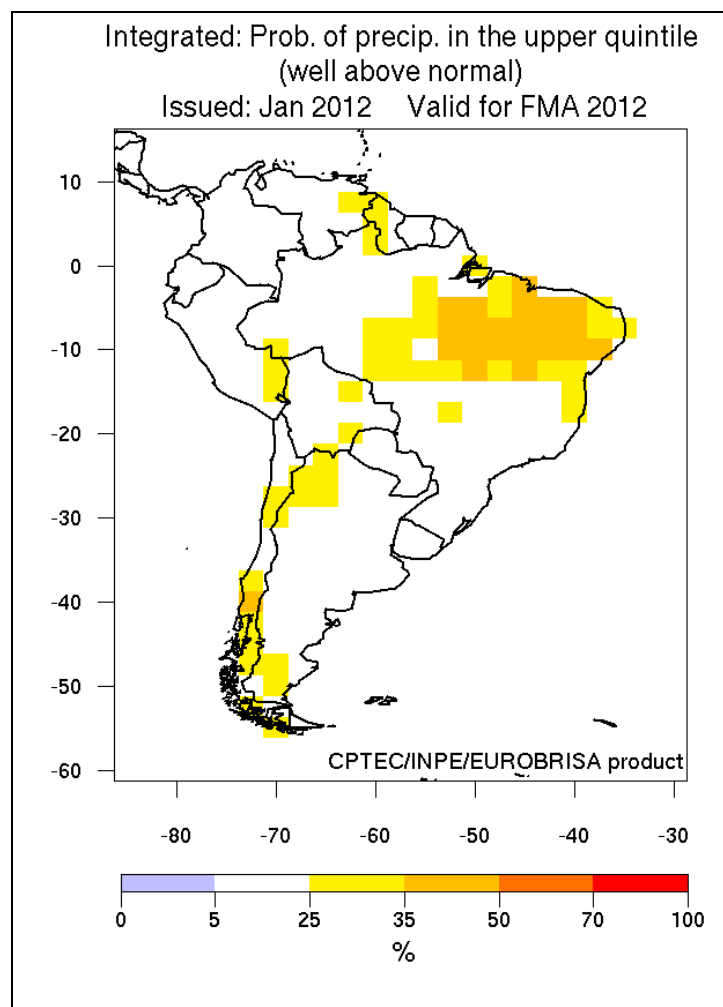


FIGURA 14- PROBABILIDADE DA CHUVA NO QUINTIL SUPERIOR
FONTE: CPTEC (2013)

2.3.2 Produtos de Verificação

Os produtos de verificação do acerto das previsões de chuva sazonal do projeto EUROBRISA podem ser visualizados também no *website* do CPTEC (2013). Esses produtos de verificação foram desenvolvidos usando como base de dados de referência a chuva observada fornecida pelo GPCP (seção 3.2.1.2).

Os modelos climáticos ECMWF-System4, Meteo-France e Empírico foram

verificados usando as previsões retrospectivas (*hindcasts*) cobrindo o período de 1987-2001, enquanto que o modelo Uk Met Office GloSea4 foi verificado de 1996 a 2009, e o modelo Integrado de 1981 a 2005. Nas seções seguintes são apresentados resumidamente os produtos de verificação, os quais estão descritos com mais detalhe em Jolliffe e Stephenson (2003).

Todos os mapas de verificação que ilustram a variabilidade espacial dos índices de acerto usam uma escala comum que varia de -1 a 1, e são identificados pelas seguintes cores:

- 1) Amarela, laranja e vermelha (valores positivos): indicando que a previsão seguiu a mesma tendência da chuva observada, isto é, previu mais chuva onde ocorreu mais chuva;
- 2) Azul claro a azul escuro (valores negativos): indicando que a previsão seguiu tendência oposta a da chuva observada, isto é, previu mais chuva onde ocorreu menos chuva ou vice-versa;
- 3) Cor branca: indica baixo índice de acerto, ou seja, se a previsão foi de mais chuva, observou-se, com igual probabilidade, mais chuva, chuva normal e menos chuva.

2.3.2.1 Correlação

Relaciona a correlação linear entre a anomalia prevista e a observada. Devido às suas propriedades de invariância, o coeficiente de correlação é considerado o “rei de todos os índices” em diversas ciências de previsão, e em particular a de previsão de clima e tempo (JOLLIFE E STEPHENSON, 2003). Também conhecido como correlação de Pearson, é definido como:

$$\rho = \frac{\text{cov}(x, \hat{x})}{\sqrt{\text{var}(x) \times \text{var}(\hat{x})}} \quad (1)$$

Onde: $\text{cov}(x, \hat{x})$ = covariância entre as previsões e as observações; $\text{var}(x)$ = $\text{cov}(x, x)$; $\text{var}(\hat{x})$ = $\text{cov}(\hat{x}, \hat{x})$;

A covariância pode ser estimada através das observações e previsões

passadas, como mostra a estatística amostral expressa na EQUAÇÃO (2):

$$\text{cov}(x, \hat{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}_i)(\hat{x}_i - \bar{\hat{x}}_i)] \quad (2)$$

Onde: $\text{cov}(x, \hat{x})$ = covariância entre as previsões e as observações; n = número de observações/previsões; x_i = variável observada; \bar{x}_i = média das variáveis observadas; \hat{x}_i = variável prevista; $\bar{\hat{x}}_i$ = média das variáveis previstas.

A FIGURA 15 exemplifica a distribuição espacial do coeficiente de correlação entre as anomalias de chuva prevista pelo modelo Integrado e as anomalias de chuva observada para o trimestre fevereiro-março-abril (FMA), onde se pode constatar quais regiões da América do Sul o modelo acerta mais e onde ele acerta menos.

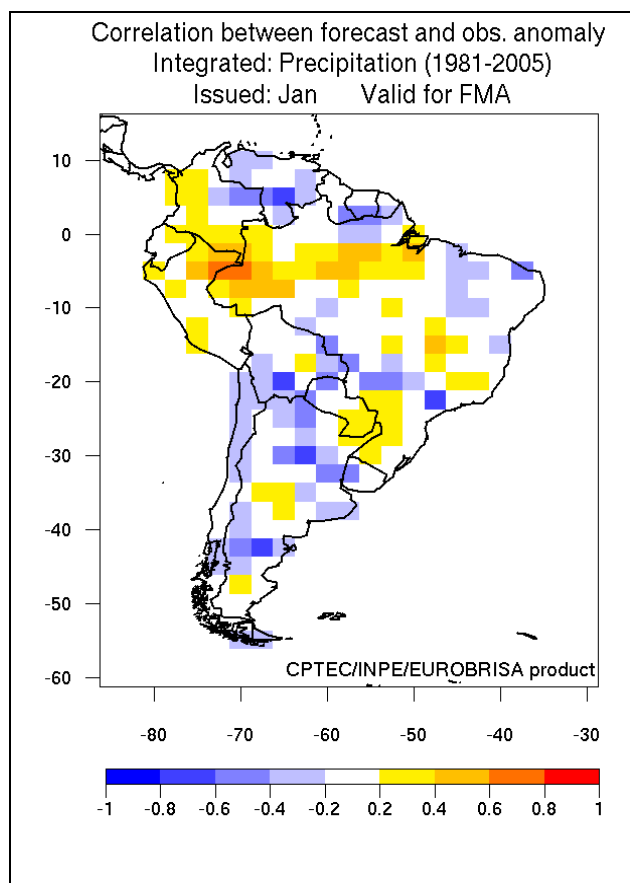


FIGURA 15- CORRELAÇÃO ENTRE A ANOMALIA DE CHUVA PREVISTA E A ANOMALIA DE CHUVA OBSERVADA

FONTE: CPTEC (2013)

Outros mapas de verificação do acerto da previsão de chuva (e.g. *Brier Skill Score*, *Ranked Probability Score*, *Gerrity Score*, *ROC Skill Score*), assim como diagramas de confiabilidade, podem ser acessados no *website* do CPTEC (2013) para todos os modelos climáticos do EUROBRISA.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na parte de materiais, são apresentados:

- 1) A área de estudo (Bacia do Rio Iguaçu) e a localização e características dos aproveitamentos hidrelétricos que serão estudados;
- 2) Os dados pluviométricos utilizados;
- 3) Os dados de previsão de chuva extraídos;
- 4) Os dados fluviométricos utilizados (vazão naturalizada mensal);
- 5) Os dados meteorológicos necessários para o cálculo da evapotranspiração.

Em relação aos métodos, são elucidados:

- 1) Algoritmo para reconstrução da chuva prevista a partir das previsões sazonais das anomalias e desvios padrão da chuva prevista do EUROBRISA e das estatísticas da chuva média na bacia obtida da análise dos pluviômetros;
- 2) Algoritmo para preenchimento de falhas e análise de consistência de dados pluviométricos;
- 3) Algoritmo para estimativa da evaporação de uma superfície líquida pelo método combinado (PENMAN, 1948);
- 4) Algoritmo para estimativa da evapotranspiração de referência (DOORENBOS E PRUITT, 1977);
- 5) Algoritmo para estimativa da evapotranspiração potencial para outros cultivos;
- 6) Algoritmo para análise de sensibilidade do coeficiente de cultivo;
- 7) O modelo hidrológico chuva-vazão-propagação 3R (GUETTER, KRAUSKOPF E MINE, 2007);

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Rio Iguaçu, ilustrada na

FIGURA 16, cujas principais usinas hidrelétricas estão listadas na TABELA 2.

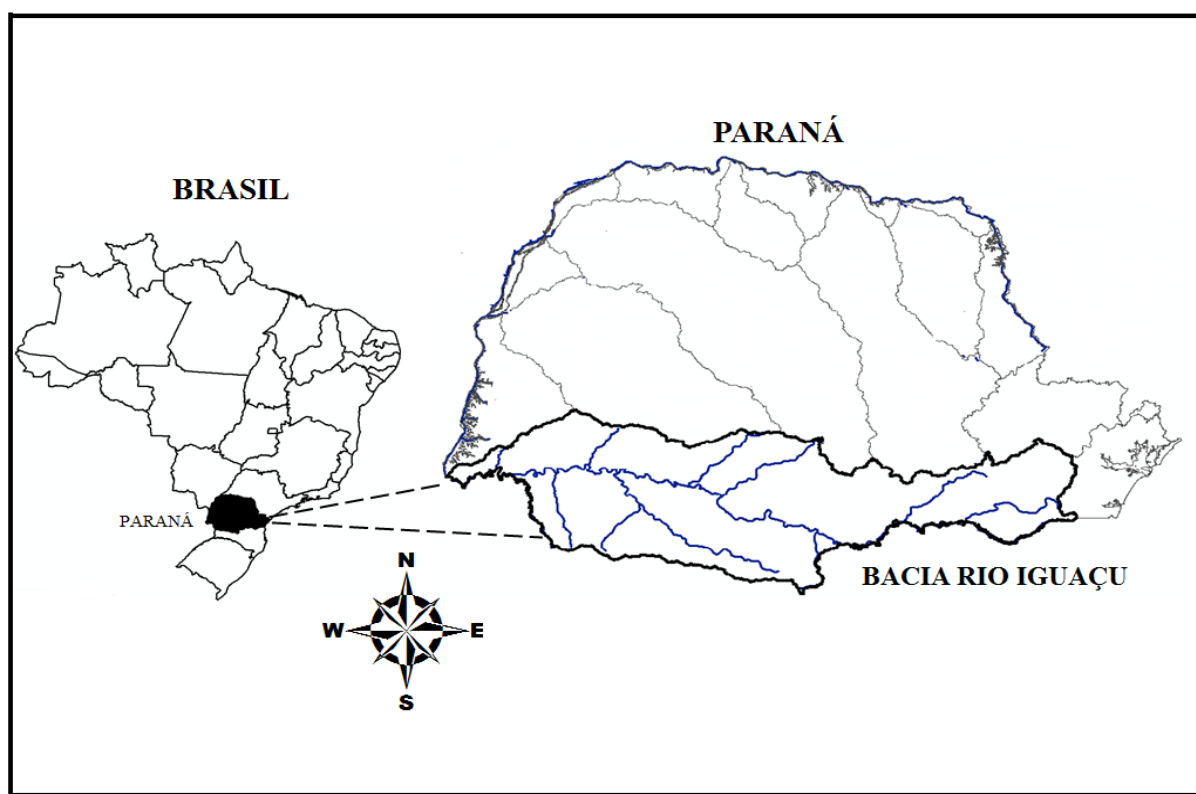


FIGURA 16- LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO IGUAÇU

FONTE: O autor (2013)

TABELA 2- ATRIBUTOS HIDROLÓGICOS E ENERGÉTICOS DAS GRANDES USINAS DO RIO IGUAÇU

USINA	EMPRESA	ÁREA DE DRENAGEM (km ²)	VOLUME ÚTIL (km ³)	VAZÃO MÉDIA DE LONGO TERMO (m ³ /s)	VAZÃO ESPECÍFICA (L.s ⁻¹ .km ⁻²)	POTÊNCIA INSTALADA (MW)
Foz do Areia	COPEL	29.900	3,804	640	21,40	1.676
Segredo	COPEL	34.100	0,384	737	21,61	1.260
Salto Santiago	GERASUL	43.900	4,113	946	21,55	1332
Salto Osório	GERASUL	45.800	0,420	996	21,75	1.075
Salto Caxias	COPEL	57.000	0,273	1260	22,10	1.240

FONTE: COPEL (1997)

A área de drenagem da TABELA 2 refere-se à área total da bacia hidrográfica até a usina hidrelétrica em questão. A FIGURA 17 mostra a localização dos grandes aproveitamentos hidrelétricos na Bacia do Rio Iguaçu.

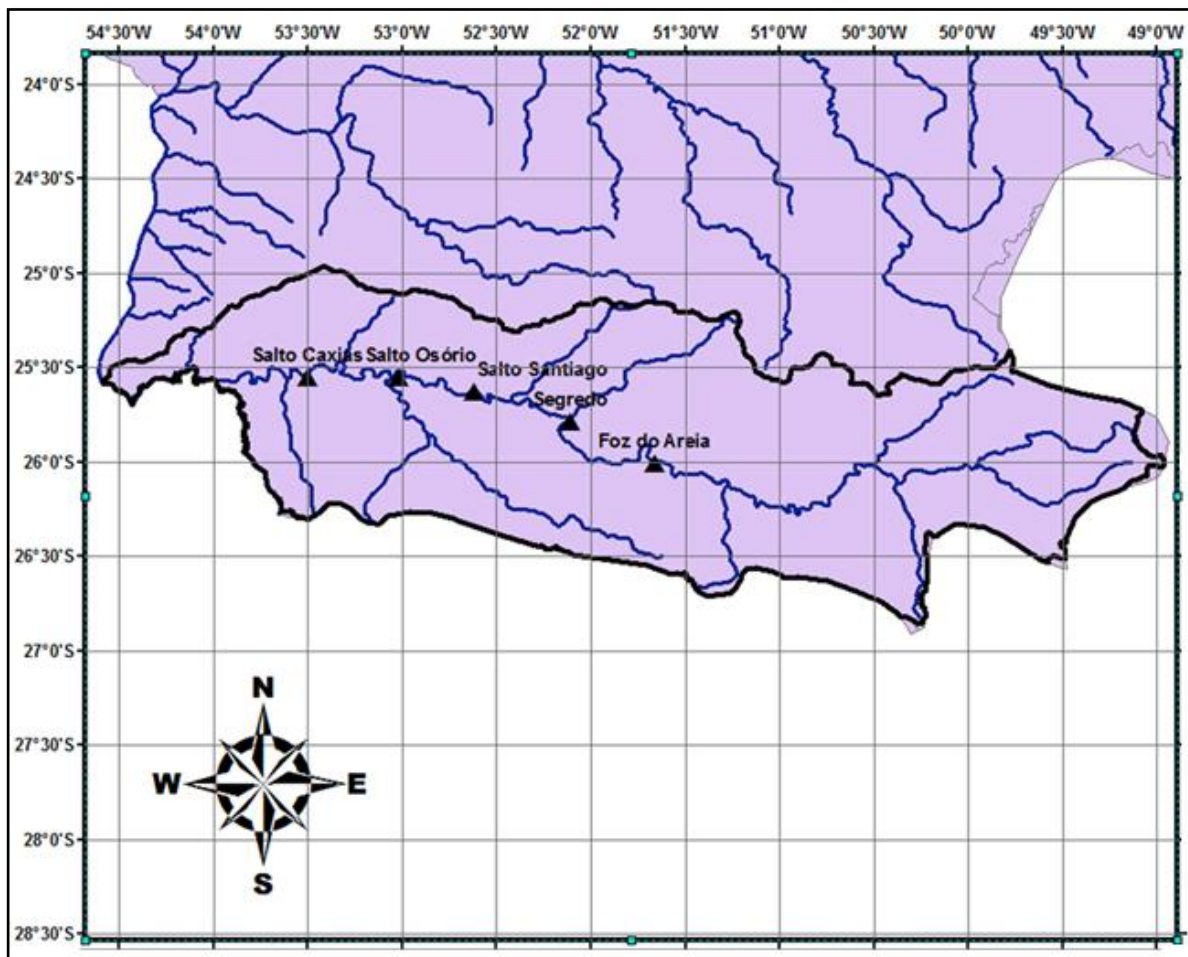


FIGURA 17– PRINCIPAIS USINAS HIDRELÉTRICAS DA BACIA DO RIO IGUAÇU
 FONTE: O autor (2013)

3.1.1 Hidrografia

Considerado o maior rio do Paraná, o Rio Iguazu é formado pelo encontro dos rios Irai e Atuba na parte Leste do município de Curitiba, na divisa com o município de Pinhais. O Rio Iguazu segue seu curso de 1320 km no sentido Leste-Oeste cruzando os três planaltos paranaenses até desaguar no Rio Paraná (SEMA, 2008).

Considerando a soma das áreas do Brasil e da Argentina, a Bacia do Rio Iguazu cobre uma superfície aproximada de 70.800 km², sendo que possui uma área total, dentro do Estado do Paraná, de 54.800 km², cerca de 28% da área total do estado. Ressalta-se que a Bacia do Iguazu está dividida nas seguintes Unidades Hidrográficas de Gestão de Recursos Hídricos, de acordo com a Resolução N^o

49/2006/CERH/PR: Baixo Iguaçu, Médio Iguaçu e Alto Iguaçu, como pode ser visto na FIGURA 18.



FIGURA 18– UNIDADES HIDROGRÁFICAS DA BACIA DO IGUAÇU
FONTE: SEMA (2008)

De acordo com a Resolução Nº 49/2006/CERH/PR, a subdivisão mostrada na FIGURA 18 foi realizada da seguinte forma:

- 1) Unidade Hidrográfica do Alto Iguaçu: Compreende toda a Bacia do Ribeira em território paranaense e a Bacia do Rio Iguaçu até imediatamente à jusante da confluência com o Rio Negro, no município de São Mateus do Sul.
- 2) Unidade Hidrográfica do Médio Iguaçu: Compreende a Bacia do Rio Iguaçu no trecho à jusante da confluência do Rio Iguaçu e Rio Negro, no município de São Mateus do Sul, até imediatamente à jusante da foz do Rio Jordão, no município de Foz do Jordão.
- 3) Unidade Hidrográfica do Baixo Iguaçu: Compreende a Bacia do Rio Iguaçu no trecho à jusante da foz do Rio Jordão, até a sua foz no Rio Paraná.

3.1.2 Clima

A classificação climática objetiva caracterizar, em uma grande área ou região, zonas com características climáticas e biogeográficas relativamente homogêneas. Para tanto, normalmente utilizam-se séries históricas de no mínimo 30 anos de informações, a fim de se evitar a influência de fenômenos sazonais sobre o conjunto de dados. Diversas são as metodologias propostas para a classificação climática, entretanto, uma das mais reconhecidas mundialmente é a proposta por Wilhelm Köppen (SMA-ABC, 2013). Os critérios da classificação estão descritos na TABELA 3:

TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE WILHELM KÖPPEN

1ª. LETRA - MAIÚSCULA, REPRESENTA A CARACTERÍSTICA GERAL DO CLIMA DE UMA REGIÃO:

- A - clima quente e úmido;
- B - clima árido ou semiárido;
- C - clima mesotérmico (subtropical e temperado);

2ª LETRA - MINÚSCULA, REPRESENTA AS PARTICULARIDADES DO REGIME DE PRECIPITAÇÃO:

- f - sempre úmido (sem estação seca definida);
- m - monçônico e predominantemente úmido;
- s - chuvas de inverno;
- s' - chuvas de outono e inverno;
- w - chuvas de verão;
- w' - chuvas de verão e outono;

3ª LETRA - MINÚSCULA, REPRESENTA A TEMPERATURA MÉDIA CARACTERÍSTICA DE UMA REGIÃO:

- h - quente;
 - a - verões quentes (mês mais quente superior a 22°C);
 - b - verões amenos (mês mais quente inferior a 22°C).
-

FONTE: SMA-ABC (2013)

Com base na TABELA 3, é mostrada na FIGURA 19 a classificação climática do Estado do Paraná.

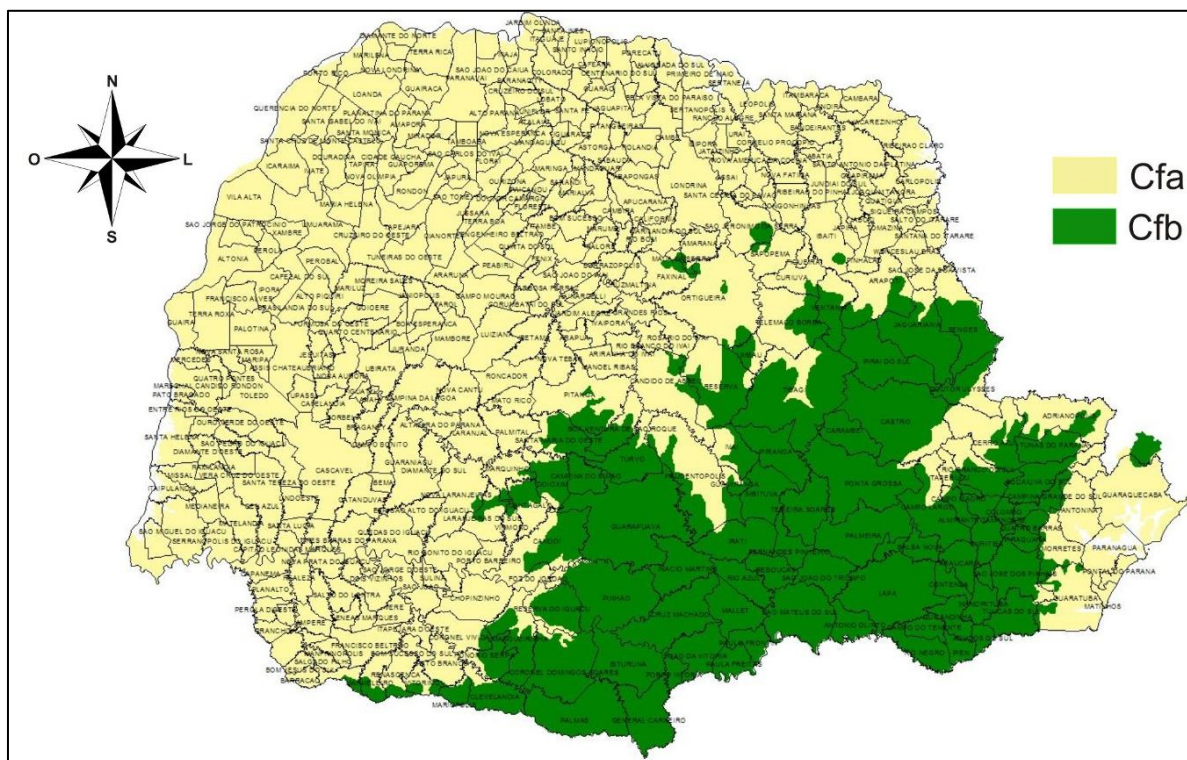


FIGURA 19– CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DO ESTADO DO PARANÁ
 FONTE: SMA-ABC (2013)

Analisando a FIGURA 19, nota-se que a Bacia do Rio Iguaçu, situada na região sul do Paraná, apresenta aproximadamente duas regiões climáticas distintas. A região Leste, onde está situada a UHE Foz do Areia, é classificada como sendo de clima “mesotérmico (subtropical e temperado)”, apresenta regime de chuva “sempre úmido (sem estação seca definida)” e temperatura média de “verões amenos (mês mais quente inferior a 22°C)”. Já a região Oeste, onde está situada a UHE Salto Caxias, é semelhante à região Leste, com exceção da temperatura média, que é classificada como sendo de “verões quentes (mês mais quente superior a 22°C)”.

A precipitação pluvial é a variável melhor conhecida na bacia, sendo muito importante a contribuição pluviométrica na bacia incremental entre União da Vitória e Foz do Areia. A precipitação média anual sobre a Bacia do Iguaçu é da ordem de 1500 mm.ano⁻¹, e a distribuição da chuva é bastante irregular no tempo e no espaço, conseqüentemente não há um período úmido bem definido (MINE, 1998).

3.1.3 Uso do solo

Nas cabeceiras da Bacia do Iguaçu, na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), há uma grande concentração populacional, e as atividades industriais, comerciais e de serviços são as mais importantes. No interior do Estado predomina a agropecuária, com destaque para as culturas de soja e trigo, além das pastagens. As indústrias da bacia, em sua maior parte, estão relacionadas com a agropecuária (SEMA, 2008).

A grande maioria da área da bacia é ocupada com a classe de uso misto, aparecendo áreas de agricultura intensiva na região de Guarapuava, seguindo no sentido Sudoeste, até a divisa com Santa Catarina. Há uma concentração de cobertura florestal na região do Médio e Baixo Iguaçu. No Alto Iguaçu, Curitiba e região metropolitana são tomadas predominantemente por áreas de uso urbano com intensa atividade industrial, como mostra a FIGURA 20.

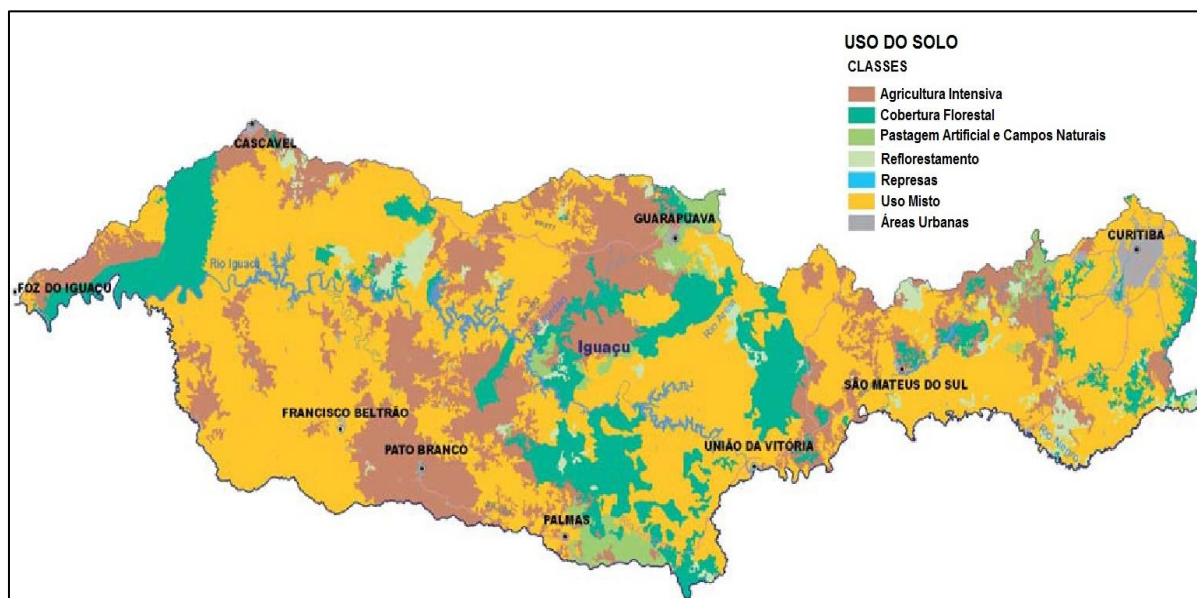


FIGURA 20– USO DO SOLO NA BACIA DO IGUAÇU
FONTE: SEMA (2008)

Além do relatório da SEMA (2008), foi analisado o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da usina hidrelétrica de Salto Caxias, realizado por Intertechne *et al.* (1993) e aprovado em 16/12/1993 pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP).

Segundo esse EIA, a agricultura, representada por plantios diversos como

milho, feijão, soja, trigo e algodão, é o uso principal em toda a bacia (62,50%), dominando amplamente a porção central da área de influência da usina de Salto Caxias. Os plantios de milho e feijão normalmente estão dispostos em pequenas propriedades, enquanto que o algodão é uma cultura recente no vale do Iguaçu, mas vem sofrendo ampla expansão nas regiões mais altas, enquanto o consórcio soja/trigo é comum nos planaltos de Palmas e Catanduvás. Finalizando as tipologias ocorrentes tem-se os reflorestamentos, principalmente de *Pinus sp*, que não são muito comuns, mas apresentam extensões significativas a nordeste da UHE Salto Osório, junto aos rios Perdido e das Lontras, ao Sul de Renascença e ao Leste de Mariópolis. A ocupação desta tipologia corresponde a apenas 1,28% do total da área de influência, conforme mostra a TABELA 4.

TABELA 4 – USO DO SOLO / COBERTURA VEGETAL DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DA USINA DE SALTO CAXIAS

TIPOLOGIA	ÁREA (Km ²)	PERCENTUAL (%)
Agricultura/Suinocultura	31,51	0,28
Reflorestamento	144,38	1,28
Capoeirinha	190,09	1,69
Campo Sujo	355,50	3,16
Capoeira	477,35	4,24
Mata	493,16	4,38
Pastagem	2.252,05	22,45
Agricultura	7.028,96	62,50
TOTAL	11.246,00	100,00

FONTE: Intertechne *et al.* (1993)

3.2 DADOS

Nas seções subsequentes (seção 3.2.1 a 3.2.4) serão detalhados os dados hidrometeorológicos utilizados nesta dissertação, os quais incluem a chuva observada em pluviômetros, a chuva observada do GPCP, a chuva prevista do EUROBRISA, a vazão natural do ONS, e por fim os dados meteorológicos do SIMEPAR.

3.2.1 Chuva observada

A chuva observada utilizada neste trabalho é oriunda de duas fontes distintas. A primeira advém do uso dos dados pluviométricos da Agência Nacional de Águas, enquanto que a segunda é proveniente do GPCP, comumente utilizada pela área de meteorologia e clima.

3.2.1.1 Pluviômetros

A finalidade de selecionar estações pluviométricas é poder obter séries ininterruptas da precipitação ao longo dos anos na bacia. Os dados dos postos pluviométricos foram retirados do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA), presente no *website* “Hidroweb” (ANA, 2012).

As áreas selecionadas para a análise da precipitação observada são as sub-bacias hidrográficas situadas entre as nascentes do rio Iguaçu e a usina de Foz do Areia e a região das nascentes até a usina de Salto Caxias, ou seja, para toda a Bacia do Rio Iguaçu. A TABELA 5 lista os postos pluviométricos selecionados para o primeiro trecho.

TABELA 5 - POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS NA BACIA INCREMENTAL ENTRE AS NASCENTES E FOZ DO AREIA

CÓDIGO	POSTO	LATITUDE	LONGITUDE	INÍCIO	ANOS
2649018	Fragosos	-26,15	-49,38	01/05/1967	42
2549004	Piraquara	-25,45	-49,07	01/07/1958	39
2549003	Rio da várzea dos lima	-25,95	-49,39	01/09/1940	69
2549040	Contenda	-25,68	-49,54	01/07/1974	31
2549061	Quitandinha	-25,86	-49,51	01/02/1975	34
2549000	São bento	-25,93	-49,78	01/04/1938	71

continua

CÓDIGO	POSTO	LATITUDE	LONGITUDE	INÍCIO	ANOS
					continuação
2651005	Palmital do meio (396)	-26,03	-51,14	01/11/1945	64
2651000	União da vitória (396)	-26,23	-51,08	01/02/1938	71
2550005	Rio claro do sul (eufrozina)	-25,95	-50,68	01/05/1948	61
2550001	São Mateus do sul	-25,88	-50,39	01/02/1938	71
2650008	Santa cruz do timbó	-26,38	-50,88	01/08/1974	35

FONTE: O autor (2013)

A TABELA 6 lista os postos pluviométricos selecionados para o trecho entre as nascentes do rio Iguaçu e a usina de Salto Caxias.

TABELA 6 - POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS NA BACIA INCREMENTAL ENTRE AS NASCENTES E SALTO CAXIAS

CÓDIGO	POSTO	LATITUDE	LONGITUDE	INÍCIO	FIM	ANOS
2649018	Fragosos	-26,15	-49,38	01/05/1967	04/06/2009	42
2549004	Piraquara	-25,45	-49,07	01/07/1958	01/12/1997	39
2549003	Rio da várzea dos lima	-25,95	-49,39	01/09/1940	09/11/2009	69
2549040	Contenda	-25,68	-49,54	01/07/1974	16/08/2005	31
2549061	Quitandinha	-25,86	-49,51	01/02/1975	04/06/2009	34
2549000	São Bento	-25,93	-49,78	01/04/1938	04/06/2009	71
2651005	Palmital do meio (396)	-26,03	-51,14	01/11/1945	08/06/2009	64
2651000	União da vitória (396)	-26,23	-51,08	01/02/1938	08/06/2009	71
2550005	Rio Claro do Sul (Eufrozina)	-25,95	-50,68	01/05/1948	04/06/2009	61
2550001	São Mateus do sul	-25,88	-50,39	01/02/1938	08/06/2009	71
2650008	Santa Cruz do timbó	-26,38	-50,88	01/08/1974	08/06/2009	35
2551000	Guarapuava	-25,45	-51,45	01/01/1954	01/10/2011	57
2651015	Usina Bituruna	-26,17	-51,55	01/01/1957	01/08/2007	50
2552005	Cavernoso I (Reserv. Mont.)	-25,48	-52,22	01/01/1952	01/10/2011	59
2651013	Colônia Augusto Loureiro	-26,19	-51,30	01/09/1955	18/08/2005	50
2552008	Marquinhos	-25,11	-52,26	01/04/1967	10/08/2006	39
2551010	Guarapuava	-25,36	-51,50	01/06/1964	10/02/2010	46
2652009	Ponte do Vitorino	-26,05	-52,80	01/05/1957	04/06/2009	52
2552000	Quedas do Iguaçu	-25,45	-52,90	01/08/1949	04/06/2009	60
2652012	Vitorino (moinho caçador)	-26,27	-52,80	01/08/1964	29/07/2005	41
2553004	Cruzeiro do Iguaçu	-25,57	-53,13	01/05/1963	12/04/2006	43
2553012	Ampere	-25,92	-53,48	01/04/1966	18/08/2005	39
2553005	Perola do Oeste	-25,83	-53,75	01/08/1964	12/06/2006	42
2652013	Pato Branco	-26,23	-52,68	01/08/1964	31/05/2005	41
2552001	Águas do Vere (396)	-25,77	-52,93	01/07/1956	08/06/2009	53
2553010	Santa Izabel do Oeste	-25,82	-53,50	01/09/1965	18/08/2005	40

FONTE: O autor (2013)

Os postos pluviométricos listados na TABELA 5 e na TABELA 6 foram selecionados a partir de um conjunto maior de estações pluviométricas, a partir das quais foi feito um procedimento de preenchimento das falhas existentes e uma

posterior análise de consistência desses dados pluviométricos, ambos detalhados mais adiante na seção 3.5.2.

3.2.1.2 *Global Precipitation Climatology Project (GPCP)*

Global Precipitation Climatology Project (GPCP) é a base de dados de chuva observada que a área de meteorologia e clima utiliza, estando disponível no *website* da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, (2013).

O GPCP fornece a chuva observada pontual. Foi estabelecido pelo *World Climate Research Program (WCRP)* para solucionar o problema da quantificação da distribuição da precipitação que cobre o globo terrestre ao longo de vários anos. Consiste na combinação e na incorporação de medições de chuva baseadas em informações de satélite e postos pluviométricos locais, cobrindo uma região do globo terrestre em uma grade variando de 2,5° na latitude e na longitude. O procedimento operacional da estimativa da chuva do GPCP está descrito em Adler *et al.* (2003) e em Huffman, Adler e Bolvin (2009).

Nesta dissertação, a base de dados de chuva do GPCP foi extraída com a utilização do *software R* (seção 3.4). Os valores mensais de chuva extraídos cobrem o período de janeiro/1979 até junho/2011, e os pontos de extração (1,2,3,4) estão ilustrados na FIGURA 21.

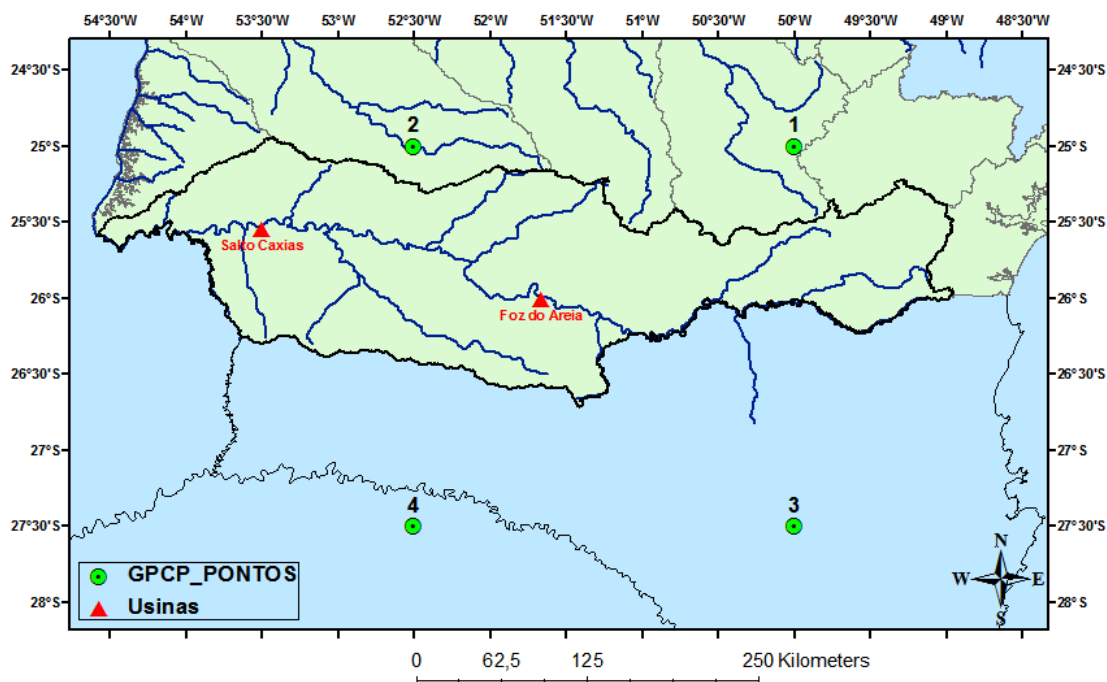


FIGURA 21 – LOCALIZAÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE CHUVA OBSERVADA EXTRAÍDOS DO GPCP

FONTE: O autor (2013)

3.2.2 Chuva prevista

Os dados de previsão de chuva referentes ao período passado (*hindcast*) são provenientes do projeto EUROBRISA. Em estudo anterior (Bettinardi, 2011) foram utilizados dados de previsão referentes ao período de 1987-2001, enquanto que na presente dissertação foi utilizada uma base de dados atualizada do projeto EUROBRISA, com versões mais recentes e robustas dos modelos climáticos, onde o período da previsão de chuva foi maior que estudado por Bettinardi (2011), sendo estendido para 1981-2005.

Para se fazer a extração dos dados, usou-se o *software* R (seção 3.4), para os pontos de grade com resolução de 2,5° na longitude e na latitude. A base de dados de *hindcast* de previsão de chuva do EUROBRISA inclui:

- 1) Média móvel trimestral da anomalia da chuva prevista pontual, em mm.dia^{-1} , para o período de 1981 – 2005;
- 2) Média móvel trimestral do desvio padrão da chuva prevista pontual, mm.dia^{-1} , para o período de 1981 – 2005.

3.2.3 Vazão natural

O setor elétrico tem adotado o termo vazão natural para identificar a vazão que ocorreria em uma seção do rio se não houvesse as ações antrópicas na sua bacia contribuinte, e o termo vazão afluente para caracterizar a vazão que chega a um aproveitamento hidroelétrico ou estrutura hidráulica, que é influenciada pelas obras de regularização e demais ações antrópicas porventura existentes na bacia hidrográfica.

As vazões naturais são calculadas a partir de séries de vazões observadas em estações fluviométricas e nas vazões afluentes e efluentes nos locais dos aproveitamentos, retirando-se o efeito da operação dos reservatórios existentes a montante e incorporando as vazões relativas aos usos consuntivos e à evaporação líquida. Os dados de vazão natural podem ser encontrados no *website* do ONS.

3.2.4 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos necessários para a estimativa da evapotranspiração da Bacia do Rio Iguaçu foram fornecidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e estão listados na TABELA 7. As doze estações meteorológicas, a partir das quais foram fornecidos os dados, estão descritas na TABELA 8 e a distribuição espacial delas é mostrada na FIGURA 22.

TABELA 7– DADOS METEOROLÓGICOS SOLICITADOS AO SIMEPAR

Resolução Horária	Temperatura Máxima [°C]; Temperatura Mínima [°C]; Radiação Solar Global [W/m ²];
Resolução Diária	Temperatura Média Diária [°C]; Radiação Solar Global [W/m ²]; Umidade Relativa [%]; Velocidade do Vento [m/s]; Precipitação [mm]; Pressão atmosférica [Pa]
Período Histórico	Início de operação da estação até: 31/12/2012

FONTE: O autor (2013)

TABELA 8 – ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS SOLICITADAS AO SIMEPAR

ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE
Curitiba	-25,43	-49,27
Entre Rios (Guarapuava)	-25,55	-51,48
Foz do Areia	-26,08	-51,65
Guarapuava	-25,35	-51,50
Lapa	-25,78	-49,77
Nova Prata do Iguaçu	-25,57	-53,52
Palmas	-26,47	-51,97
Pato Branco	-26,12	-52,68
Pinhais	-25,42	-49,13
Salto Caxias (Cap. Leônidas Marques)	-25,52	-53,48
Salto Osório	-25,52	-53,02
União da Vitória	-26,23	-51,07

FONTE: O autor (2013)

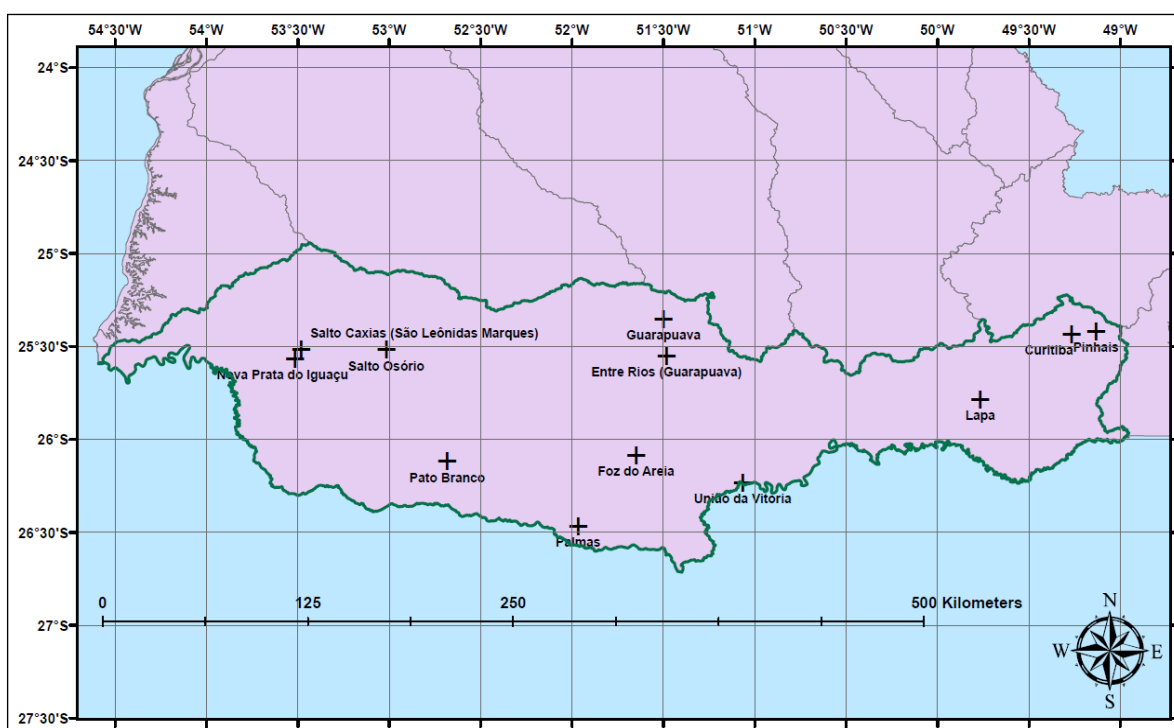


FIGURA 22– LOCALIZAÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS SOLICITADAS AO SIMEPAR NA BACIA DO IGUAÇU

FONTE: O autor (2013)

Com o propósito de processar e analisar os dados meteorológicos fornecidos pelo SIMEPAR, foi desenvolvida uma rotina de programação em linguagem FORTRAN (*met_analise.f*, ANEXO 1). A essência desse processamento foi fazer a leitura dos dados e descrevê-los em termos da disponibilidade, da variabilidade espaço-temporal, e realizar um controle de qualidade.

Para cada variável meteorológica de cada estação, o programa (*met_analise.f*) processa como dado de entrada os dados diários do SIMEPAR e produz como dado de saída os índices de falha, a série diária completa, a série mensal completa, valores anuais e climatológicos. Os critérios usados para o preenchimento das falhas foram:

1) Se o índice de falhas mensal for maior ou igual a 1/3, por exemplo, 20 dias com dados e 10 dias sem dados, mostra-se o mês como mês com falhas (código: -999,9);

2) Se o índice de falhas mensal for menor do que 1/3, a média mensal da variável será a média dos dias disponíveis.

As estações climatológicas do SIMEPAR fornecem os dados de velocidade do vento medidos a 10m de altura. Para converter estes dados a uma altura de referência de 2m foi utilizada a EQUAÇÃO (3) (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1988).

$$u_{m,2} = u_{m,10} \left(\frac{\ln\left(\frac{2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \right) \quad (3)$$

Onde: $u_{m,10}$ = velocidade do vento medida a 10m de altura ($m.s^{-1}$); $u_{m,2}$ = velocidade do vento a 2m de altura ($m.s^{-1}$); z_0 = altura de rugosidade da superfície (m).

A altura de rugosidade da superfície (z_0) da EQUAÇÃO (3) é função da superfície natural do local, conforme mostra a TABELA 9.

TABELA 9- VALORES APROXIMADOS DA ALTURA DE RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIES NATURAIS

SUPERFÍCIE	ALTURA DE RUGOSIDADE Z_0 (m)
Gelo	1×10^{-5}
Água	1×10^{-4} a 6×10^{-4}
Gramado (até 10 cm de altura)	1×10^{-3} a 2×10^{-2}
Gramado (10 a 50 cm de altura)	0,02 a 0,05
Vegetação (1 a 2 m de altura)	0,2
Árvores (10 a 15 m de altura)	0,4 a 0,7

FONTE: Brutsaert (1982)

Considerou-se, como simplificação, a altura de rugosidade como sendo 0,05m para a Bacia do Iguaçu.

3.3 ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES

Com o objetivo de avaliar a qualidade das previsões de chuva e vazão, foram utilizadas as estatísticas apresentadas nas seções seguintes (3.3.1 a 3.3.4), onde (P_i) e (O_i) representam, respectivamente, as variáveis previstas e observadas, enquanto que (n) representa o número de previsões/observações.

3.3.1 Erro médio absoluto

O erro médio absoluto, do inglês *mean absolute error* (MAE), é um cálculo usado em estatística para medir o quão próximos estão os valores previstos e observados entre si. A EQUAÇÃO (4) mostra como é feito o cálculo do erro médio absoluto.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (4)$$

3.3.2 Raiz do erro quadrático médio

A raiz do erro quadrático médio, do inglês *root mean square error* (RMSE), é uma medida similar ao erro médio absoluto (seção 3.3.1). Ela mede a acurácia da previsão, como pode ser visto na EQUAÇÃO (5).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (5)$$

3.3.3 Coeficiente de correlação linear

O coeficiente de correlação linear (ρ), ou coeficiente de correlação de Pearson, é uma medida do grau de correlação linear entre duas variáveis. Varia de

(-1) a (+1), onde uma correlação de (+1) indica que o valor previsto possui uma correlação positiva perfeita com o valor observado, enquanto que uma correlação de (-1) indica que o valor previsto possui uma correlação negativa perfeita com o valor observado, ou seja, se o valor observado aumenta, o valor previsto diminui, ou vice-versa. Uma correlação igual a zero indica que a variável prevista não depende linearmente da observada. O cálculo do coeficiente de correlação linear (ρ) é mostrado na EQUAÇÃO (6).

$$\rho = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i - \bar{P}_1)(O_i - \bar{O}_1)]}{\sqrt{\frac{1}{n-1} [(\sum_{i=1}^n P_i - \bar{P}_1) \times (\sum_{i=1}^n O_i - \bar{O}_1)]}} \quad (6)$$

3.3.4 Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), mostrado na EQUAÇÃO (7), é muito usado em hidrologia, e possui variação de $(-\infty)$ a (+1). Uma eficiência de (+1) corresponde a uma previsão perfeita, enquanto que uma eficiência de (0) indica que os valores previstos possuem uma acurácia igual a caso fosse usado a média de longo termo observada como valor previsto. Uma eficiência negativa (< 0) indica que, caso fosse usado a média observada como valor previsto, esta teria uma acurácia maior do que o valor previsto.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

3.4 SOFTWARE “R”

O software “R” é uma linguagem e ambiente voltado para análises estatísticas e gráficas. É um projeto que foi desenvolvido nos laboratórios Bell por John Chambers e colaboradores. Esse programa fornece uma ampla variedade de técnicas estatísticas e gráficas, e é um software gratuito, disponível sob os termos da *Free Software Foundation's GNU General Public License* em formato de código fonte (SOFTWARE R, 2013).

Ele compila e roda em diferentes sistemas operacionais, incluindo o

Windows. Grande parte do sistema foi desenvolvida em uma linguagem própria, e para tarefas computacionalmente mais intensas é possível juntar rotinas em linguagem C, C++ e Fortran (SOFTWARE R, 2013).

O ambiente “R” é um conjunto integrado de recursos de software para manipulação, cálculos e disposição gráfica de dados. Esse software foi utilizado na extração dos dados de chuva previstos pelo projeto EUROBRISA e dos dados de chuva observada do GPCP.

3.5 MÉTODOS

Nas seções seguintes, serão detalhados os algoritmos e métodos utilizados ao longo desta dissertação.

3.5.1 Reconstrução da previsão da chuva média na bacia

Para estimar os valores de chuva prevista a partir dos dados provenientes do EUROBRISA, é necessário relacionar a anomalia média prevista e o desvio padrão médio previsto com uma média de longo termo da chuva observada. Nesta dissertação, a chuva observada utilizada foi a chuva média na bacia estimada a partir dos registros de pluviômetros com longos períodos de registro na bacia.

Os produtos da chuva prevista são expressos em termos de médias móveis trimestrais, centrados no segundo mês subsequente ao mês de divulgação da previsão. Exemplificando, em janeiro se divulga a previsão de chuva para o trimestre fevereiro-março-abril.

O algoritmo para a reconstrução da média móvel trimestral da chuva prevista assume que os dados de anomalia e desvio padrão previstos obedecem a uma distribuição de probabilidades gaussianas, onde a variável reduzida (Z) é calculada através da EQUAÇÃO (8):

$$Z = \frac{ANOM_{prev}}{\sigma_{prev}} = \frac{X_{prev} - \mu_{obs}}{\sigma_{obs}} \quad (8)$$

Onde: X_{prev} = valor de chuva prevista, objetivo do cálculo; μ_{obs} = média de longo

período da chuva observada; σ_{obs} = desvio padrão de longo período da chuva observada; $ANOM_{prev}$ = anomalia prevista (EUROBRISA); σ_{prev} = desvio padrão previsto (EUROBRISA).

Isolando-se X_{prev} na EQUAÇÃO (8), vem que:

$$X_{prev} = \frac{ANOM_{prev}}{\sigma_{prev}} \times \sigma_{obs} + \mu_{obs} \quad (9)$$

Dessa forma, o procedimento de reconstrução da previsão trimestral da chuva média na bacia requer o algoritmo descrito abaixo:

- 1) Seleção dos pontos de grade de previsão de chuva que estejam na bacia de interesse, ou seja, os mais próximos da bacia de interesse;
- 2) Extração dos dados de previsão da anomalia e desvio padrão da chuva média trimestral nos pontos de grade identificados em (1);
- 3) Cômputo da chuva média observada na bacia a partir dos registros pluviométricos;
- 4) Cômputo da média móvel trimestral da chuva média observada na bacia;
- 5) Reconstrução da previsão da média trimestral de chuva, de acordo com a EQUAÇÃO (9).

A FIGURA 23 ilustra a localização dos quatro pontos de previsão selecionados segundo o item (1) do algoritmo.

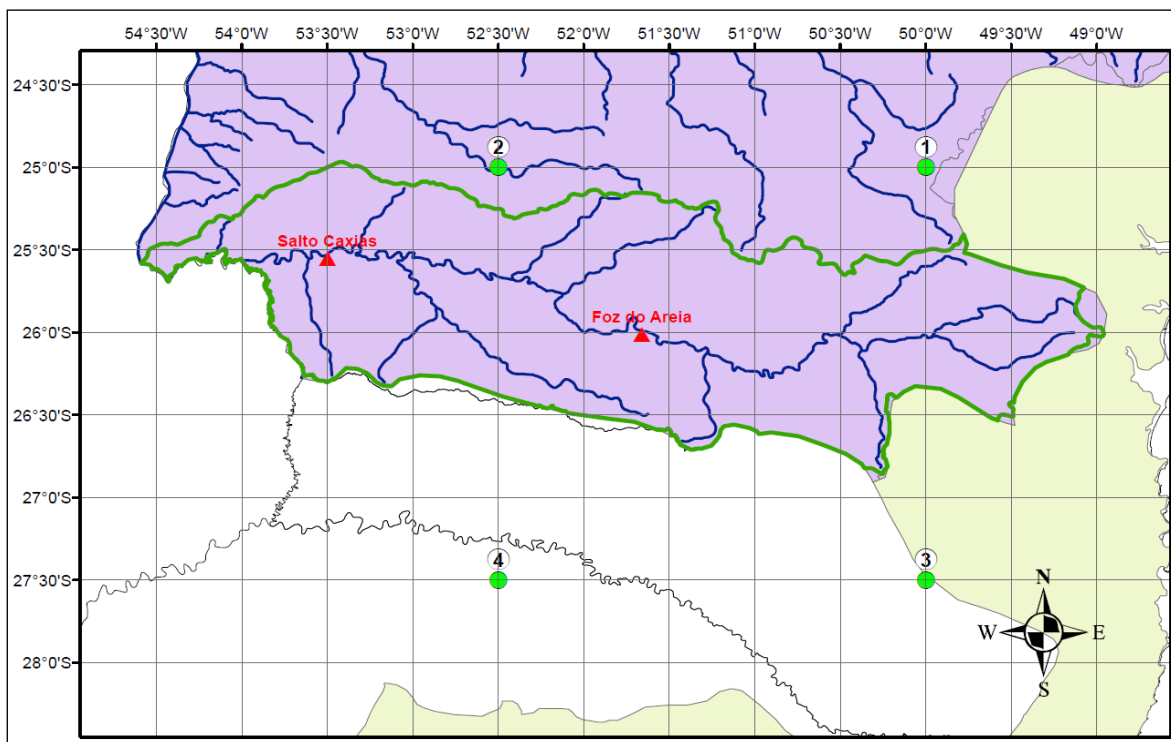


FIGURA 23– PONTOS DE PREVISÃO DE CHUVA SELECIONADOS PARA A BACIA DO IGUAÇU
FONTE: O autor (2013)

A previsão da chuva média na bacia foi computada para as duas áreas identificadas na FIGURA 24, e também para a área correspondente à bacia inteira, ou seja, entre as nascentes do Rio Iguazu e a UHE Salto Caxias. Como estimativa para a chuva prevista na bacia incremental entre as nascentes e a UHE Foz do Areia, computou-se a média aritmética dos pontos 1 e 3 da FIGURA 24. Para a região entre Foz do Areia e Salto Caxias computou-se a média entre os pontos 2 e 4 e para a bacia inteira a média entre os pontos (1,2,3,4).

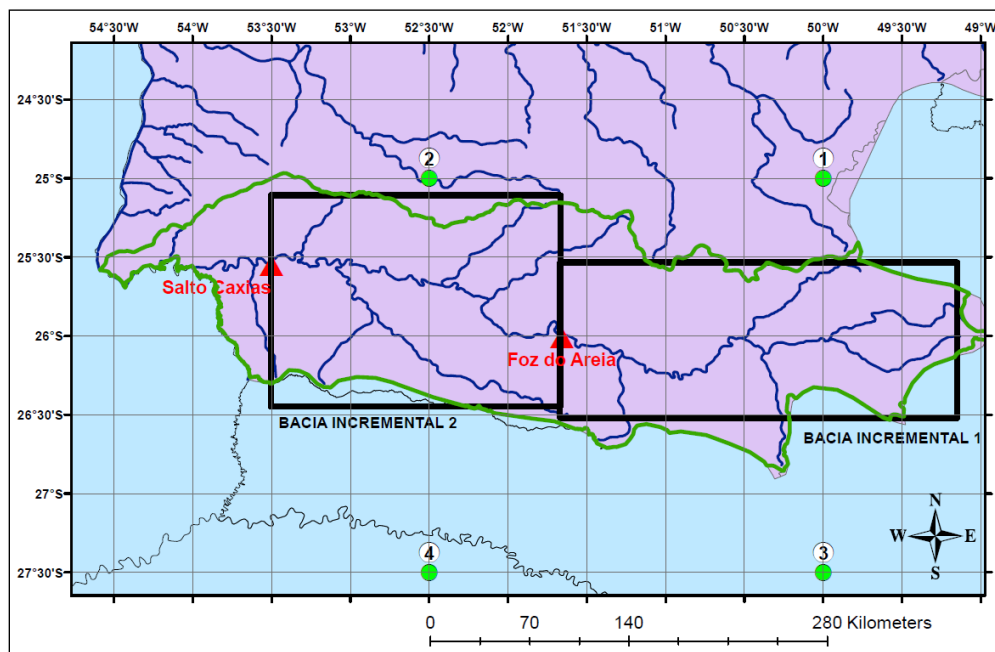


FIGURA 24– ÁREAS DE REFERÊNCIA PARA O CÔMPUTO DA PREVISÃO DA CHUVA MÉDIA NA BACIA

FONTE: O autor (2013).

3.5.2 Preenchimento de falhas e análise de consistência de dados pluviométricos

O objetivo da obtenção de dados de postos pluviométricos é poder obter uma série contínua e consistente da chuva observada na bacia ao longo do tempo. Ao analisar esses dados, pode ocorrer a existência de estações onde há períodos sem informações ou com falhas nas observações, devido a problemas com os pluviômetros ou devido a problemas operacionais com o profissional operador do posto.

Para gerar informação no período com falha, foi realizado o procedimento de preenchimentos de falhas através do método da regressão linear, onde foi feita uma regressão linear simples entre o posto com falha (Y) e a média de todos os postos vizinhos (X) situados na mesma bacia hidrográfica incremental. A correlação produz uma equação, cujos parâmetros podem ser estimados por métodos como o de mínimos quadrados, ou graficamente através da plotagem cartesiana dos pares de valores (X, Y), traçando-se a reta que melhor representa os pares de pontos. Uma vez definida a equação da correlação linear, como por exemplo a equação mostrada na FIGURA 25, as falhas do posto com falha podem ser preenchidas.

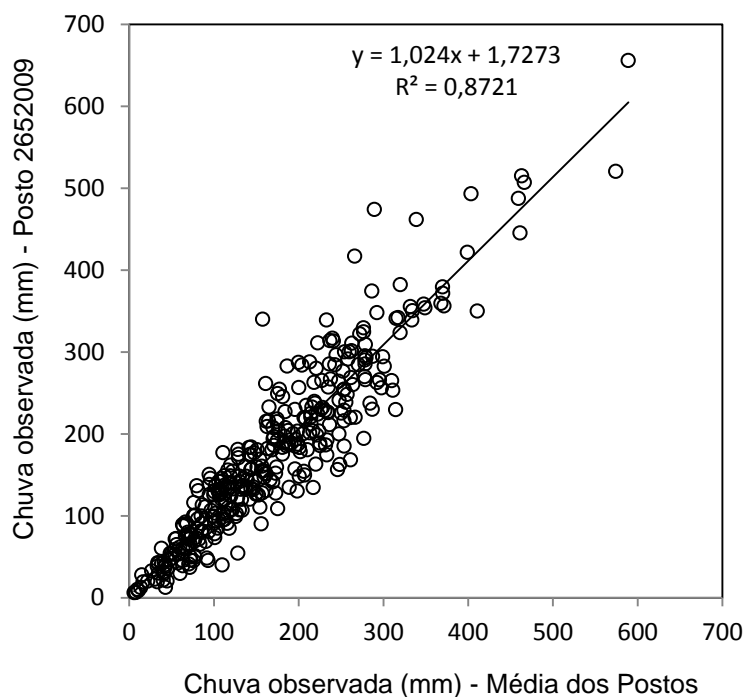


FIGURA 25 – EXEMPLO DO MÉTODO DA REGRESSÃO LINEAR PARA PREENCHIMENTO DE FALHAS
FONTE: O autor (2013)

Após ter sido feito o procedimento de preenchimento de falhas de todos os postos, foi feita a análise de consistência dos dados pluviométricos, cuja finalidade é verificar se os dados são coerentes e se existem desvios sistemáticos. Para tanto, optou-se pelo Método da Dupla-Massa, também conhecido como Método da Curva Duplo-Acumulativa, desenvolvido pelo *Geological Survey* (USA).

O Método da Curva Duplo-Acumulativa baseia-se no princípio de que o gráfico de uma quantidade acumulada (chuva do posto Y), plotada contra outra quantidade acumulada (chuva do posto X), durante um determinado período de tempo, devem ser lineares sempre que as quantidades sejam proporcionais.

Para a aplicação deste método, após terem sido selecionados os postos pluviométricos de uma mesma bacia hidrográfica incremental, acumulou-se para cada um deles os valores mensais, e plotou-se num gráfico cartesiano os valores acumulados correspondentes ao posto em análise (nas ordenadas) e no eixo das abscissas plotou-se valores médios da chuva mensal acumulada de todos os postos da bacia incremental. A inconsistência ocorre quando não se observa o alinhamento dos dados segundo uma única reta, em decorrência de situações como: mudança

das condições climáticas, alteração das condições físicas do posto, erros sistemáticos de leitura pelo observador, entre outros. A FIGURA 26 e a FIGURA 27 ilustram, respectivamente, exemplos de curvas duplo-acumulativas de um posto inconsistente e de um consistente.

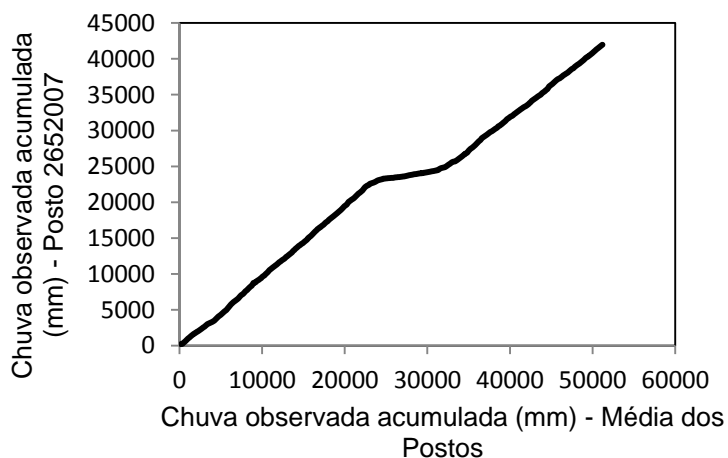


FIGURA 26-CURVA DUPLO ACUMULATIVA DE UM POSTO INCONSISTENTE
 FONTE: O autor (2013)

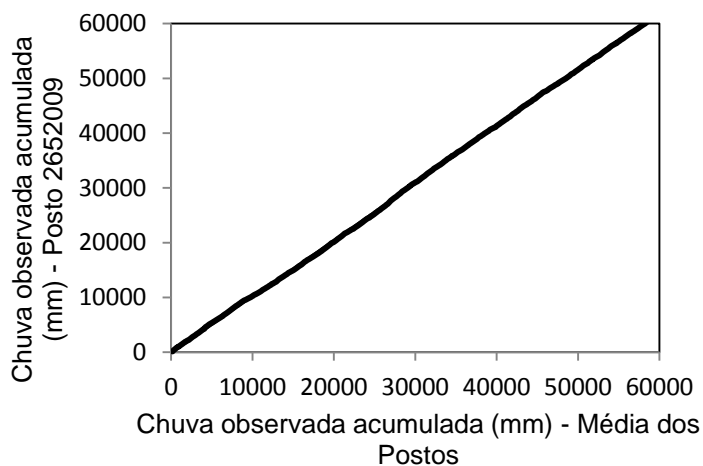


FIGURA 27 – CURVA DUPLO ACUMULATIVA DE UM POSTO CONSISTENTE
 FONTE: O autor (2013)

3.5.3 Algoritmo para estimativa da chuva média observada na bacia

Para o caso da chuva observada nos pluviômetros, o procedimento de estimativa da média trimestral da chuva média na bacia foi feito de acordo com o algoritmo descrito abaixo:

- 1) Seleção dos pluviômetros que estejam nas áreas ilustradas nos dois

- retângulos da FIGURA 24;
- 2) Cômputo da chuva média na bacia através da média aritmética dos registros dos pluviômetros selecionados no item (1);
 - 3) Cômputo da média móvel trimestral da chuva média na bacia obtida no item (2);
 - 4) Cômputo das estatísticas mensais de longo termo (média e desvio padrão) dos valores trimestrais obtidos no item (3).

Para o caso da chuva observada do GPCP, o procedimento feito foi calcular a média dos dados dos pontos 1 e 3 da FIGURA 21 como sendo a média correspondente à região entre as nascentes do rio Iguaçu e a usina de Foz do Areia, e a média dos dados dos pontos 2 e 4 como sendo a média correspondente à região entre Foz do Areia e Salto Caxias. Para uma estimativa da chuva observada na bacia inteira, considerou-se a média aritmética dos quatro pontos (1,2,3,4).

3.5.4 Algoritmos para estimativa da evaporação de uma superfície líquida

A superfície de um corpo de água (oceano, rio, lago) está sujeita à evaporação, enquanto que a superfície de solo de uma bacia hidrográfica está sujeita à evaporação da água armazenada na camada superficial do solo e à transpiração pela vegetação. A evaporação de um corpo de água depende somente dos fatores meteorológicos e ambientais, principalmente a radiação solar, umidade do ar, temperatura e o vento; enquanto que a evapotranspiração do solo, além de depender dos fatores ambientais, também depende da disponibilidade de água no solo e da fase de desenvolvimento da vegetação (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1988).

Os dois fatores preponderantes que influenciam a evaporação de uma superfície de água são o fornecimento de energia necessária para prover o calor latente de vaporização e o segundo fator é a capacidade de transportar o vapor para longe da superfície evaporativa. Enquanto que a radiação solar é a principal fonte de energia na forma de calor, a capacidade de transportar o vapor para longe da superfície evaporativa depende da velocidade do vento e do gradiente da umidade específica do ar acima da superfície (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1988).

3.5.4.1 Método do balanço de energia

O método do balanço de energia utiliza como dado de entrada o fluxo de radiação solar em unidades ($W.m^{-2}$), que por sua vez é estimado a partir da razão entre a radiação global diária expressa em unidades de ($Wh.m^{-2}.dia^{-1}$) e o número de horas do dia (24), conforme a EQUAÇÃO (10):

$$R_n = \frac{R_g}{N} \quad (10)$$

Onde: R_n = radiação líquida ($W.m^{-2}$); R_g = radiação solar global diária obtida da estação meteorológica ($Wh.m^{-2}.dia^{-1}$); $N= 24$ = número de horas em um dia.

O objetivo do método do balanço de energia é o de estimar a taxa de evaporação em função da radiação líquida incidente e do calor latente de vaporização da água, que por sua vez é função da temperatura do ar.

Segundo Chow, Maidment e Mays (1988), a equação do balanço de energia para a evaporação, considerando uma área unitária de superfície de água é expressa pela EQUAÇÃO (11):

$$E_r = \frac{1}{l_v \rho_w} (R_n) \quad (11)$$

Onde: E_r = taxa de evaporação pelo método do balanço de energia ($m.s^{-1}$); R_n = radiação líquida ($W.m^{-2}$); l_v = calor latente de vaporização da água ($J.kg^{-1}$); ρ_w = massa específica da água ($kg.m^{-3}$).

3.5.4.2 Método aerodinâmico

O método aerodinâmico é usado para estimar a evaporação de uma superfície líquida baseado na ideia de que o transporte de vapor para longe da superfície evaporativa é governado tanto pelo gradiente da umidade do ar como pela turbulência associada à velocidade do vento. Esses dois processos podem ser modelados acoplando as equações de conservação de massa e quantidade de movimento no ar (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1988).

Dessa forma, a estimativa da taxa de evaporação pelo método

aerodinâmico é resultante das EQUAÇÕES (12) e (13):

$$E_a = B(e_{as} - e_a) \quad (12)$$

$$B = \frac{0,622k^2\rho_a u_2}{p\rho_w \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) \right]^2} \quad (13)$$

Onde: E_a = taxa de evaporação pelo método aerodinâmico ($m.s^{-1}$); B = coeficiente de transferência de vapor ($m.Pa^{-1}.s^{-1}$); e_{as} = pressão de vapor de saturação correspondente à temperatura do ar (Pa); e_a = pressão de vapor do ar na altura z_2 (Pa); k = constante de von Karman ($k = 0,4$); ρ_a = massa específica do ar ($kg.m^{-3}$); u_2 = velocidade do vento, medida à altura z_2 ($m.s^{-1}$); p = pressão do ar (Pa); ρ_w = massa específica da água ($kg.m^{-3}$); z_2 = altura de medição do vento (m); z_0 = altura de rugosidade da superfície (m).

3.5.4.3 Método combinado

A evaporação pode ser modelada pelo método aerodinâmico, quando o fornecimento de energia solar não for limitante, e pelo método do balanço de energia, quando o transporte de vapor não for limitante. Mas, normalmente, ambos os fatores são limitantes, logo uma combinação desses dois métodos se faz necessária (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1988). Segundo esses autores, a estimativa da evaporação pelo método combinado é resultante da aplicação das EQUAÇÕES (14) a (16), as quais foram desenvolvidas primeiramente por Penman (1948).

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (14)$$

$$\Delta = \frac{4098e_{as}}{(237,3 + T)^2} \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{C_p K_h p}{0,622 l_v K_w} \quad (16)$$

Onde: E = taxa de evaporação pelo método combinado ($m.s^{-1}$); E_r = taxa de evaporação pelo método do balanço de energia ($m.s^{-1}$); E_a = taxa de evaporação pelo método aerodinâmico ($m.s^{-1}$); Δ = gradiente da curva da pressão de vapor de saturação do ar à temperatura T ($Pa.^{\circ}C^{-1}$); γ = constante psicrométrica; C_p = calor específico do ar a pressão constante ($J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$); e_{as} = pressão de vapor de saturação correspondente à temperatura do ar (Pa); T = temperatura do ar ($^{\circ}C$); K_h = difusividade do calor; K_w = difusividade do vapor; p = pressão do ar (Pa); l_v = calor latente de vaporização da água ($J.kg^{-1}$);

3.5.5 Algoritmo para estimativa da evapotranspiração de referência

Como a bacia do rio Iguaçu não é composta apenas de superfície líquida, faz-se necessário estimar a evapotranspiração, ou seja, a combinação da evaporação líquida com a transpiração da vegetação. Para tanto, primeiramente é necessário calcular a evapotranspiração de referência.

Evapotranspiração de referência é a taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa coberta com pasto verde (capim), com altura variando entre 8 cm e 15 cm, que cresce de forma normal, cobrindo totalmente o solo e não tendo déficit de água (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1988).

O cálculo da evapotranspiração de referência é feito com a mesma formulação do método combinado (PENMAN, 1948). Todavia, recomenda-se que se calibre o coeficiente de transferência de vapor (coeficiente B do método aerodinâmico, EQUAÇÃO (13)) para condições locais, como exemplificado na EQUAÇÃO (17) (DOORENBOS e PRUITT, 1977).

$$B = 0,0027 \left(1 + \frac{u}{100} \right) \quad (17)$$

É importante salientar que a variável (u) da EQUAÇÃO (17) é diferente da velocidade (u_2) da EQUAÇÃO (13) do método aerodinâmico. A variável (u) é a pista

percorrida pelo vento, medido a 2m de altura, em 1 dia (km.dia^{-1}). O coeficiente (B) da EQUAÇÃO (17) está em unidades de ($\text{mm.Pa}^{-1}.\text{dia}^{-1}$).

3.5.6 Algoritmo para estimativa da evapotranspiração potencial de outros cultivos

O cálculo da evapotranspiração potencial (E_t) para outros cultivos é determinado seguindo o seguinte procedimento:

- 1) Estima-se a evapotranspiração de referência (E_{tr}) para as mesmas condições meteorológicas do local do cultivo;
- 2) Corrige-se a evapotranspiração de referência com um coeficiente que reflete a fase de desenvolvimento do cultivo (k_c), aplicando-se a EQUAÇÃO (18):

$$E_t = k_c \times E_{tr} \quad (18)$$

Os valores do coeficiente de cultivo (k_c), podem ser estimados a partir de experimentos para cada espécie de vegetação e para cada fase de desenvolvimento. O valor de k_c para a fase de florescimento da cultura pode exceder 1, para culturas que tenham grande área foliar como milho, soja, feijão, etc. que irão transpirar mais do que o pasto verde que é a referência.

Com o objetivo de se fazer uma estimativa inicial do coeficiente de cultivo para a Bacia do Rio Iguaçu, foi feita uma pesquisa na literatura especializada, como pode ser visto na TABELA 10:

TABELA 10 – ESTIMATIVA INICIAL DO COEFICIENTE DE CULTIVO

MÊS	COEFICIENTE DE CULTIVO (K_c)	OBSERVAÇÃO	REFERÊNCIA	
JAN	0,40	Plantio da Soja	Fietz e Rangel (2008)	
FEV	1,09		Fietz e Rangel (2008)	
MAR	1,60		Fietz e Rangel (2008)	
ABR	1,60		Fietz e Rangel (2008)	
MAI	1,28		Fietz e Rangel (2008)	
JUN	0,40	Plantio do Milho	EMBRAPA (2010)	
JUL	0,40		EMBRAPA (2010)	
AGO	0,40		EMBRAPA (2010)	
SET	0,88		EMBRAPA (2010)	
OUT	1,23		EMBRAPA (2010)	
NOV	1,23		EMBRAPA (2010)	
DEZ	0,79		EMBRAPA (2010)	
			Colheita do Milho	EMBRAPA (2010)

FONTE: O autor (2013)

Conforme mostra a TABELA 10, o coeficiente de cultivo é função do tipo de cobertura vegetal da região, assim como do período do ano. É importante salientar que não foi possível determinar com exatidão qual a cobertura vegetal reinante na Bacia do Iguaçu. Entretanto, usou-se como informação norteadora o relatório publicado por SEMA (2008) e o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da usina de Salto Caxias, ambos detalhados na seção 3.1.3 desta dissertação, os quais afirmam que a maior parte da área da bacia é ocupada com áreas de agricultura.

3.5.7 Modelo BALMES

O modelo hidrológico BALMES, sigla correspondente a “Balanço Hídrico Mensal”, tem por finalidade realizar a análise de consistência conjunta dos dados de chuva, vazão e evapotranspiração. O modelo foi desenvolvido em linguagem FORTRAN (rotina “balmes.f”, ANEXO 2), e usa como dados de entrada arquivos de chuva, vazão e evapotranspiração mensais, além de um arquivo que apresenta valores iniciais e coeficientes utilizados ao longo da rotina. Como arquivos de saída, são fornecidos valores de fluxos mensais, razões, dados climatológicos, valores de desvio padrão, anomalias e capacidade de armazenamento de água no solo.

3.5.7.1 Equação governante

Os cálculos realizados na rotina “balmes.f” obedecem à formulação adaptada de Guetter e Georgakakos (1997). Os valores instantâneos de fluxos e armazenamento da equação da continuidade integrada para toda a bacia (área ω), durante um período Δt , são descritos na EQUAÇÃO (19):

$$\begin{aligned}
& \int_0^{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left[\iint_{\omega} w(t, x, y) dx dy \right] dt \\
&= \int_0^{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \iint_{\omega} [p(t, x, y) - e(t, x, y)] dx dy \right\} dt \\
& - \int_0^{\Delta t} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \oint_{\omega_c} [q_s(t, \eta) + q_b(t, \eta)] d\eta \right\} dt
\end{aligned} \tag{19}$$

Onde: t é tempo, x e y são as coordenadas do plano horizontal; ω_c é o perímetro da região; η é a variável de integração ao longo do perímetro; w é a água no solo integrada segundo a vertical; p é a precipitação; e é evapotranspiração; q_s é a vazão do rio e q_b é a contribuição para o aquífero que não é coletada pela drenagem superficial.

Usando letras maiúsculas para expressar os fluxos integrados sobre a área ω , expressa-se o balanço hídrico médio segundo a área e profundidade, como mostra a EQUAÇÃO (20):

$$W_i = \int_0^{\Delta t} [P(t) - E(t) - Q_s(t) - Q_b(t)] dt + W_{i-1} \tag{20}$$

Para o intervalo de tempo $\Delta t(t_{i-1}, t_i)$, W_i expressa a umidade do solo média segundo a área e a profundidade (chamada de água no solo) ao final do intervalo Δt . A partir desse conceito, constroem-se diversas parametrizações para se aplicar a equação (20) com dados históricos.

A evapotranspiração (E_t) é medida na escala mensal ($\Delta t = 1$ mês), e é expressa por (PENMAN, 1948, apud GUETTER E GEORGAKAKOS, 1997):

$$\int_0^{\Delta t} E(t) dt = \frac{W_i - W_{i-1}}{2W_0} \int_0^{\Delta t} PE(t) dt \tag{21}$$

Onde: W_0 é a capacidade do solo e $PE(t)$ é a evapotranspiração potencial.

Nota-se que este tipo de função linear para E tem sido usado com sucesso em modelos hidrológicos operacionais como o modelo Sacramento (PECK, 1976).

Na ausência de medições dos fluxos de água subterrânea, $Q_b(t)$ foi parametrizado como uma função linear do escoamento medido no exutório da bacia $Q_s(t)$:

$$\int_0^{\Delta t} Q_b(t)dt = \beta \int_0^{\Delta t} Q_s(t)dt \quad (22)$$

Onde: β é um coeficiente constante.

Para o $i^{\text{ésimo}}$ tempo do intervalo $\Delta t(t_{i-1}, t_i)$ define-se Ξ_i por:

$$\Xi_i = \int_0^{\Delta t} \Xi(t)dt \quad (23)$$

Onde: Ξ representa P, E ou Q_s . Então a equação do balanço hídrico para intervalos de tempo discretos tem a forma:

$$W_{i+1} \left[1 + \frac{PE_i}{2W_0} \Delta t \right] = W_i \left[1 + \frac{PE_i}{2W_0} \Delta t \right] + [P_i - Q_{s_i}(1 + \beta)]\Delta t \quad (24)$$

A solução da EQUAÇÃO (24) requer uma condição inicial e estimativas dos parâmetros W_0 e β . Para um par de valores W_0 e β , escolheu-se uma condição inicial ($W_i = 0$) e a EQUAÇÃO (24) foi usada para processar todos os dados resultando em estimativas de W_i para todos os meses i . Estabeleceu-se a condição $W_i > 0$ para se estimar a condição inferior, W_0^* , e obter W_0 . Em um estudo de sensibilidade, vários valores maiores que W_0^* foram usados sem que houvesse mudança significativa dos resultados. Assumiu-se que a condição $W_i = 0$ seja o valor obtido com aplicação da EQUAÇÃO (24) às climatologias mensais. Há convergência das iterações quando as estimativas de água no solo para cada um dos doze meses não se altera entre iterações consecutivas.

3.5.8 MODELO HIDROLÓGICO 3R

O modelo hidrológico 3R, cujo nome tem origem nas iniciais das palavras “rainfall-runoff-routing” (chuva-vazão-propagação), é uma adaptação do modelo Sacramento para a aplicação em grandes bacias (Guetter, Georgakakos e Tsonis, 1996). O modelo 3R, esquematizado na FIGURA 28, é composto de um modelo chuva-vazão na fase bacia e de um modelo de propagação na fase canal.

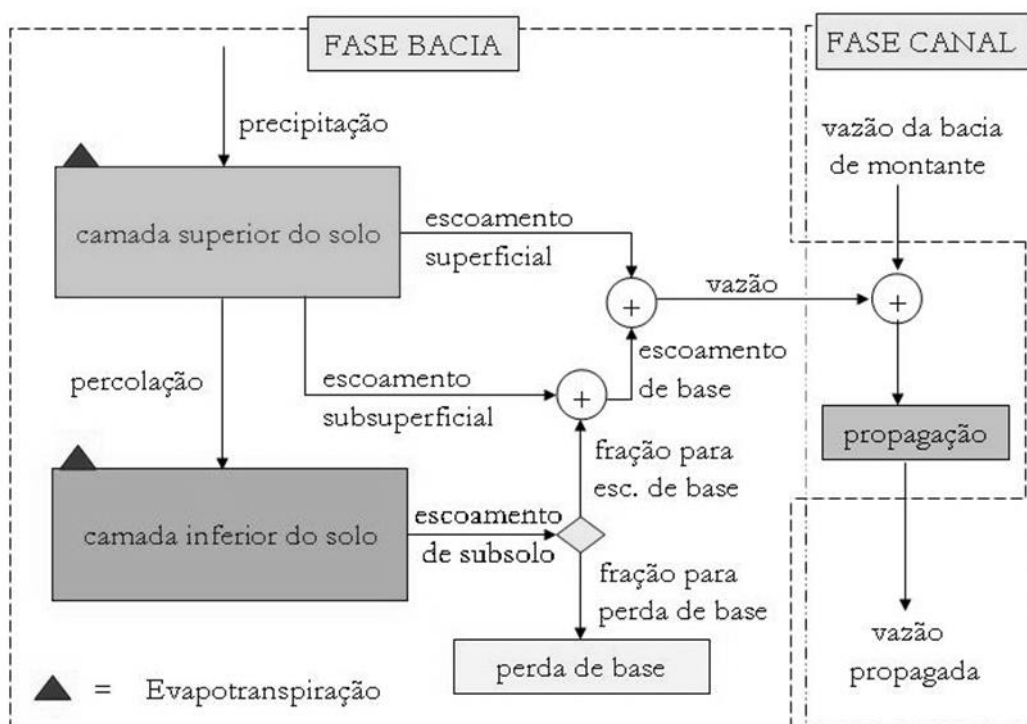


FIGURA 28- ESTRUTURA DO MODELO 3R
FONTE: Guetter, Krauskopf e Mine (2007)

O modelo 3R é um modelo hidrológico determinístico, conceitual e com aplicação distribuída. Na versão distribuída para grandes bacias, o modelo 3R representa dois conjuntos de processos: (1) fase bacia, que é o balanço hídrico, na sub-bacia, da água nas duas camadas do solo, usando a chuva e a evapotranspiração potencial como dados de entrada e gerando os escoamentos superficial, subsuperficial e de base; (2) fase canal, que responde pela laminação dos escoamentos produzidos pelo balanço hídrico nas sub-bacias e pela propagação das contribuições das bacias de montante.

Cada sub-bacia representada pelo modelo 3R apresenta (n+2)

reservatórios, cujos armazenamentos são as variáveis de estado, sendo dois para a representação do armazenamento no solo na fase bacia e (n) , em cascata, para representação da propagação de vazões em canal. As variáveis de estado do modelo 3R são: (X_1) = armazenamento na camada superior de solo, em mm; (X_2) = armazenamento na camada inferior de solo, em (mm); (S_i) = armazenamento do tramo (i) do trecho de canal, em (mm), com (i) variando de (1) a (n) .

Os fluxos da fase bacia do modelo 3R são definidos por unidade de área da bacia, sendo expressos como alturas de lâmina de água por unidade de tempo (mm/mês). A camada superior do solo simula os processos hidrológicos rápidos, que dependem diretamente da ocorrência da chuva e da intensidade da evapotranspiração potencial. O fluxo de entrada da camada superior do solo é a precipitação média sobre a bacia, que deve ser fornecida como dado de entrada para o modelo. A camada superior do solo produz quatro fluxos de saída: (1) escoamento superficial, que é proveniente ou da chuva que excede a capacidade de infiltração do solo não saturado, ou do excesso de precipitação em um trecho já saturado da bacia; (2) evapotranspiração da camada superior, que simula as perdas de umidade pela evaporação e a parcela de transpiração da camada superior; (3) escoamento subsuperficial, que é o escoamento na zona vadosa ou aerada do solo, decorrente do gradiente lateral do grau de saturação do solo; (4) percolação, que é o fluxo vertical que transfere água da camada superior do solo para a inferior.

A camada inferior do solo simula os processos hidrológicos mais lentos da bacia. O fluxo de entrada na camada inferior é a percolação e são produzidos três fluxos de saída: (1) fração do escoamento subterrâneo que contribui para o escoamento de base; (2) recarga do aquífero, que é fração do escoamento subterrâneo que provoca a subida do nível freático e que não aparece na exutória da bacia; (3) transpiração, que é a fração dominante das perdas de evapotranspiração na camada inferior do solo.

A somatória dos escoamentos superficial, subsuperficial e de base forma uma contribuição em marcha ao longo do canal natural de drenagem, devendo ser propagada até o exutório da bacia pelo algoritmo que simula a fase canal do 3R. Caso a bacia simulada tenha outras bacias a montante, então a vazão propagada é composta pela soma dos escoamentos produzidos pela transformação chuva-vazão da fase bacia e pelas vazões afluentes das bacias de montante.

3.5.8.1 Equações governantes

Guetter, Krauskopf e Mine (2007) detalharam as equações e parâmetros que estão sucintamente descritos nessa seção. O modelo chuva-vazão-propagação 3R é apresentado como um conjunto de equações diferenciais ordinárias que representam as variações temporais do armazenamento dos dois reservatórios de solo e dos reservatórios do algoritmo de propagação de vazões. Como as equações governantes representam as taxas de variação no tempo de cada variável de estado, se diz que o modelo é representado no espaço de estados. As variáveis de estado variam diretamente com o tempo. Os fluxos são funções dos armazenamentos, variando implicitamente com o tempo. As $(n+2)$ equações de estado do modelo 3R são:

$$\frac{dX_1}{dt} = \text{PREC} - \text{SR} - \text{INT} - \text{ET}_1 - \text{PR} \quad (25)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \text{PR} - \text{ET}_2 - \text{GW} \quad (26)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = (\text{SR} + \text{BSF}) \frac{A_{\text{inc}}}{A_{\text{tot}}} + \text{QAFL} \frac{86,4}{A_{\text{tot}}} - \beta(S_1)^m \quad (27)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = \beta(S_{i-1})^m - \beta(S_i)^m, i = 2, \dots, n \quad (28)$$

Os termos das EQUAÇÕES (25) a (28) são: t = tempo; X_1 = armazenamento na camada superior do solo (mm); PREC = precipitação (mm/dia); SR = escoamento superficial (mm.dia^{-1}); PR = percolação (mm.dia^{-1}); ET_1 = evapotranspiração na camada superior do solo (mm.dia^{-1}); INT = escoamento subsuperficial (mm.dia^{-1}); X_2 = armazenamento na camada inferior do solo (mm); ET_2 = transpiração na camada inferior do solo (mm.dia^{-1}); GW = escoamento subterrâneo (mm.dia^{-1}); BSF = escoamento de base (mm/dia); S_j = armazenamento do tramo j da propagação de vazões (mm); QAFL = contribuição das sub-bacias de montante ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$); A_{inc} = área da sub-bacia modelada (km^2); A_{tot} = área total da bacia modelada (km^2); β = coeficiente linear do modelo de propagação (mes^{-1}); m = expoente do modelo de propagação (adimensional); n = número de reservatórios conceituais do

algoritmo de propagação de vazões.

Os estados das EQUAÇÕES (25) e (26) estão sujeitos às seguintes restrições de saturação:

$$0 \leq X_1 \leq X_1^0 \quad (29)$$

$$0 \leq X_2 \leq X_2^0 \quad (30)$$

Onde:

X_1^0 = capacidade máxima da camada superior do solo (mm); X_2^0 = capacidade máxima da camada inferior do solo (mm).

Os fluxos do modelo 3R são representados pelas EQUAÇÕES (31) a (38):

$$SR = PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \quad (31)$$

$$INT = C_1 X_1 \quad (32)$$

$$ET_1 = PET \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right) \quad (33)$$

$$PR = C_2 X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \left(\frac{X_1}{X_2^0} \right)^{m_2} \right) \frac{X_1}{X_1^0} \right] \quad (34)$$

$$ET_2 = (PET - ET_1) \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \quad (35)$$

$$GW = C_2 X_2 \quad (36)$$

$$BSF = \left(\frac{1}{1 + \mu} \right) GW + INT \quad (37)$$

$$RCG = \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right) GW \quad (38)$$

Onde: PET = evapotranspiração potencial, e RCG = recarga do aquífero, ou perda da vazão de base, constituindo um fluxo que não integra o conjunto que é medido no posto fluviométrico no exutório da bacia. A TABELA 11 e a TABELA 12 listam os parâmetros das fases bacia e canal do modelo 3R, respectivamente.

TABELA 11 - PARÂMETROS DA FASE BACIA DO MODELO 3R

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
X_1^0	Capacidade da camada inferior do solo	mm
X_2^0	Capacidade da camada superior do solo	mm
m_1	Expoente da função de escoamento superficial	adimensional
C_1	Taxa de recessão da camada superior do solo	mes ⁻¹
m_2	Expoente da função de percolação	adimensional
m_3	Expoente da função de transpiração	adimensional
C_2	Taxa de recessão da camada inferior do solo	mes ⁻¹
C_3	Coefficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	adimensional
μ	Define fração de recarga do aquífero	adimensional

FONTE: Guetter, Krauskopf e Mine (2007)

TABELA 12 – PARÂMETROS DA FASE CANAL DO MODELO 3R

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
β	Taxa de recessão da propagação	mes ⁻¹
m	Expoente da função de propagação	adimensional
N	Número de reservatórios conceituais na cascata	unidade

FONTE: Guetter, Krauskopf e Mine (2007)

As equações de estado do modelo 3R são integradas numericamente com o uso do método de Runge-Kutta de 4ª Ordem (Press *et al.*, 1986), a partir das condições iniciais dos armazenamentos dos reservatórios conceituais e da assimilação dos dados de entrada, que são os totais da chuva e evapotranspiração potencial médios na bacia, para cada intervalo de tempo. A integração é realizada com um número de passos variável em função da intensidade da precipitação, sendo que para os períodos sem chuva assume-se um número mínimo de passos para o intervalo de integração.

3.5.8.2 Calibração do modelo hidrológico

Os parâmetros do modelo 3R podem ser calibrados de forma manual ou automática. Para a calibração automática foi implementado o Método de Descida do Simplex no Espaço Multidimensional, desenvolvido por Nelder e Mead e descrito em Press *et al.* (1986), que é um método de otimização por busca direta e caracterizado pela sua grande robustez, embora não seja um otimizador global.

4 RESULTADOS

Nas seções subsequentes serão apresentados os resultados obtidos nesta dissertação, os quais incluem a descrição da variabilidade espaço-temporal dos dados meteorológicos (seção 4.1), necessários para a estimativa da evapotranspiração de referência (seção 4.2), seguida pela descrição da variabilidade da chuva observada (seção 4.3), da vazão natural (seção 4.4) e da chuva prevista (seção 4.5). Em seguida são apresentados os resultados obtidos pelo modelo de balanço hídrico (seção 4.6), da calibração do modelo de previsão de vazão (seção 4.7) e por fim os resultados da previsão de vazão utilizando a previsão de chuva como dado de entrada (seção 4.8).

4.1 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DOS DADOS METEOROLÓGICOS

Nas seções subsequentes (4.1.1 a 4.1.5) será detalhada, respectivamente, a variabilidade espaço-temporal dos dados meteorológicos: pressão, temperatura, umidade relativa, radiação e velocidade do vento, os quais serviram como dado de entrada para o cálculo da evapotranspiração de referência (seção 4.2).

4.1.1 PRESSÃO

A TABELA 13 resume os valores anuais médios de longo período da pressão para onze estações meteorológicas do SIMEPAR, assim como quais foram aquelas estações que apresentaram maior ou menor porcentagem de falhas.

TABELA 13 – PRESSÃO MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT) DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR, NO SENTIDO DE LESTE PARA OESTE NA BACIA DO IGUAÇU

ESTAÇÃO	PERÍODO	MLT (hPa)	% DE FALHAS	MÁX MENSAL (hPa)	MÍN MENSAL (hPa)
Curitiba	1998-2012	912,81	0,27	918,16	908,30
Lapa	1998-2012	915,46	0,18	920,77	910,90
União da Vitória	1998-2012	930,55	0,89	935,70	925,60
Entre Rios	2001-2012	892,55	1,25	897,37	888,00
Guarapuava	1998-2012	899,22	3,91	905,43	895,00
Foz do Areia	1998-2012	928,20	1,08	933,15	923,40

continua

ESTAÇÃO	PERÍODO	MLT (hPa)	% DE FALHAS	MÁX MENSAL (hPa)	MÍN MENSAL (hPa)
					continuação
Palmas	1999-2012	893,16	1,80	897,59	889,42
Pato Branco	1998-2012	933,47	2,10	938,43	928,96
Salto Osório	2000-2012	956,10	0,91	962,40	950,26
Nova Prata do Iguaçu	1998-2006	952,00	0,55	957,22	947,70
Salto Caxias	2000-2012	964,05	2,06	969,96	959,19

Obs.: 1 hPa = 100 Pa

FONTE: O autor (2013)

Pode-se constatar, pela análise da TABELA 13, que as estações mais a Oeste da Bacia do Iguaçu foram as que apresentaram as pressões mais altas, com destaque para a estação de Salto Caxias. A FIGURA 29 comprova essa constatação, onde é mostrada em um mapa georreferenciado a variabilidade espacial da pressão na bacia.

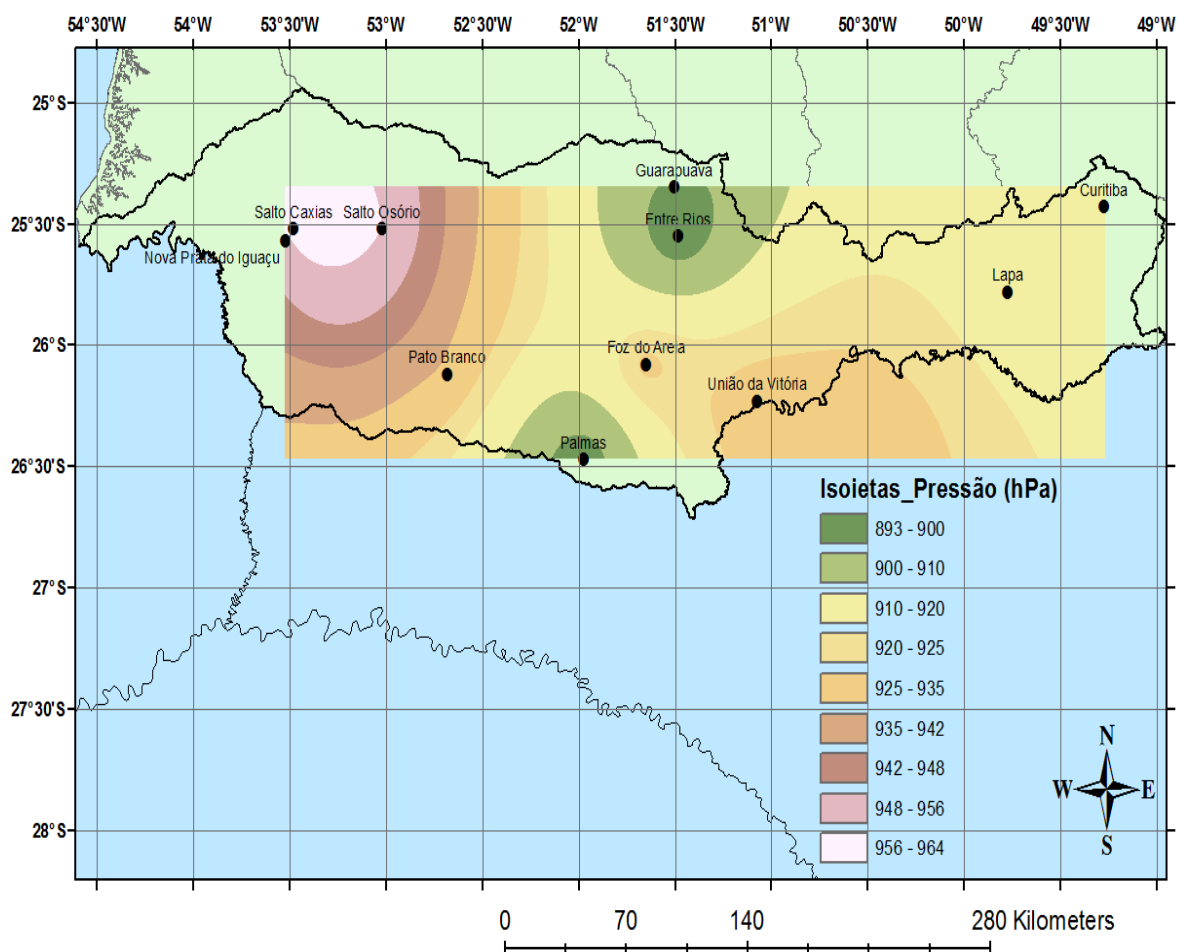


FIGURA 29 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRESSÃO ANUAL MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) NA BACIA DO IGUAÇU

FONTE: O autor (2013)

A variabilidade sazonal, ou ciclo anual, da pressão é mostrada na FIGURA 30 para três regiões distintas da bacia do Rio Iguaçu, a saber:

- 1) Entre as nascentes e a UHE Salto Caxias;
- 2) Entre as nascentes e a UHE Foz do Areia;
- 3) Entre a UHE Foz do Areia e a UHE Salto Caxias.

Vê-se que, pela FIGURA 30, a pressão ao longo do ano apresenta uma sazonalidade bem definida, com pressões altas no inverno e pressões baixas no verão.

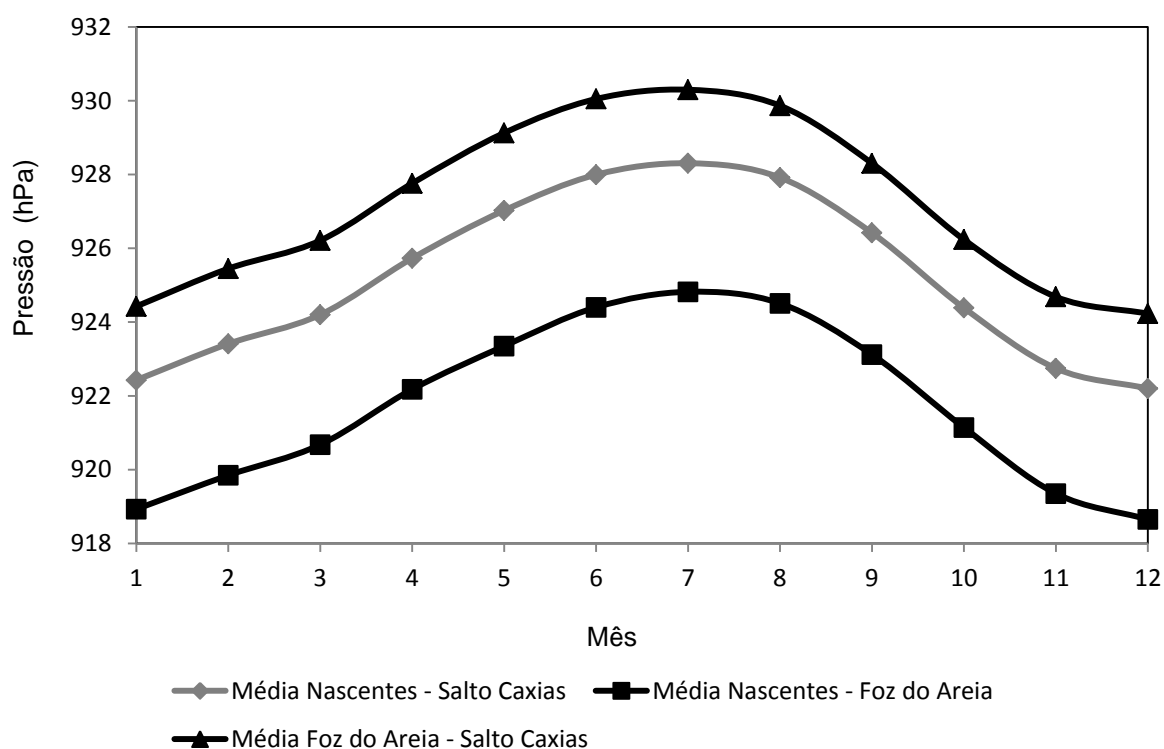


FIGURA 30 – CICLO ANUAL DA PRESSÃO NA BACIA DO RIO IGUAÇU, MÉDIA DAS ESTAÇÕES, PERÍODO 1998-2012

FONTE: O autor (2013)

É mostrado, na FIGURA 31, o histograma da pressão diária na estação meteorológica mais a Leste da Bacia do Iguaçu (Curitiba). O histograma consiste em um simples gráfico de barras, onde em abscissas têm-se os intervalos de classes e,

em ordenadas, as frequências relativas (*i.e.* número de ocorrências do intervalo dividido pelo número de ocorrências total de todos os intervalos).

A observação do histograma da FIGURA 31 mostra algumas características evidentes da amostra, tais como:

- 1) Maior frequência relativa da pressão no intervalo de classe (912-914) hPa;
- 2) Uma aparente simetria da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é praticamente igual à amplitude à esquerda;
- 3) Ocorrência isolada de pressões muito superiores e inferiores ao valor central (913,5 hPa).

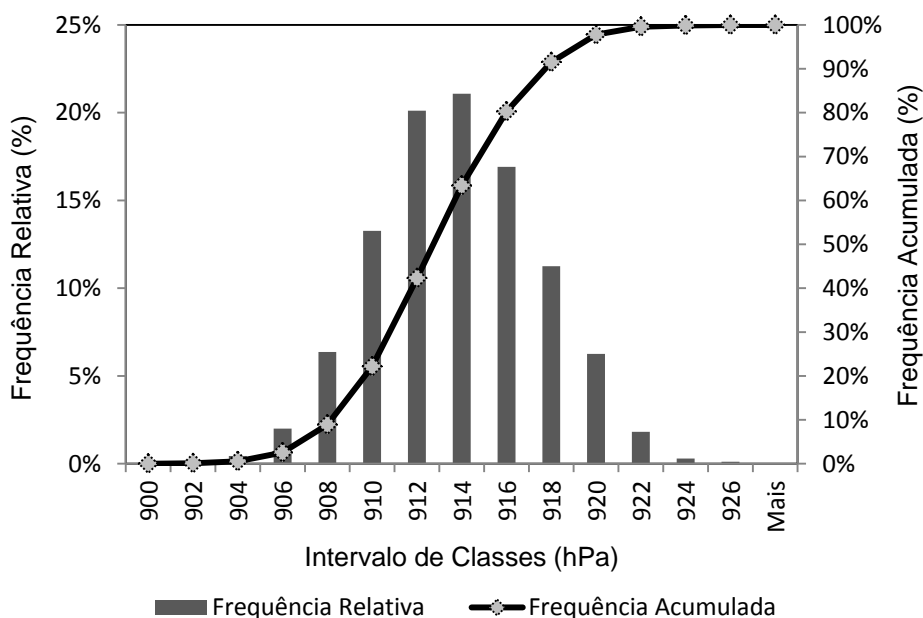


FIGURA 31 – HISTOGRAMA DA PRESSÃO DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012

FONTE: O autor (2013)

Seguindo o mesmo raciocínio, é mostrado, na FIGURA 32, o histograma da pressão diária na estação meteorológica mais a Oeste da Bacia do Iguaçu (Salto Caxias). A análise do histograma da FIGURA 32 salienta algumas características da amostra, como por exemplo:

1) Maior frequência relativa da pressão no intervalo de classe (962-964) hPa;

2) Uma leve assimetria positiva da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é um pouco maior do que a amplitude à esquerda;

3) Ocorrência isolada de pressões muito superiores e inferiores ao valor central (962,2 hPa).

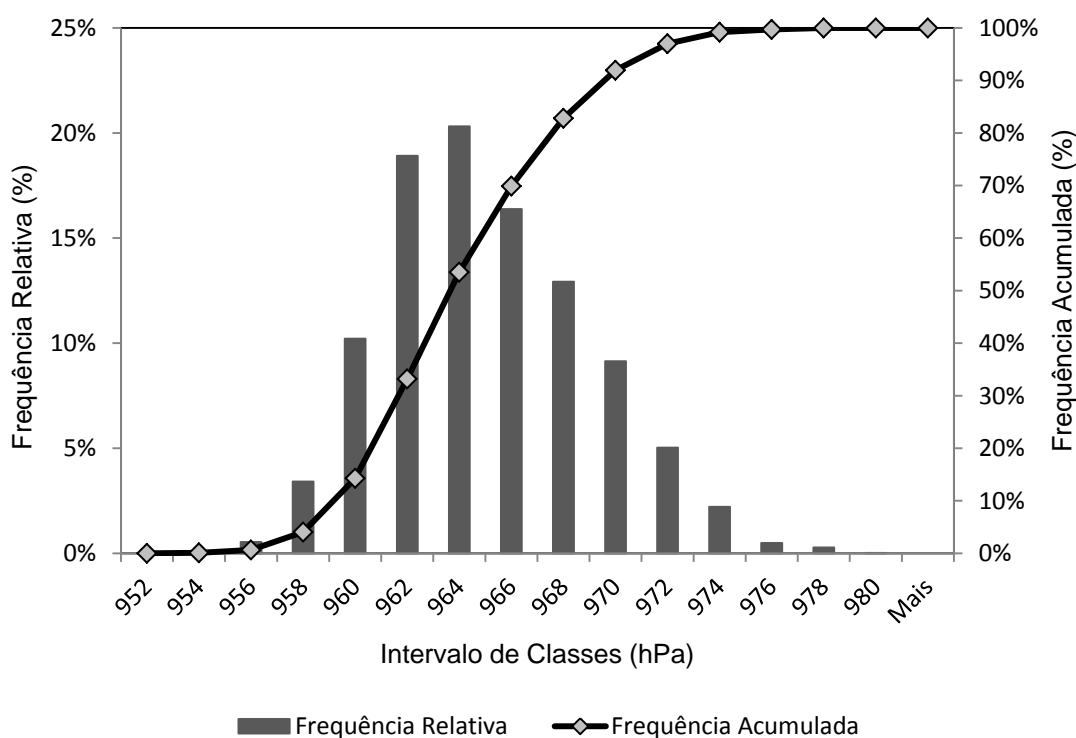


FIGURA 32 – HISTOGRAMA DA PRESSÃO DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 2000 A 2012

FONTE: O autor (2013)

4.1.2 TEMPERATURA

A TABELA 14 resume os valores anuais médios de longo período da temperatura para todas as estações meteorológicas do SIMEPAR, assim como quais foram as que apresentaram maior ou menor porcentagem de falhas.

TABELA 14 - TEMPERATURA MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT) DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR, NO SENTIDO DE OESTE PARA LESTE NA BACIA

ESTAÇÃO	PERÍODO	MLT (°C)	% DE FALHAS	MÁX MENSAL	MÍN MENSAL
Curitiba	1998-2012	17,84	1,50	23,21	11,26
Lapa	1998-2012	17,46	0,29	22,63	10,60
União da Vitória	1998-2012	17,75	0,24	23,40	9,19
Entre Rios	2001-2012	16,82	0,96	21,46	10,11
Guarapuava	1998-2012	17,48	3,92	22,01	10,20
Foz do Areia	1998-2012	18,39	0,80	23,30	10,00
Palmas	1999-2012	16,53	1,82	23,30	9,27
Pato Branco	1998-2012	19,30	1,93	23,69	11,50
Salto Osório	2000-2012	20,67	0,86	25,36	12,76
Nova Prata do Iguaçu	1998-2006	20,39	0,55	25,21	12,75
Salto Caxias	2000-2012	21,31	1,22	26,08	13,41

FONTE: O autor (2013)

Pode-se perceber, pela análise da TABELA 14, que a temperatura possui um gradiente de variação positivo no sentido Leste-Oeste, ou seja, com regiões mais quentes no Oeste e regiões mais frias no Leste da bacia. A FIGURA 35 mostra o mapa da variabilidade espacial da temperatura na bacia e a FIGURA 36 o seu ciclo anual.

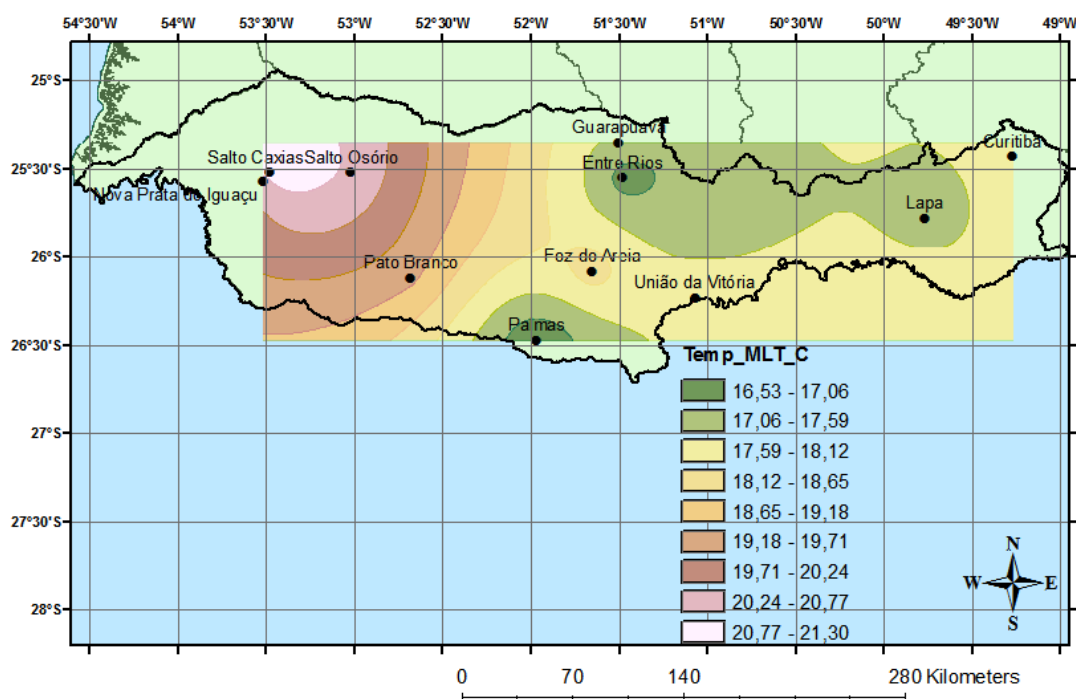


FIGURA 33 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA TEMPERATURA ANUAL MÉDIA DE LONGO TERMO NA BACIA DO IGUAÇU

FONTE: O autor (2013)

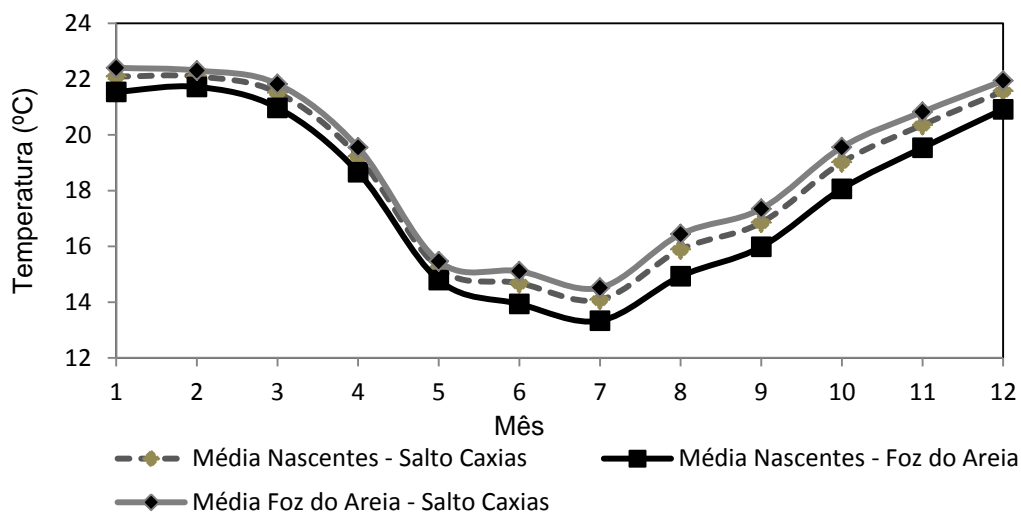


FIGURA 34 – CICLO ANUAL DA TEMPERATURA NA BACIA DO RIO IGUAÇU, PERÍODO 1998-2012
 FONTE: O autor (2013)

É mostrado, na FIGURA 35, o histograma da temperatura diária na estação meteorológica mais a Leste da Bacia do Iguaçu (Curitiba), cuja observação evidencia algumas características da amostra, a saber:

- 1) Maior frequência relativa da temperatura no intervalo de classe (16-18 °C);
- 2) Uma assimetria negativa da distribuição de frequências, pois a amplitude à esquerda do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à direita;
- 3) Ocorrência isolada de temperaturas muito superiores e inferiores ao valor central (17,67 °C).

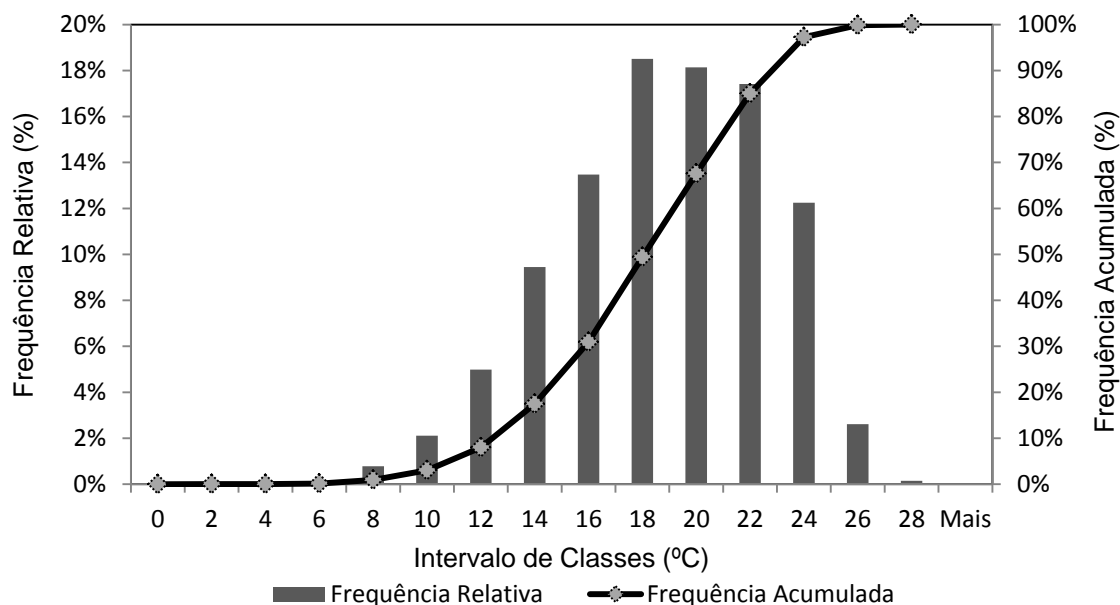


FIGURA 35 - HISTOGRAMA DA TEMPERATURA DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012
 FONTE: O autor (2013)

Seguindo a mesma lógica, é mostrado, na FIGURA 36, o histograma da temperatura diária na estação meteorológica mais a Oeste da Bacia do Iguaçu (Salto Caxias), a partir da qual se podem perceber algumas características da amostra, tais como:

- 1) Maior frequência relativa da temperatura no intervalo de classe (24-26 °C);
- 2) Uma assimetria negativa da distribuição de frequências, pois a amplitude à esquerda do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à direita;
- 3) Ocorrência isolada de temperaturas muito superiores e inferiores ao valor central (24,52 °C).

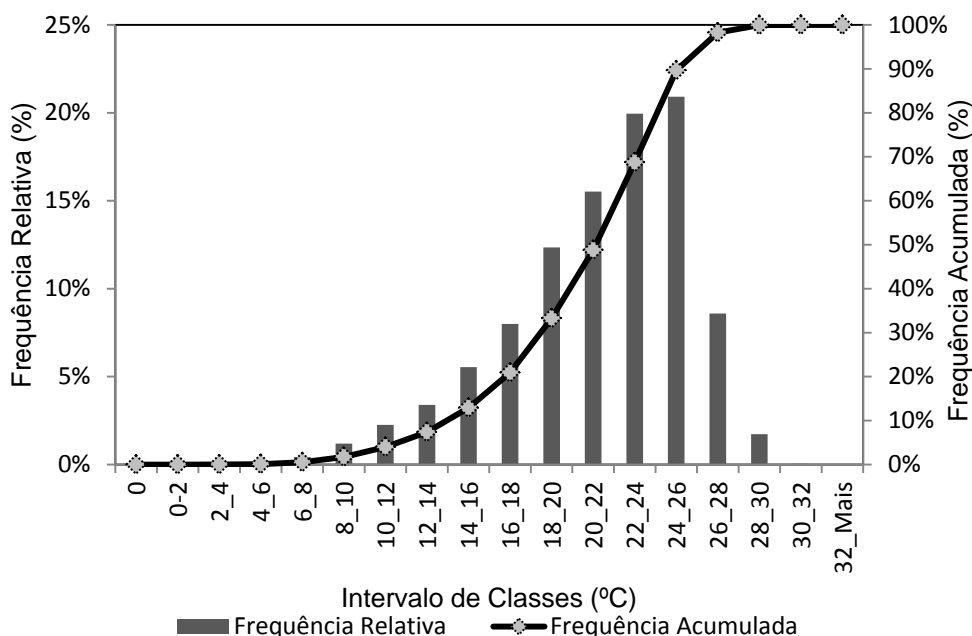


FIGURA 36– HISTOGRAMA DA TEMPERATURA DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 2000 A 2012

FONTE: O autor (2013)

4.1.3 UMIDADE RELATIVA

A TABELA 15 resume os valores anuais médios de longo período da umidade relativa para todas as estações meteorológicas do SIMEPAR, assim como quais foram as que apresentaram maior ou menor porcentagem de falhas.

TABELA 15 – UMIDADE RELATIVA MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT) DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR, NO SENTIDO DE OESTE PARA LESTE NA BACIA

ESTAÇÃO	PERÍODO	MLT (%)	% DE FALHAS	MÁX MENSAL (%)	MÍN MENSAL (%)
Curitiba	1998-2012	79,64	1,51	89,88	69,85
Lapa	1998-2012	86,34	0,31	96,65	71,47
União da Vitória	1998-2012	83,30	0,22	92,46	71,46
Entre Rios	2001-2012	81,12	0,98	95,85	68,26
Guarapuava	1998-2012	81,06	3,92	93,56	64,39
Foz do Areia	1998-2012	79,28	0,78	89,90	67,90
Palmas	1999-2012	79,83	1,80	93,18	66,81
Pato Branco	1998-2012	76,73	2,10	91,79	61,99
Salto Osório	2000-2012	79,93	0,86	92,97	61,84
Nova Prata do Iguaçu	1998-2006	74,94	0,70	88,73	53,26
Salto Caxias	2000-2012	77,84	1,24	95,22	60,83

FONTE: O autor (2013)

Observa-se, pela análise da TABELA 15, que a variabilidade espacial da umidade relativa comporta-se de maneira desigual, com valores altos tanto na parte Leste (e.g. Lapa) como na Oeste (e.g. Salto Osório). A FIGURA 37 mostra, em um mapa georreferenciado, a variabilidade espacial da umidade relativa do ar na bacia.

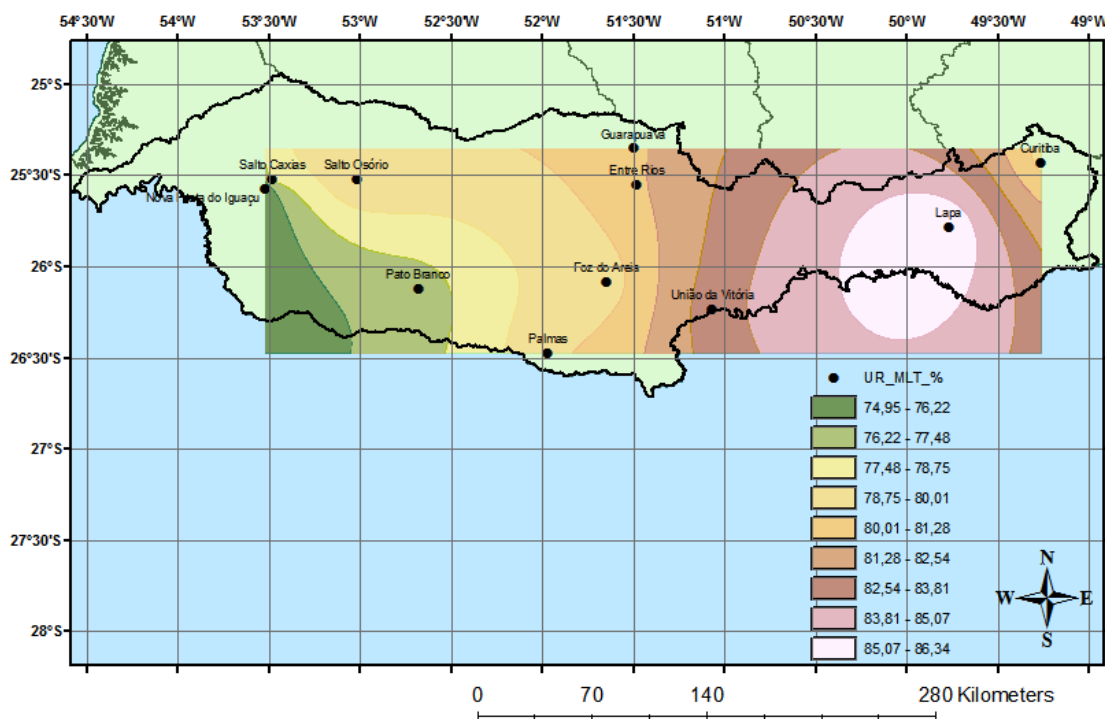


FIGURA 37 - VARIABILIDADE ESPACIAL DA UMIDADE RELATIVA ANUAL MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) NA BACIA DO IGUAÇU
 FONTE: O autor (2013)

A variabilidade sazonal da umidade relativa é mostrada na FIGURA 38. Percebe-se que a umidade relativa ao longo do ano não apresenta uma sazonalidade definida, com valores altos tanto no verão como no inverno, e com valores mais baixos na primavera.

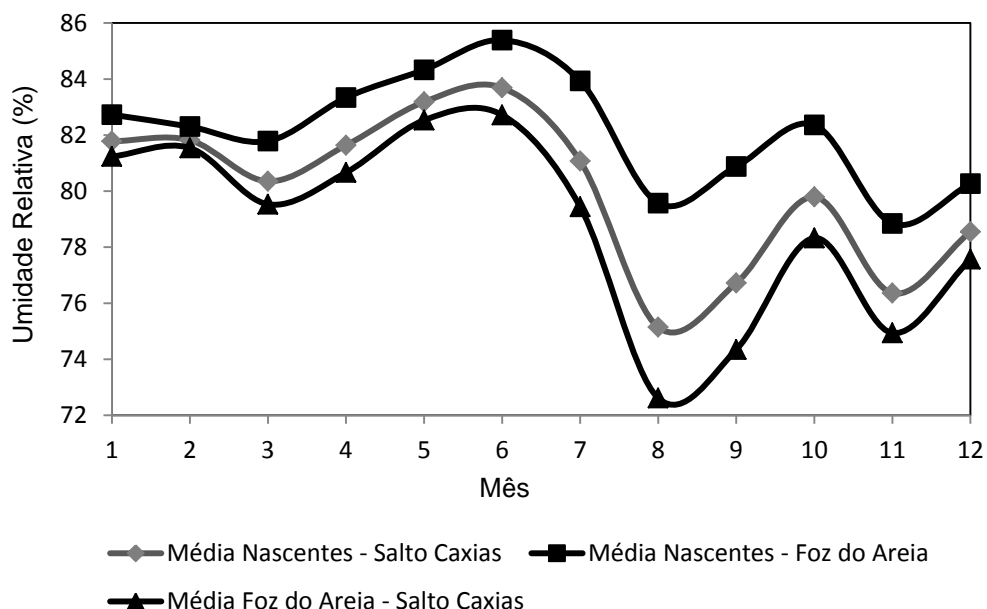


FIGURA 38 – CICLO ANUAL DA UMIDADE RELATIVA DO AR NA BACIA DO RIO IGUAÇU, PERÍODO 1998-2012
 FONTE: O autor (2013)

É mostrado, na FIGURA 39, o histograma da umidade relativa diária na estação meteorológica mais a Leste da Bacia do Iguaçu (Curitiba), cuja análise salienta algumas características da amostra, tais como:

- 1) Maior frequência relativa da umidade no intervalo de classe (78-83%);
- 2) Uma assimetria negativa da distribuição de frequências, pois a amplitude à esquerda do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à direita;
- 3) Ocorrência isolada de umidades muito superiores e inferiores ao valor central (80,5%).

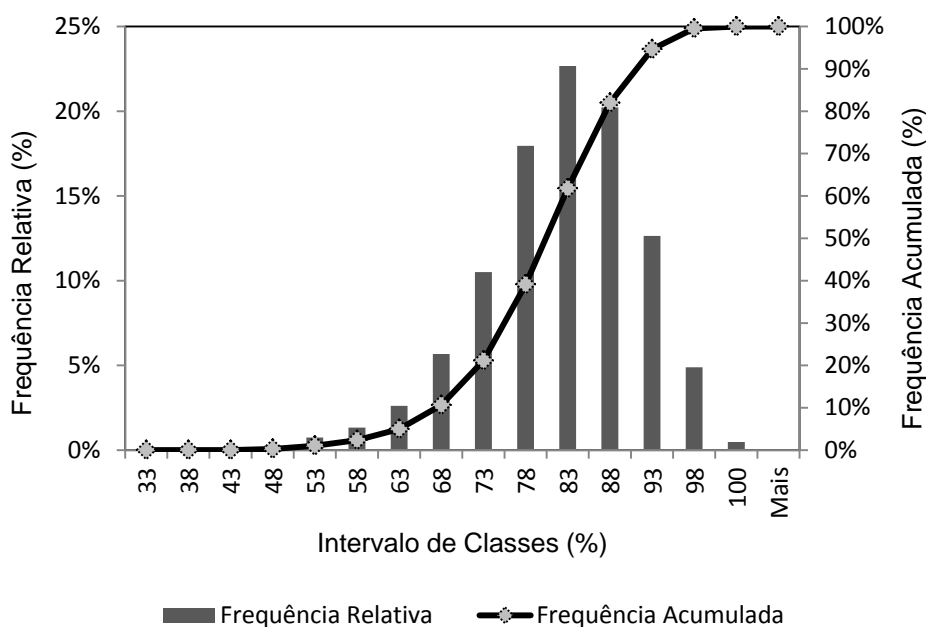


FIGURA 39 - HISTOGRAMA DA UMIDADE RELATIVA DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012

FONTE: O autor (2013)

Seguindo a mesmo raciocínio, é mostrado, na FIGURA 40, o histograma da umidade relativa diária na estação meteorológica mais a Oeste da Bacia do Iguaçu (Salto Caxias), a partir da qual se podem constatar algumas características da amostra, tais como:

- 1) Maior frequência relativa da umidade no intervalo de classe (78-83%);
- 2) Uma assimetria negativa da distribuição de frequências, pois a amplitude à esquerda do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à direita;
- 3) Ocorrência isolada de umidades muito superiores e inferiores ao valor central (80,5%).

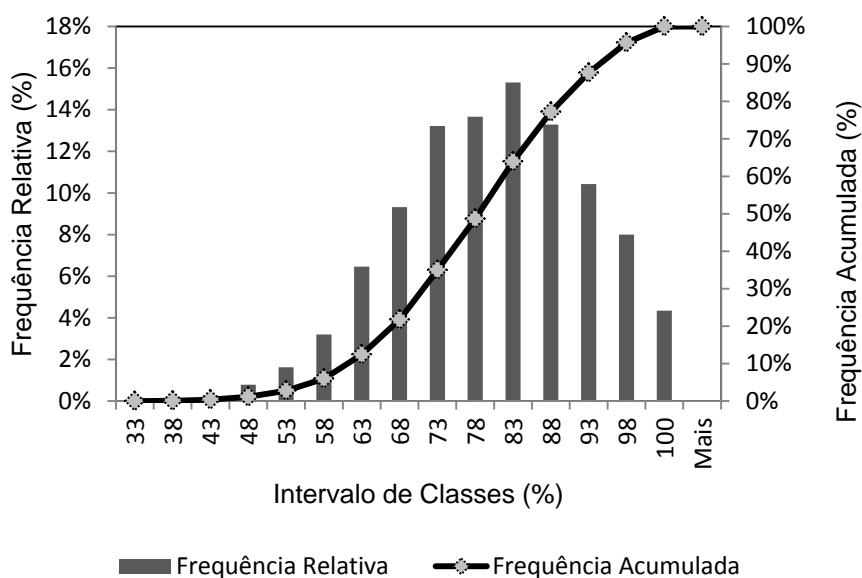


FIGURA 40 - HISTOGRAMA DA UMIDADE RELATIVA DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 2000 A 2012

FONTE: O autor (2013)

4.1.4 RADIAÇÃO SOLAR

A TABELA 16 resume os valores anuais médios de longo período da radiação solar para as estações meteorológicas do SIMEPAR, assim como quais foram aquelas estações que apresentaram maior ou menor porcentagem de falhas.

TABELA 16 – RADIAÇÃO SOLAR MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT) DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR, NO SENTIDO DE OESTE PARA LESTE

ESTAÇÃO	PERÍODO	MLT (W.m ⁻²)	% DE FALHAS	MÁX MENSAL (W.m ⁻²)	MÍN MENSAL (W.m ⁻²)
Curitiba	1998-2012	147,22	0,29	219,50	75,77
Lapa	1998-2012	170,75	1,64	240,97	94,41
União da Vitória	1998-2012	146,71	0,15	233,32	45,75
Entre Rios	2001-2012	201,08	1,07	276,28	112,86
Guarapuava	1998-2012	181,76	4,20	259,74	100,36
Foz do Areia	1998-2012	172,07	1,00	261,76	86,66
Palmas	1999-2012	172,83	1,97	277,52	53,51
Pato Branco	1998-2012	193,13	2,80	287,34	107,32
Salto Osório	2000-2012	191,39	3,79	296,18	101,81
Nova Prata do Iguaçu	1998-2006	204,03	0,70	301,21	114,69
Salto Caxias	2000-2012	197,74	1,43	294,03	99,69

FONTE: O autor (2013)

Pode-se constatar, pela análise da TABELA 16, que, com exceção da estação Entre Rios, as estações mais a Oeste da Bacia do Iguaçu apresentaram radiações mais altas, com destaque para a estação de Nova Prata do Iguaçu. A FIGURA 30 comprova essa constatação, onde é mostrada em um mapa georreferenciado a variabilidade espacial da radiação solar na bacia.

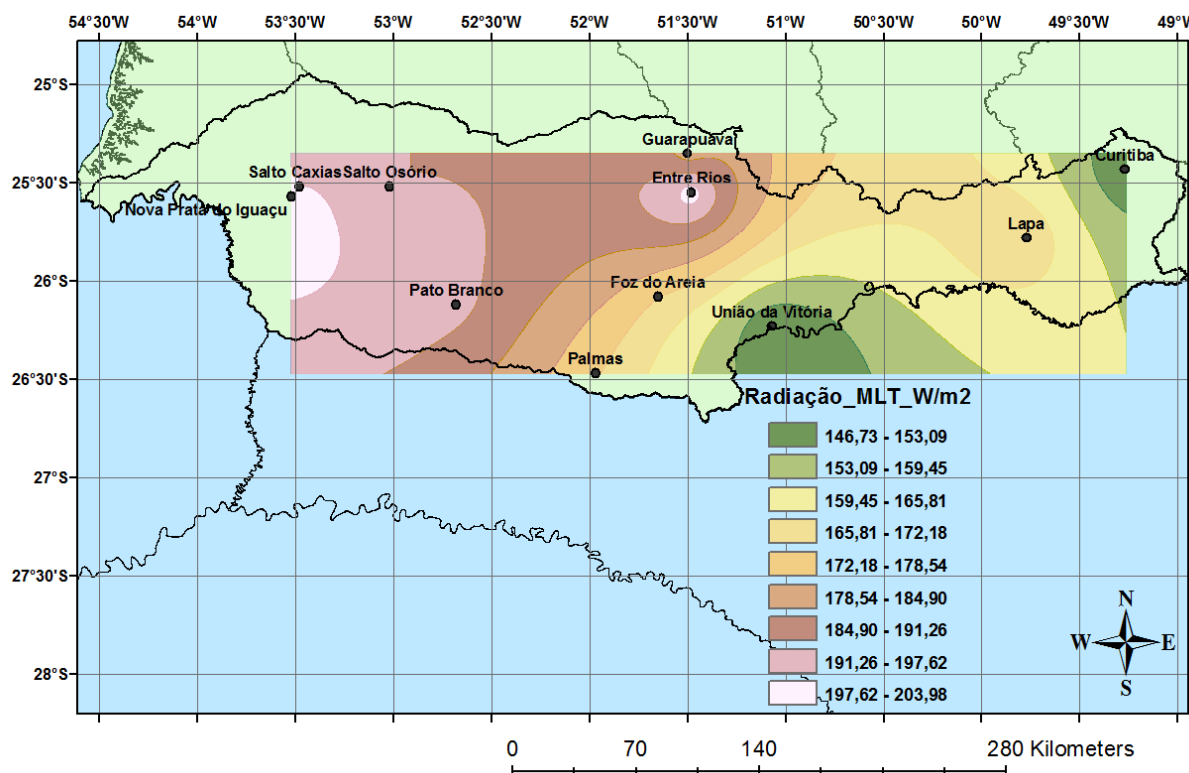


FIGURA 41 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA RADIAÇÃO SOLAR ANUAL MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) NA BACIA DO IGUAÇU
FONTE: O autor (2013)

A variabilidade sazonal da radiação é mostrada na FIGURA 42. Percebe-se que a radiação ao longo do ano apresenta uma sazonalidade razoavelmente definida, sendo reduzida no inverno e elevada no verão.

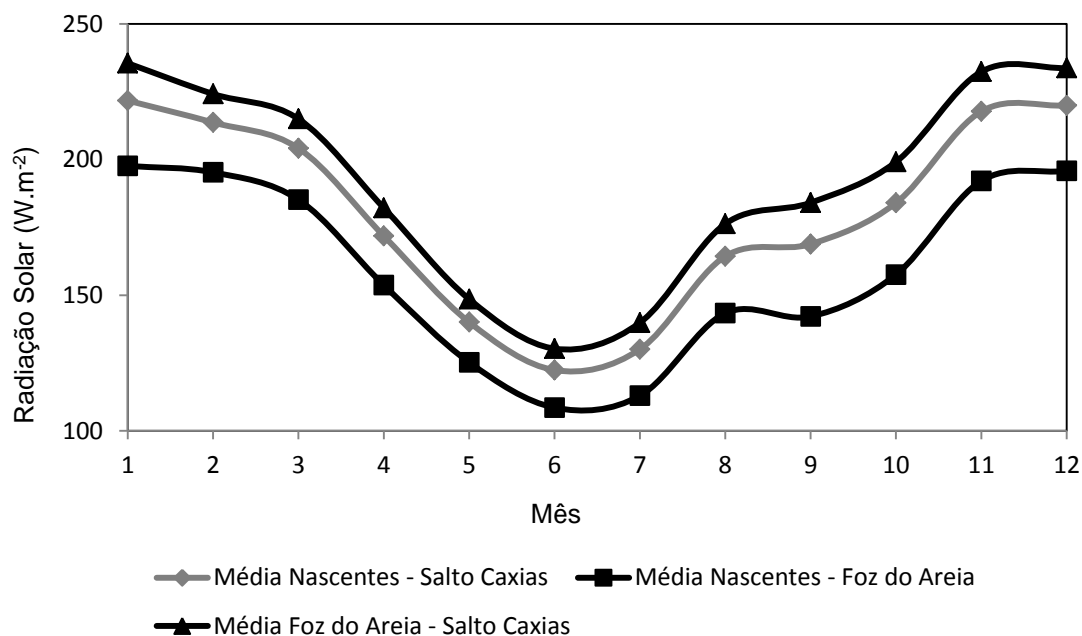


FIGURA 42 – CICLO ANUAL DA RADIAÇÃO SOLAR NA BACIA DO RIO IGUAÇU, PERÍODO 1998-2012
 FONTE: O autor (2013)

É mostrado, na FIGURA 43, o histograma da radiação solar diária na estação meteorológica mais a Leste da Bacia do Iguaçu (Curitiba), cuja observação evidencia algumas características da amostra, a saber:

- 1) Maior frequência relativa da radiação no intervalo de classe (143-178 $W.m^{-2}$);
- 2) Uma assimetria positiva da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à esquerda;
- 3) Ocorrência isolada de radiações muito superiores e inferiores ao valor central (160,5 $W.m^{-2}$).

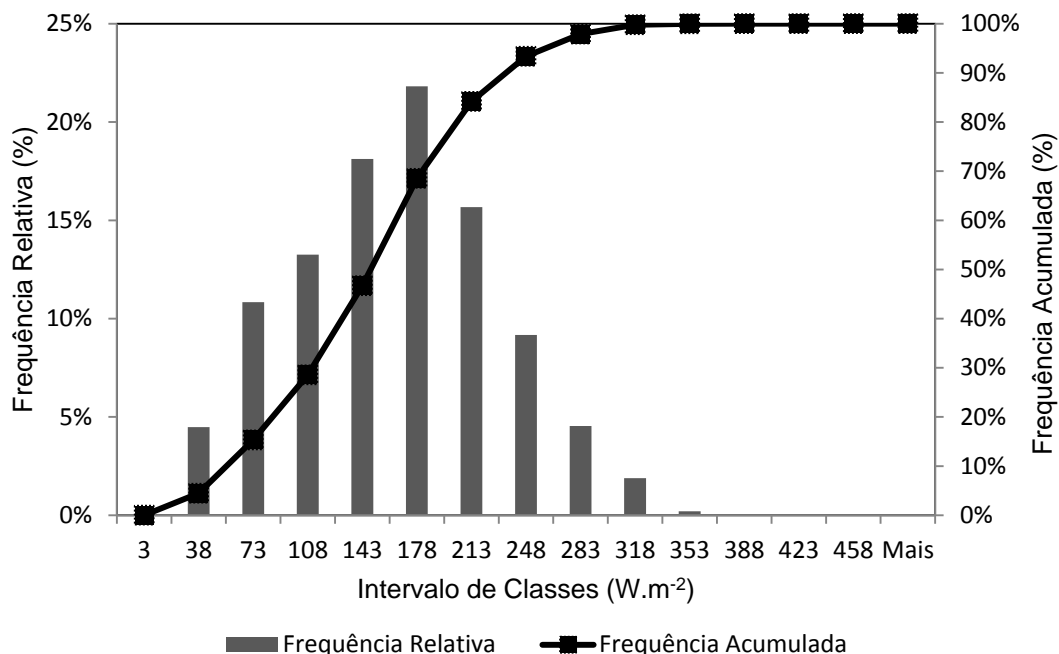


FIGURA 43 - HISTOGRAMA DA RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012

FONTE: O autor (2013)

Seguindo a mesma lógica, é mostrado, na FIGURA 44, o histograma da radiação diária na estação meteorológica mais a Oeste da Bacia do Iguaçu (Salto Caxias), a partir da qual se podem perceber algumas características da amostra, tais como:

- 1) Maior frequência relativa da radiação no intervalo de classe (178-213) $W.m^{-2}$;
- 2) Uma aparente simetria da distribuição de frequências, pois a amplitude à esquerda do bloco de maior frequência é igual à amplitude à direita;
- 3) Ocorrência isolada de radiações muito superiores e inferiores ao valor central (195,5 $W.m^{-2}$).

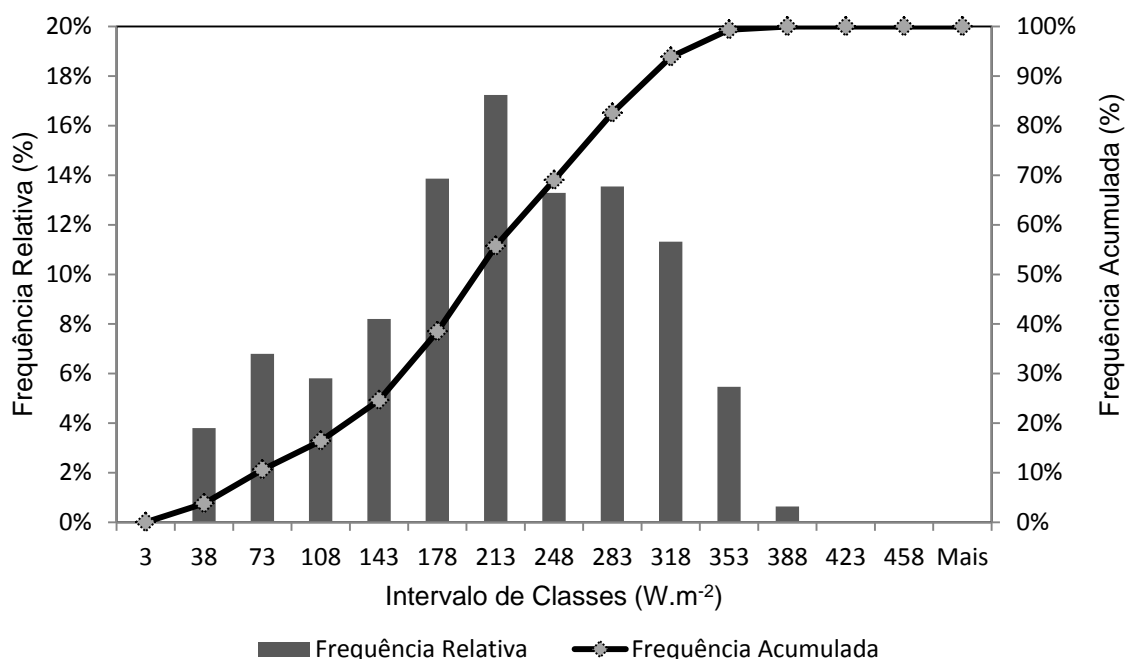


FIGURA 44 - HISTOGRAMA DA RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 2000 A 2012

FONTE: O autor (2013)

4.1.5 VELOCIDADE DO VENTO

A TABELA 17 resume os valores anuais médios de longo período da velocidade do vento para todas as estações meteorológicas do SIMEPAR, assim como suas respectivas porcentagens de falhas.

TABELA 17 – VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT) DO VENTO MEDIDO A 10M DE ALTURA, ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR, SENTIDO OESTE - LESTE

ESTAÇÃO	PERÍODO	MLT (m.s ⁻¹)	% DE FALHAS	MÁX MENSAL	MÍN MENSAL
Curitiba	1998-2012	2,09	0,24	3,41	1,58
Lapa	1998-2012	2,43	0,18	3,12	1,88
União da Vitória	1998-2012	1,61	0,11	2,26	1,00
Entre Rios	2001-2012	3,56	0,96	4,70	2,45
Guarapuava	1998-2012	3,00	3,92	4,28	2,00
Foz do Areia	1998-2012	2,77	1,68	4,45	0,39
Palmas	1999-2012	2,63	1,80	3,54	1,85
Pato Branco	1998-2012	2,52	1,93	3,44	1,88
Salto Osório	2000-2012	0,99	1,16	6,05	0,49
Nova Prata do Iguaçu	1998-2006	3,94	0,55	5,60	3,03
Salto Caxias	2000-2012	2,43	1,22	3,71	1,42

FONTE: O autor (2013)

Observa-se, pela análise da TABELA 17, que a variabilidade espacial da velocidade do vento comporta-se de maneira desigual, com valores altos tanto na parte central (e.g. Entre Rios) como na Oeste (e.g. Nova Prata do Iguaçu). A FIGURA 45 mostra, em um mapa georreferenciado, a variabilidade espacial da velocidade do vento na bacia.

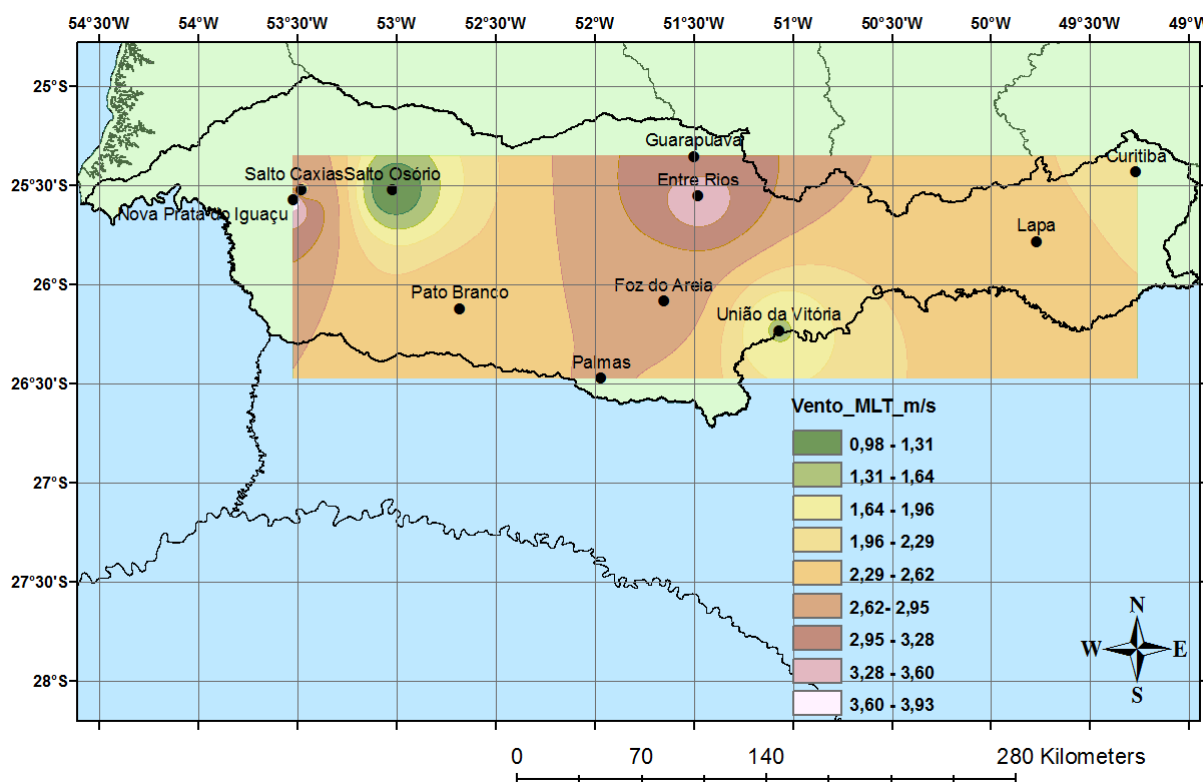


FIGURA 45 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA VELOCIDADE DO VENTO MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) NA BACIA DO RIO IGUAÇU

FONTE: O autor (2013)

A variabilidade sazonal da velocidade do vento é mostrada na FIGURA 46. Percebe-se que a velocidade do vento ao longo do ano não apresenta uma sazonalidade bem definida, com valores baixos entre o verão e o inverno e valores altos entre o inverno e a primavera.

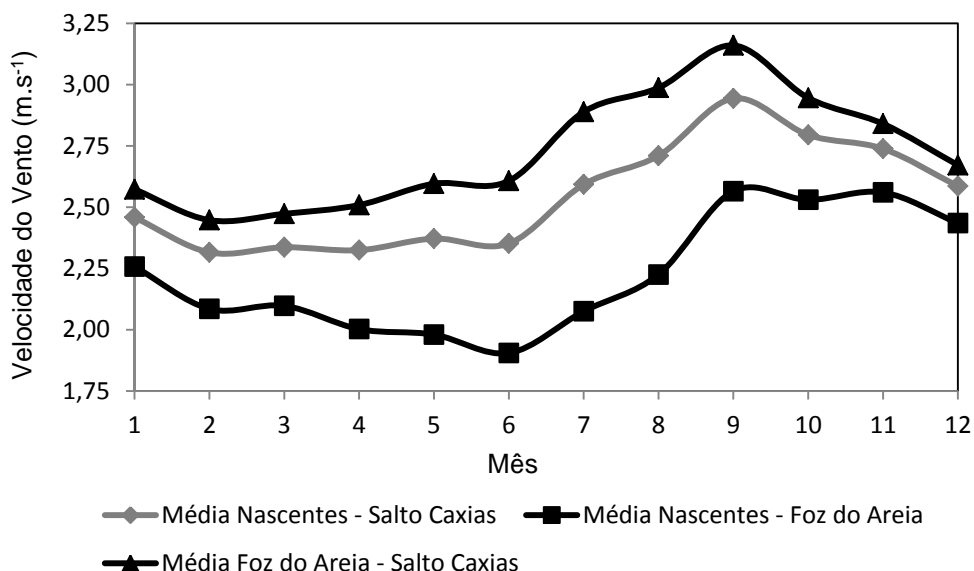


FIGURA 46 – CICLO ANUAL DA VELOCIDADE DO VENTO NA BACIA DO RIO IGUAÇU, PERÍODO 1998-2012

FONTE: O autor (2013)

É mostrado, na FIGURA 47, o histograma da velocidade do vento diária na estação meteorológica mais a Leste da Bacia do Iguaçu (Curitiba), cuja análise evidencia algumas características da amostra, tais como:

- 1) Maior frequência relativa da velocidade do vento no intervalo de classe (1,5-2,5) m.s⁻¹;
- 2) Uma assimetria positiva da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à esquerda;
- 3) Ocorrência isolada de ventos muito superiores ao valor central (2m.s⁻¹).

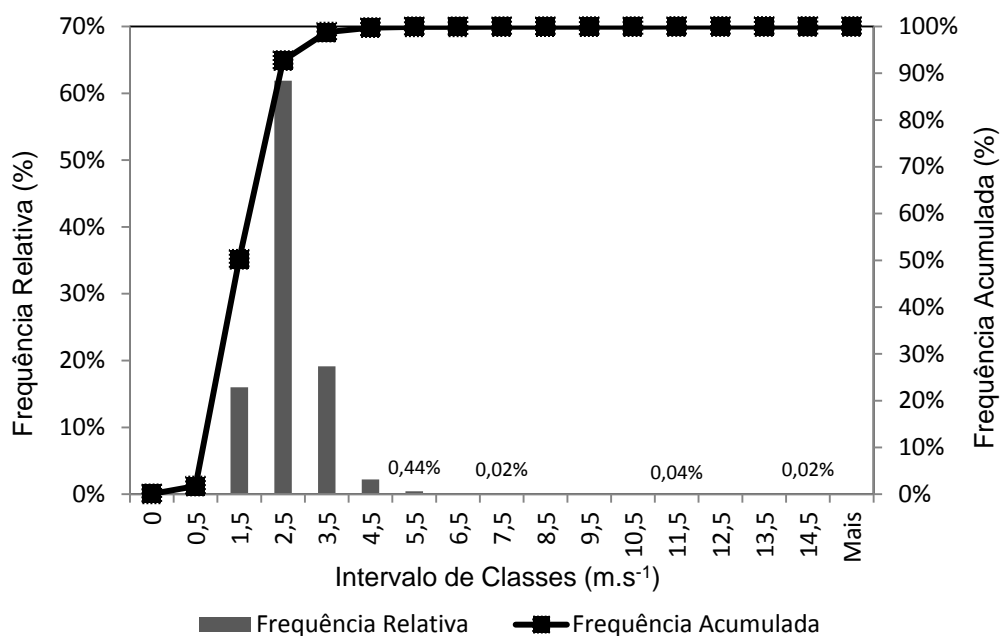


FIGURA 47 - HISTOGRAMA DA VELOCIDADE DO VENTO DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012
 FONTE: O autor (2013)

Seguindo a mesma lógica, é mostrado, na FIGURA 48, o histograma da velocidade do vento diária na estação meteorológica mais a Oeste da Bacia do Iguaçu (Salto Caxias), a partir da qual se podem constatar algumas características da amostra, tais como:

- 1) Maior frequência relativa da velocidade do vento no intervalo de classe (1,5-2,5) m.s⁻¹;
- 2) Uma assimetria positiva da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à esquerda;
- 3) Não há ocorrência isolada de ventos muito superiores e inferiores ao valor central (2 m.s⁻¹).

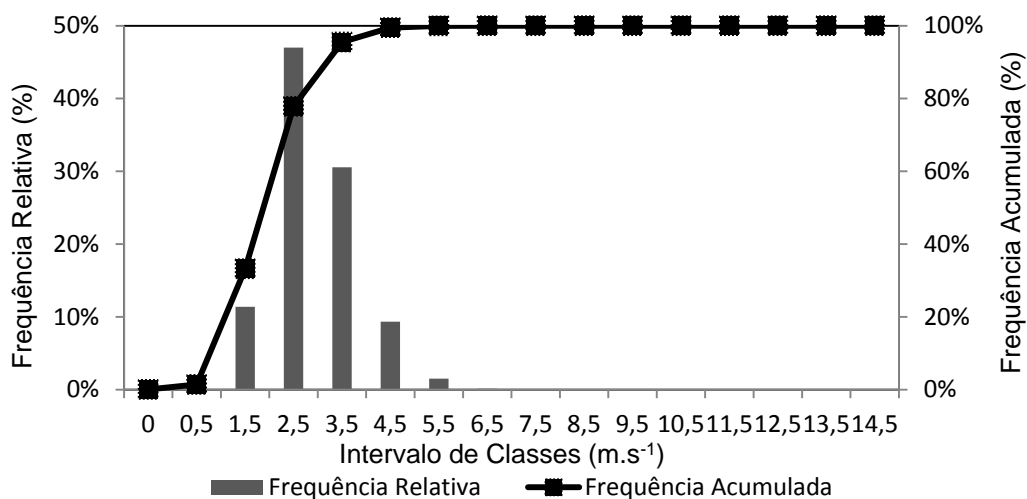


FIGURA 48 - HISTOGRAMA DA VELOCIDADE DO VENTO DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 2000 A 2012)
FONTE: O autor (2013)

4.2 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Após ter sido feita a análise dos dados meteorológicos, computou-se a evapotranspiração de referência. A TABELA 18 ilustra os valores anuais médios de longo período da evapotranspiração de referência para todas as estações meteorológicas do SIMEPAR, assim como ilustra quais foram as que apresentaram maior ou menor porcentagem de falhas.

TABELA 18 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA MÉDIA ANUAL DE LONGO TERMO (MLT), ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SIMEPAR

ESTAÇÃO	PERÍODO	MLT (mm.ano ⁻¹)	% DE FALHAS	MÁX ANUAL (mm.ano ⁻¹)	MÍN ANUAL (mm.ano ⁻¹)
Curitiba	1998-2012	1575,9	1,68	1743,4	1449,6
Lapa	1998-2012	1688,4	1,77	1789,6	1563,1
União da Vitória	1998-2012	1492,4	1,06	1635,7	1331,9
Entre Rios	2001-2012	2087,6	1,35	2317,8	1875,8
Guarapuava	1998-2012	1911,9	4,70	2023,9	1773,3
Foz do Areia	1998-2012	1878,8	2,15	2004,0	1750,8
Palmas	1999-2012	1797,2	1,99	2056,5	1330,4
Pato Branco	1998-2012	2116,5	2,23	2268,3	1890,7
Salto Osório	2000-2012	1965,4	4,11	2037,7	1852,7
Salto Caxias	2000-2012	2213,8	2,27	2367,9	2033,3
Nova Prata do Iguaçu	1998-2006	2441,9	0,88	2675,4	2173,4

FONTE: O autor (2013)

Pode-se perceber, pela análise da TABELA 18, que a evapotranspiração de referência possui um gradiente de variação positivo no sentido Leste-Oeste, ou seja, no Oeste evapotranspira mais enquanto que no Leste da bacia evapotranspira menos. A FIGURA 49 ilustra o mapa da variabilidade espacial da evapotranspiração de referência na bacia.

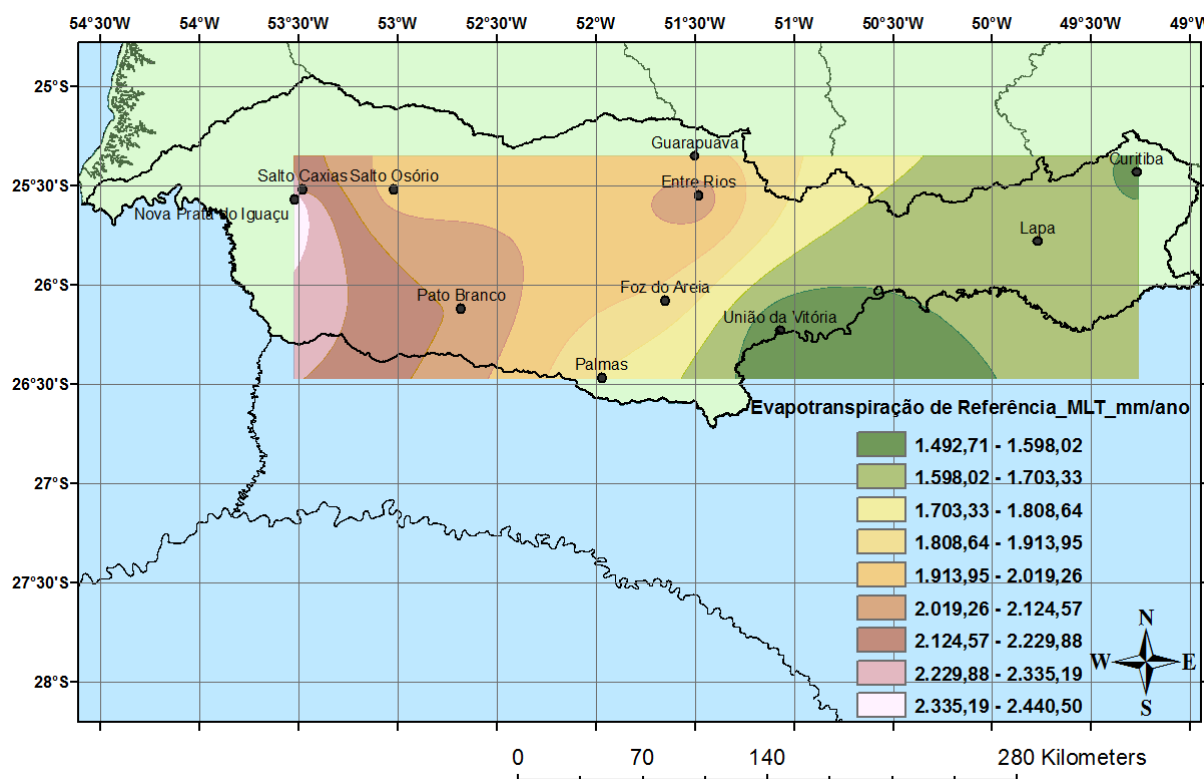


FIGURA 49- VARIABILIDADE ESPACIAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ANUAL MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) NA BACIA DO IGUAÇU

FONTE: O autor (2013)

A variabilidade sazonal da evapotranspiração de referência é mostrada na FIGURA 50. Percebe-se que ela apresenta uma sazonalidade razoavelmente bem definida, sendo reduzida no inverno e elevada no verão.

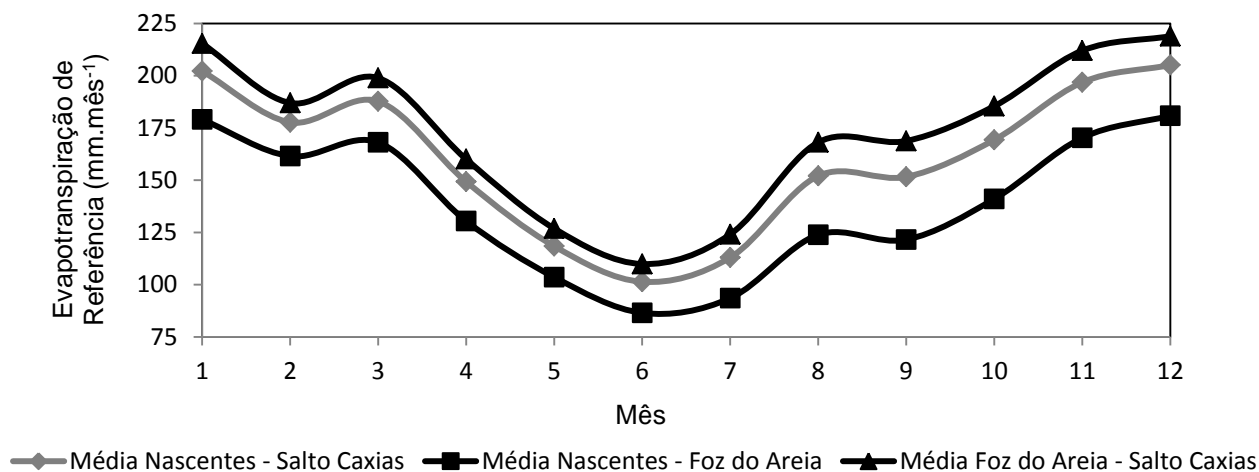


FIGURA 50 – CICLO ANUAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA BACIA DO RIO IGUAÇU
FONTE: O autor (2013)

É mostrado, na FIGURA 51, o histograma da evapotranspiração de referência diária na estação meteorológica mais a Leste da Bacia do Iguaçu (Curitiba).

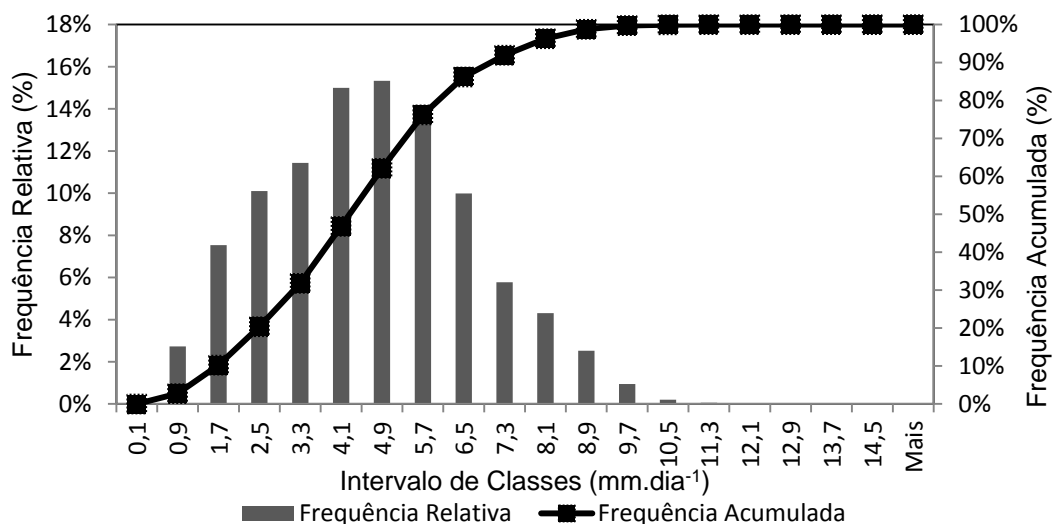


FIGURA 51 - HISTOGRAMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DIÁRIA EM CURITIBA (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1998 A 2012
FONTE: O autor (2013)

As principais características são:

- 1) Maior frequência relativa da evapotranspiração de referência no intervalo de classe (4,1-4,9 mm.dia⁻¹);

2) Uma assimetria positiva da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à esquerda;

3) Poucas ocorrências isoladas de evapotranspiração de referência muito superiores ao valor central ($4,5 \text{ mm.dia}^{-1}$).

A FIGURA 52 ilustra o histograma da evapotranspiração de referência diária na estação meteorológica mais a Oeste da Bacia do Iguaçu (Salto Caxias), cujas principais características são:

1) Maior frequência relativa da evapotranspiração de referência no intervalo de classe ($4,9-5,7$) mm.dia^{-1} ;

2) Uma assimetria positiva da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à esquerda;

3) Poucas ocorrências isoladas de evapotranspiração de referência muito superiores ao valor central ($5,3 \text{ mm.dia}^{-1}$).

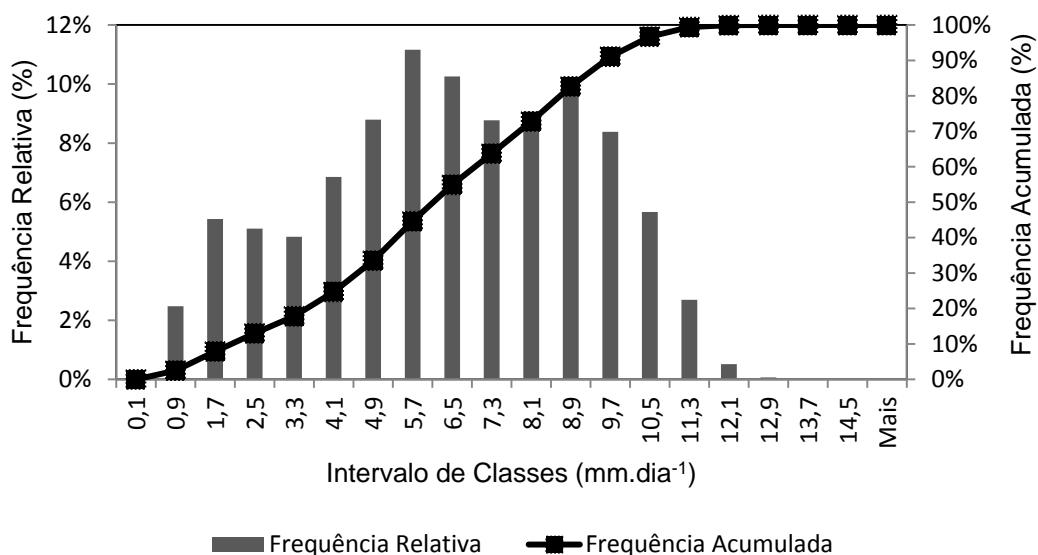


FIGURA 52 - HISTOGRAMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA EM SALTO CAXIAS (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 2000 A 2012

FONTE: O autor (2013)

4.3 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CHUVA OBSERVADA

Os resultados obtidos da variabilidade espaço-temporal da chuva observada foram subdivididos em duas seções. Na seção (4.3.1) é mostrada a variabilidade da chuva registrada nos pluviômetros da Agência Nacional de Águas, enquanto que na seção (4.3.2) é mostrada a variabilidade da chuva do GPCP.

4.3.1 PLUVIÔMETROS

A TABELA 19 ilustra os totais anuais precipitados médios de longo período da chuva observada nos pluviômetros da Agência Nacional de Águas (ANA).

TABELA 19 – TOTAL ANUAL PRECIPITADO MÉDIO DE LONGO TERMO (MLT) DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DA BACIA DO IGUAÇU, PERÍODO 1981-2010, NO SENTIDO DE OESTE PARA LESTE.

REGIÃO DA BACIA	ESTAÇÃO	MLT (mm.ano ⁻¹)	MÁX ANUAL (mm.ano ⁻¹)	ANO MÁX	MÍN ANUAL (mm.ano ⁻¹)	ANO MÍN
Entre Salto Caxias e Foz do Areia	2652009	2078,7	3243,4	1983	1039,5	1985
	2552000	1935,5	2699,9	1998	1236,3	1985
	2652012	2092,3	3283,3	1983	1240,3	1985
	2553004	1926,8	2837,6	1983	1245,3	1985
	2553012	2081,3	3245,8	1983	1102,1	1985
	2553005	2129,6	3244,5	1983	1342,5	1991
	2652013	2064,6	3605,0	1983	1241,3	2006
	2552001	2111,4	3133,4	1998	1237,3	1988
	2553010	1893,8	2907,4	1983	1285,3	2006
	2551000	1935,4	2661,8	1983	1265,0	1985
	2651015	2004,7	3131,4	1983	1131,6	1985
	2552005	1856,1	2772,1	1983	1255,4	2006
	2651013	1827,1	3118,0	1983	1044,9	1985
	2552008	2075,8	3055,3	1983	1154,3	1985
	2551010	1949,8	3168,4	1983	1262,1	1985
Entre Foz do Areia e as Nascentes	2651005	1780,4	3034,7	1983	1053,0	1985
	2651000	1740,3	2922,0	1998	1018,2	2006
	2550005	1644,4	2445,6	1998	959,6	2006
	2550001	1631,2	2385,0	1998	900,3	1985
	2650008	1682,1	2935,5	1983	1095,1	2006
	2649018	1546,3	2175,0	1983	916,9	1985
	2549004	1392,0	2062,3	1983	738,6	1988
	2549003	1548,1	2140,4	1990	1006,9	1985
	2549040	1331,0	2163,5	1998	755,7	1981
	2549061	1552,0	2125,7	1983	992,9	1985
2549000	1557,4	2505,5	1983	884,3	1985	

continua

REGIÃO DA BACIA	ESTAÇÃO	MLT (mm.ano ⁻¹)	MÁX ANUAL (mm.ano ⁻¹)	ANO MÁX	MÍN ANUAL (mm.ano ⁻¹)	ANO MÍN
Média Nascentes – Foz do Areia		1582,3				
Média Foz do Areia – Salto Caxias		1997,5				
Média Nascentes – Salto Caxias		1821,9				

continuação

FONTE: O autor (2013)

Pode-se perceber, pela análise da TABELA 19, que a chuva observada possui um gradiente de variação negativo no sentido Oeste-Leste, ou seja, no Oeste chove mais enquanto que no Leste da bacia chove menos. A FIGURA 53 comprova esse fato, onde é mostrada em um mapa georreferenciado a variabilidade espacial da chuva observada na bacia.

Na região da usina de Foz do Areia, percebe-se que a chuva varia entre 1890-2076 mm.ano⁻¹, enquanto que na região da usina de Salto Caxias, a chuva varia entre 1890-1983 mm.ano⁻¹. Na região da bacia compreendida entre as nascentes do Rio Iguaçu e a usina de Salto Caxias, a chuva média anual é de aproximadamente 1820 mm.ano⁻¹.

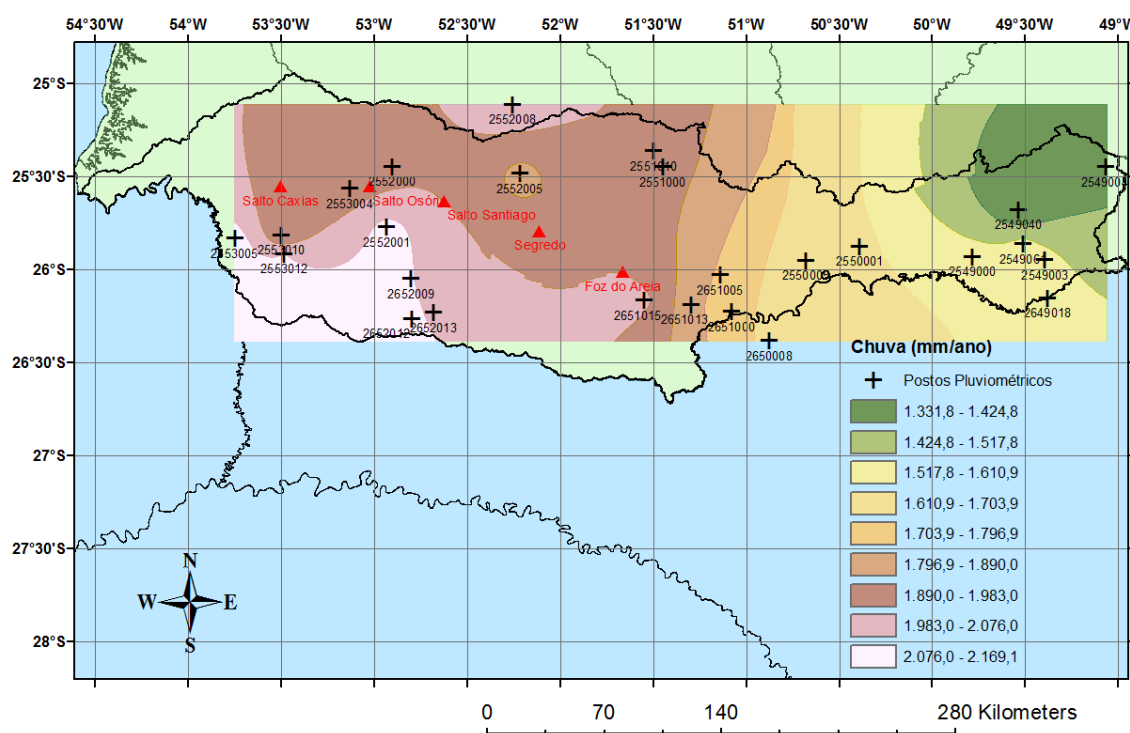


FIGURA 53 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA CHUVA OBSERVADA NA BACIA DO IGUAÇU

FONTE: O autor (2013)

A variabilidade sazonal, ou o ciclo anual, da chuva observada é mostrada na FIGURA 54. Percebe-se que ela não apresenta uma sazonalidade bem definida, com destaque para altas taxas de chuva em janeiro e baixas taxas em agosto.

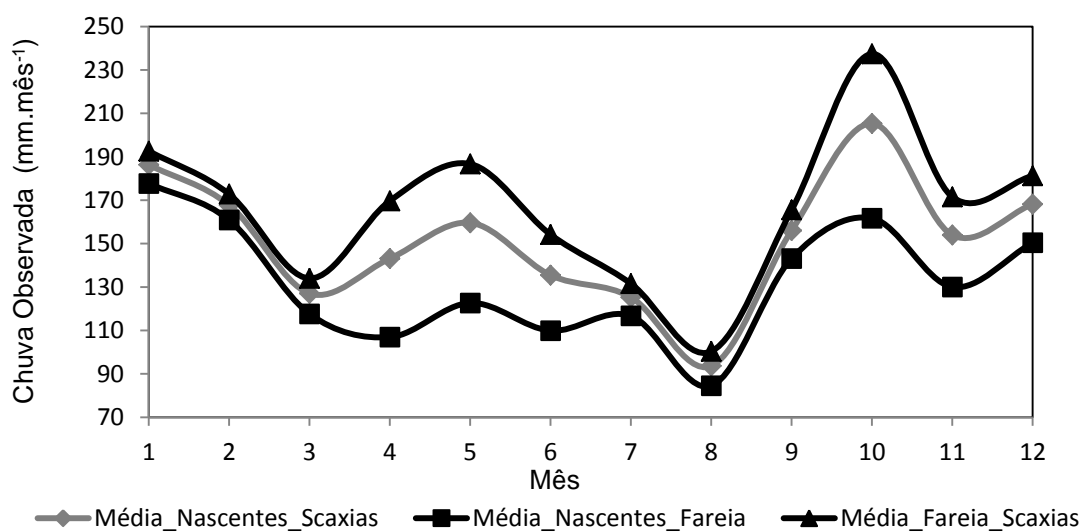


FIGURA 54- CICLO ANUAL DA CHUVA OBSERVADA NA BACIA DO RIO IGUAÇU, PERÍODO 1981-2010
 FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 55 ilustra o histograma do total anual precipitado na estação pluviométrica mais a Leste da Bacia do Iguaçu (2549004).

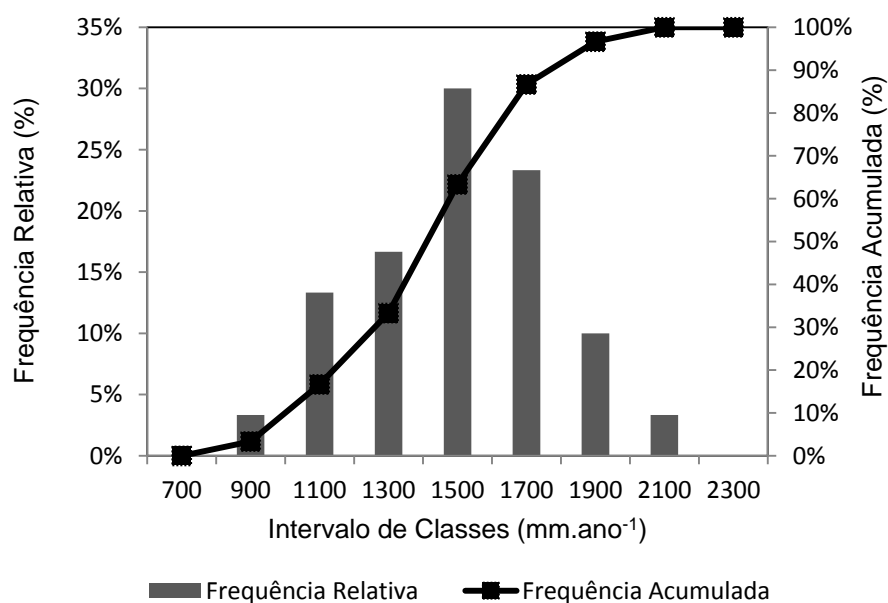


FIGURA 55 - HISTOGRAMA DO TOTAL ANUAL PRECIPITADO NA ESTAÇÃO 2549004 (ESTAÇÃO MAIS A LESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1981 A 2010
 FONTE: O autor (2013)

As principais características da chuva registrada nesse posto são:

- 1) Maior frequência relativa do total anual precipitado no intervalo de classe (1300-1500) mm.ano⁻¹;
- 2) Uma simetria da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é igual à amplitude à esquerda;
- 3) Nenhuma ocorrência isolada de total anual precipitado muito superiores ou inferiores ao valor central (1400 mm.ano⁻¹).

A FIGURA 56 mostra o histograma do total anual precipitado na estação pluviométrica mais a Oeste da Bacia do Iguaçu (2553005).

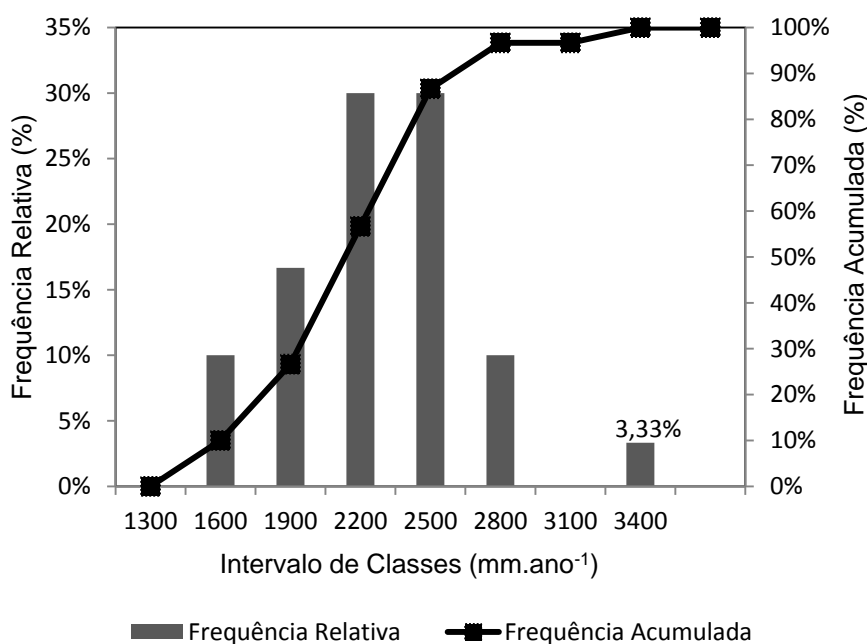


FIGURA 56 - HISTOGRAMA DO TOTAL ANUAL PRECIPITADO NA ESTAÇÃO 2553005 (ESTAÇÃO MAIS A OESTE DA BACIA DO IGUAÇU), PERÍODO 1981 A 2010

FONTE: O autor (2013)

As principais características da chuva registrada nesse posto são:

- 1) Maior frequência relativa do total anual precipitado no intervalo de classe (1900-2500) mm.ano⁻¹;
- 2) Uma leve assimetria positiva da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à

esquerda;

3) Uma ocorrência isolada do total anual precipitado muito superior ao valor central (2200 mm.ano^{-1}), correspondente ao ano chuvoso de 1983, em que choveu 3244,5 mm no ano.

4.3.2 GPCP

A FIGURA 57 ilustra a comparação entre a série temporal da chuva média mensal observada nos pluviômetros e a série temporal da chuva observada registrada pelo GPCP para a região entre as nascentes do Rio Iguaçu e a usina de Foz do Areia. Vê-se que a chuva registrada pelo GPCP não consegue representar a chuva do pluviômetro com a devida acurácia, pois a chuva do GPCP tende a subestimar a chuva registrada nos pluviômetros.

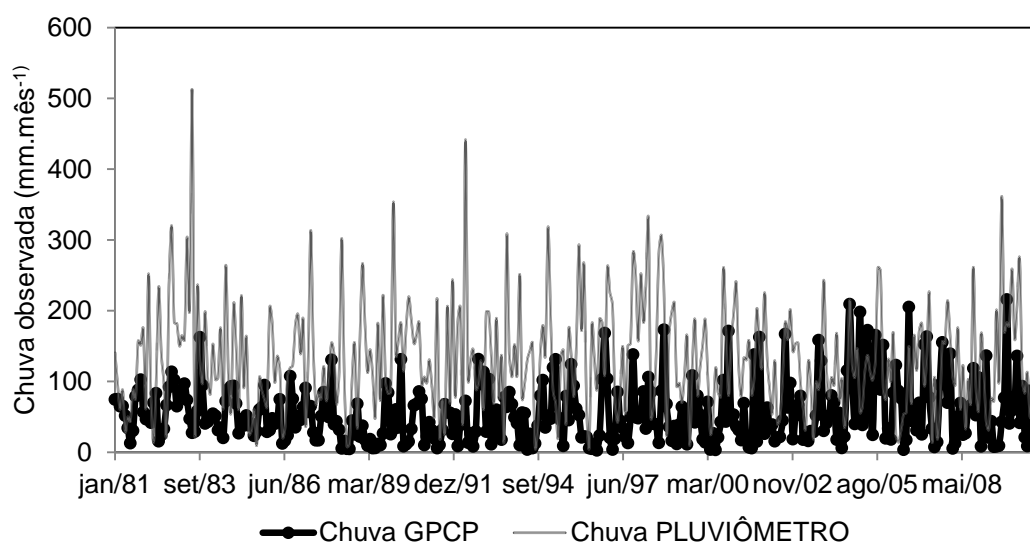


FIGURA 57 – COMPARAÇÃO ENTRE A CHUVA OBSERVADA NOS PLUVIÔMETROS E A DO GPCP, REGIÃO ENTRE AS NASCENTES E FOZ DO AREIA, 1981-2010

FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 58 faz a mesma análise da FIGURA 57, mas para a área da bacia entre a usina de Foz do Areia e a usina de Salto Caxias. Da mesma forma que a FIGURA 57, a FIGURA 58 remete à conclusão de que a chuva do GPCP é bastante divergente da chuva registrada nos pluviômetros.

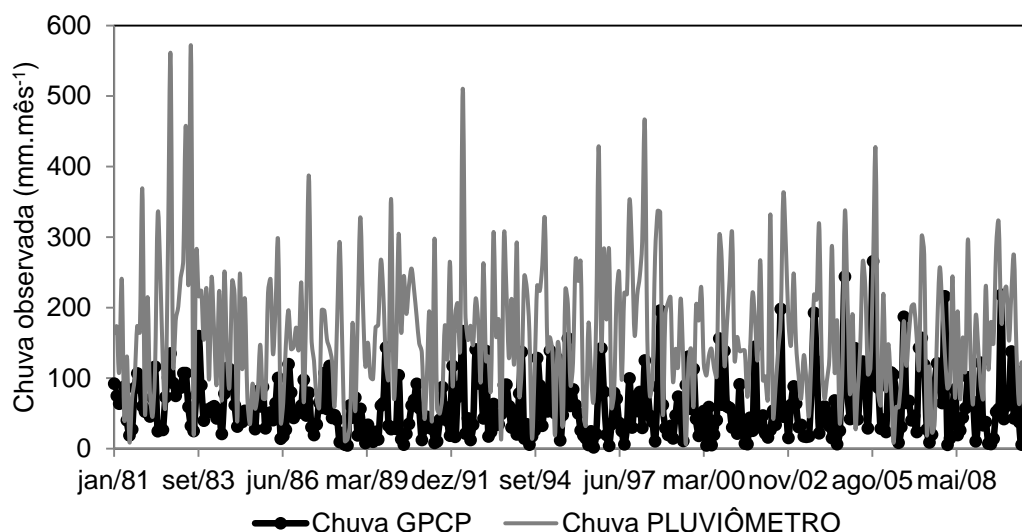


FIGURA 58 - COMPARAÇÃO ENTRE A CHUVA OBSERVADA NOS PLUVIÔMETROS E A DO GPCP, REGIÃO ENTRE FOZ DO AREIA E SALTO CAXIAS, 1981-2010

FONTE: O autor (2013)

A TABELA 20 mostra o total anual precipitado médio de longo termo da chuva observada registrada pelo GPCP, assim como mostra também quais foram os registros máximos e mínimos e seus respectivos anos de ocorrência.

TABELA 20 – MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) DA CHUVA OBSERVADA DO GPCP

PONTO	LAT (°)	LON (°)	INÍCIO	FIM	MLT (mm.ano ⁻¹)	MÁX ANUAL (mm.ano ⁻¹)	ANO MÁX	MÍN ANUAL (mm.ano ⁻¹)	ANO MÍN
1	-25,0	-50,0	1/1981	12/2010	610,1	1189,7	2005	303,0	1991
2	-25,0	-52,5	1/1981	12/2010	656,7	1114,7	2005	318,4	1991
3	-27,5	-50,0	1/1981	12/2010	730,9	1228,4	2005	366,6	1989
4	-27,5	-52,5	1/1981	12/2010	786,1	1183,5	2005	503,9	1991

FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 59 ilustra a comparação da variabilidade sazonal, ou ciclo anual, entre a chuva registrada pelos pluviômetros e a do GPCP para a região da bacia entre as nascentes do Iguaçu e a UHE Foz do Areia e entre a UHE Foz do Areia e a UHE Salto Caxias. Pode-se constatar novamente que a chuva do GPCP subestimou a chuva dos pluviômetros.

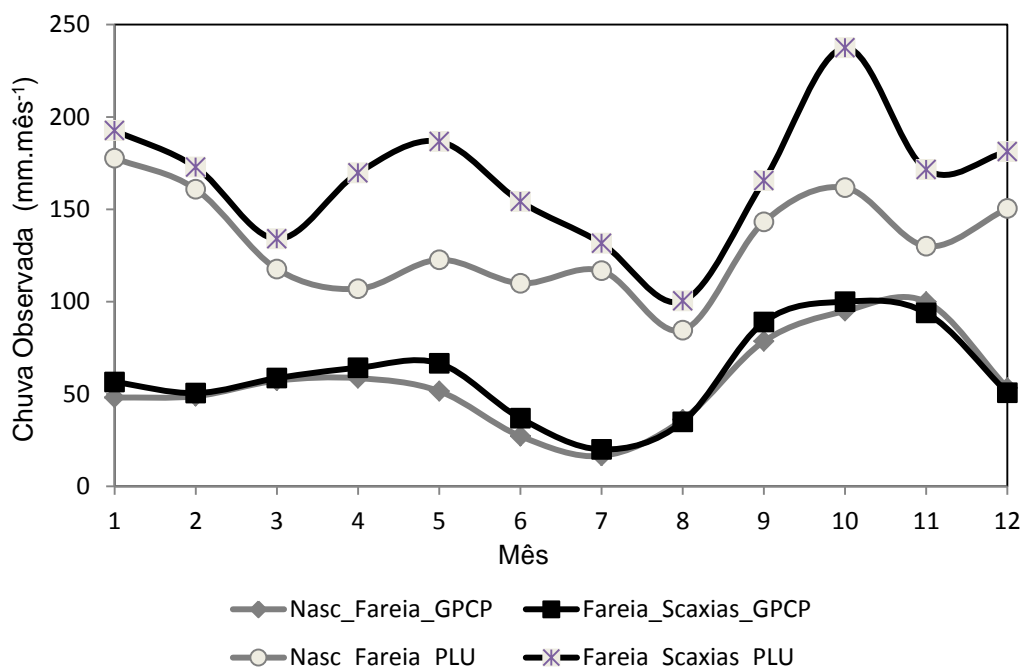


FIGURA 59 – COMPARAÇÃO DA VARIABILIDADE SAZONAL (CICLO ANUAL) ENTRE A CHUVA OBSERVADA DO GPCP E A CHUVA OBSERVADA NOS PLUVIÔMETROS, PERÍODO 1981-2010

Fonte: O autor (2013)

4.4 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA VAZÃO NATURAL OBSERVADA

A FIGURA 60 e a FIGURA 61 ilustram, respectivamente, a variabilidade temporal da vazão natural média anual em Foz do Areia e Salto Caxias. As séries de vazão natural do ONS são referentes ao período de 1931 a 2010. O período de verificação das previsões de vazão, 1981-2005, está destacado com a linha preta mais grossa.

Analisando primeiramente a FIGURA 60, nota-se que a vazão máxima anual da série histórica em Foz do Areia ocorreu em 1983, com $1527 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, e o mínimo foi registrado em 1933, com $249 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Para o período em que será analisada a previsão de vazão (1981-2005), o máximo anual foi observado em 1983, com $1527 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, e o mínimo em 1985 com $290 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. O período de verificação da previsão de vazão apresenta evento úmido e seco com a mesma ordem de grandeza próxima dos eventos seco e úmido da série histórica.

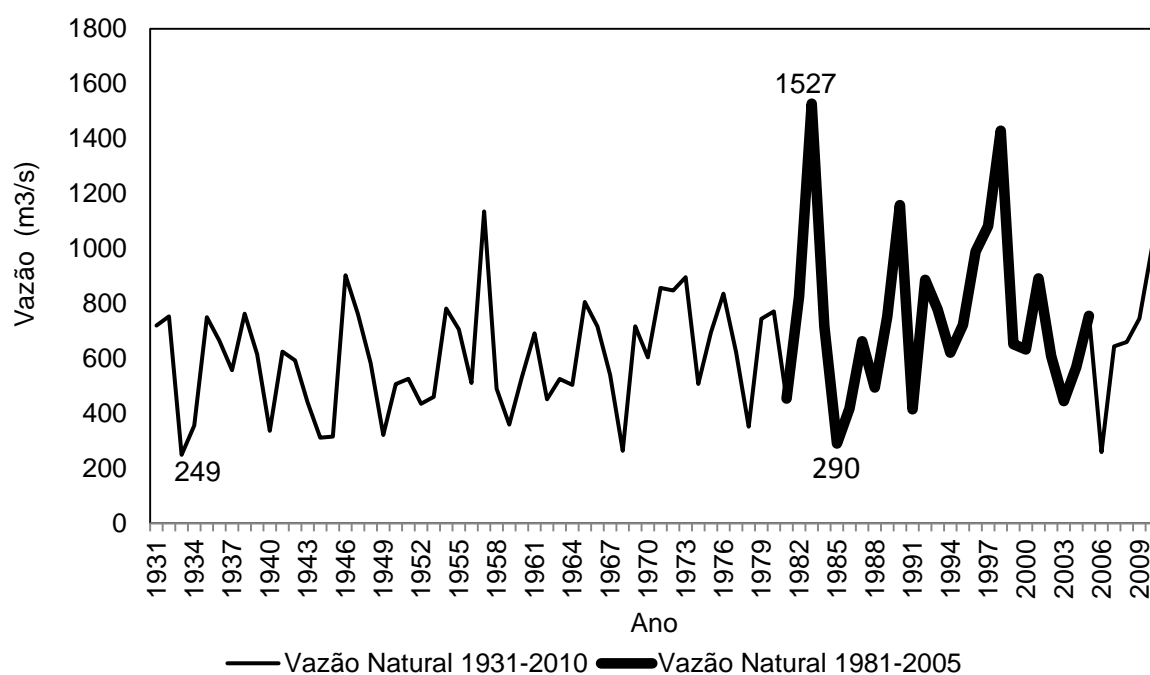


FIGURA 60 –VAZÃO NATURALIZADA MÉDIA ANUAL EM FOZ DO AREIA
 FONTE: O autor (2013)

Analisando a FIGURA 61, percebe-se que a vazão máxima anual da série histórica em Salto Caxias ocorreu também em 1983, com $3425 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e o mínimo foi registrado em 1933, com $451 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Para o período em que será analisada a previsão de vazão, o máximo anual foi observado também em 1983, com $3425 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e o mínimo em 1985 com $668 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

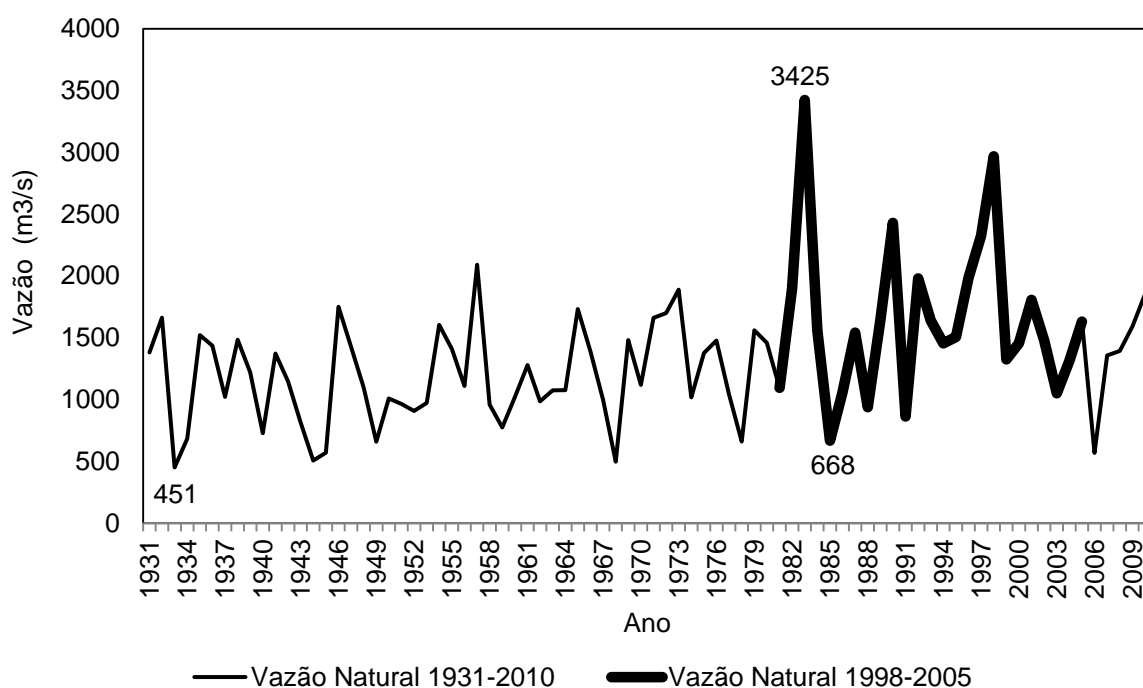


FIGURA 61 - VAZÃO NATURALIZADA MÉDIA ANUAL EM SALTO CAXIAS
 FONTE: O autor (2013)

A TABELA 21 ilustra os valores médios anuais de longo período da vazão natural para as duas usinas hidrelétricas em estudo. Pode-se perceber, pela análise da TABELA 21, que a média de longo termo da vazão na UHE Salto Caxias é praticamente o dobro da vazão observada na UHE Foz do Areia. Nota-se também que julho/1983 foi um mês excepcionalmente chuvoso, com vazões altas observadas nas duas usinas.

TABELA 21 – MÉDIA DE LONGO TERMO (MLT) DA VAZÃO NATURALIZADA

REGIÃO DA BACIA	PERÍODO	MLT ($m^3 \cdot s^{-1}$)	MÁX MENSAL ($m^3 \cdot s^{-1}$)	DATA MÁX	MÍN MENSAL ($m^3 \cdot s^{-1}$)	DATA MÍN
Nascentes_Foz do Areia	1931-2010	651	5150	Julho/1983	80	Junho/2006
Nascentes_Salto Caxias	1931-2010	1339	10798	Julho/1983	148	Agosto/1944
Foz do Areia_Salto Caxias	1931-2010	687	5648	Julho/1983	61	Agosto/1944

FONTE: O autor (2013)

A variabilidade sazonal da vazão natural mensal é mostrada na FIGURA 62. Nota-se que as vazões não variam com uma sazonalidade bem definida, mas percebe-se que as vazões em Salto Caxias são bem mais altas que em Foz do

Areia, com destaque para o mês de outubro, quando são registradas as maiores vazões em ambas as usinas.

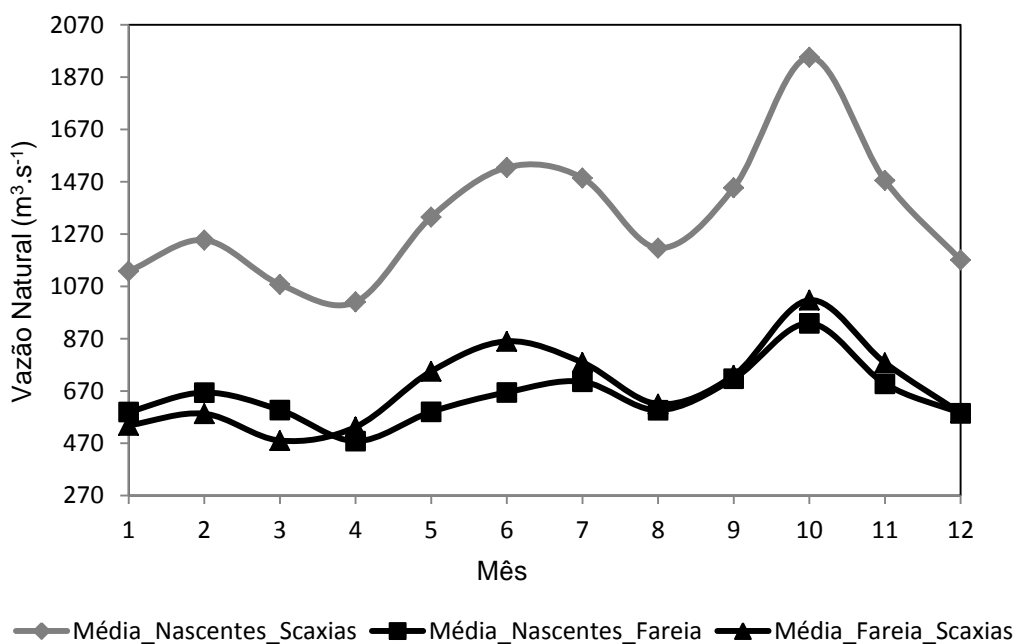


FIGURA 62- CICLO ANUAL DA VAZÃO NATURAL MENSAL NA BACIA DO IGUAÇU

FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 63 ilustra o histograma da vazão natural mensal na usina de Foz do Areia, cuja observação evidencia algumas características da amostra, tais como:

- 1) Maior frequência relativa da vazão natural mensal no intervalo de classe (220-370 m³.s⁻¹);
- 2) Uma assimetria positiva da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à esquerda;
- 3) Muitas ocorrências isoladas de vazão natural mensal muito superiores ao valor central (295 m³.s⁻¹), com destaque para a vazão de 5150 m³.s⁻¹, ocorrida em julho de 1983.

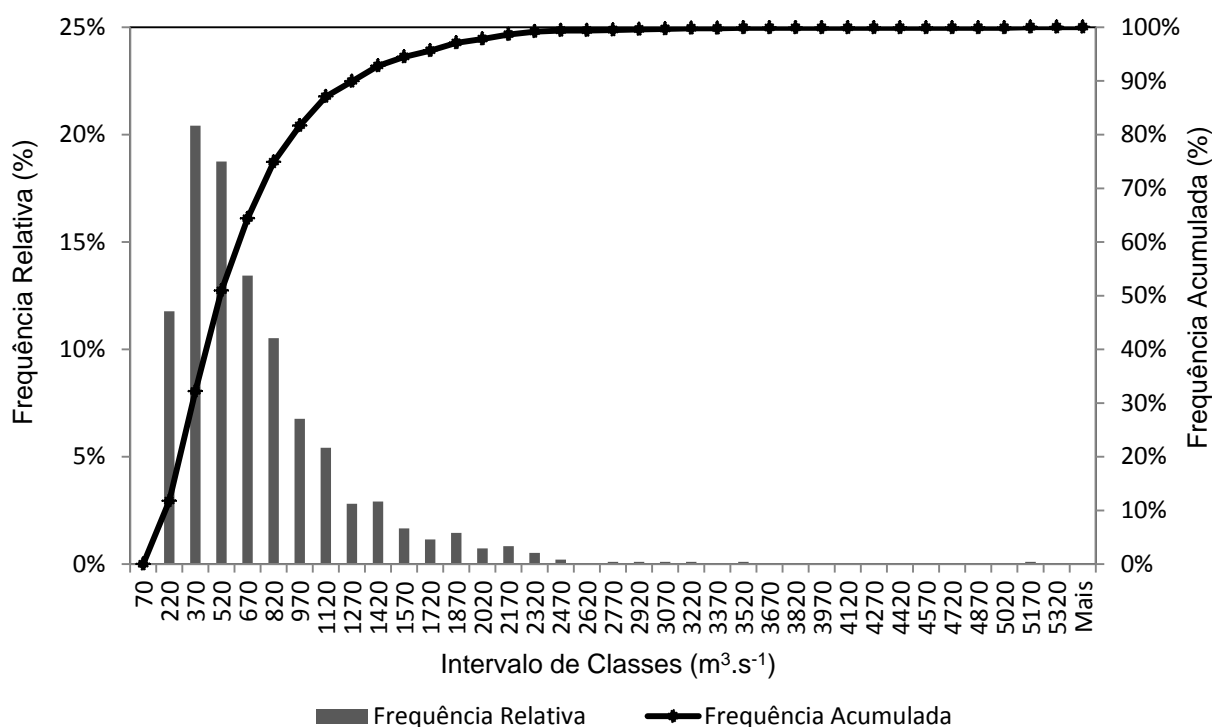


FIGURA 63 – HISTOGRAMA DA VAZÃO NATURAL MENSAL NA USINA DE FOZ DO AREIA, PERÍODO 1931-2010
 FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 64 mostra a curva de permanência das vazões naturais mensais em Foz do Areia. Em hidrologia, a curva de permanência é usada no planejamento de sistemas de recursos hídricos, e serve para ilustrar o padrão com que as vazões variam. No eixo das ordenadas têm-se as vazões, e em abscissas é mostrada a probabilidade de que a vazão seja igualada ou superada ($P(Q \geq q)$), ou seja, a porcentagem de um intervalo de tempo específico em que a vazão, indicada em ordenadas, foi igualada ou superada.

Analisando a FIGURA 64, percebe-se que, por exemplo, a Q_{90} , ou seja, a vazão que é excedida em 90% do tempo, está entre 0 e $400 m^3 \cdot s^{-1}$, mais especificamente $145 m^3 \cdot s^{-1}$, com base na análise da tabela de frequências que deu origem à construção da FIGURA 64.

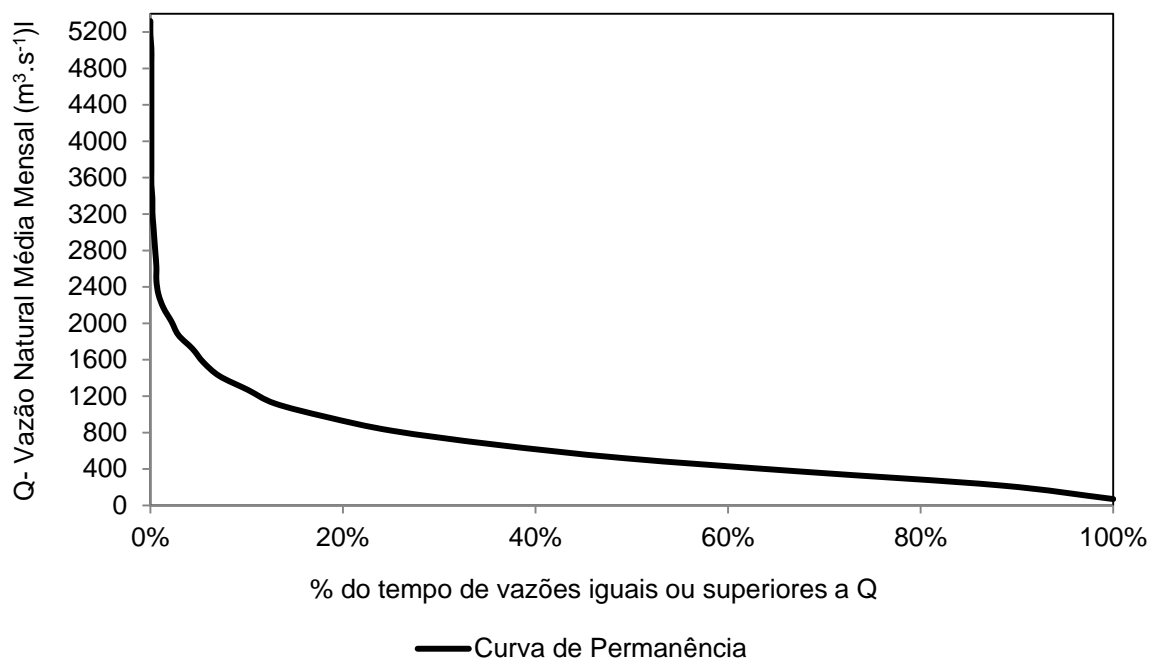


FIGURA 64 – CURVA DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES NATURAIS MÉDIAS MENSAIS DE 1931 A 2010, USINA DE FOZ DO AREIA
FONTE: O autor (2013)

Seguindo a mesma linha de raciocínio, é mostrado, na FIGURA 65, o histograma da vazão natural mensal na usina de Salto Caxias, a partir da qual se podem perceber algumas características da amostra, tais como:

- 1) Maior frequência relativa da vazão natural mensal no intervalo de classe ($640-1140 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$);
- 2) Uma assimetria positiva da distribuição de frequências, pois a amplitude à direita do bloco de maior frequência é maior do que a amplitude à esquerda;
- 3) Algumas ocorrência isoladas de vazão natural mensal muito superiores ao valor central ($890 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), com destaque para a vazão de $10798 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, registrada em julho de 1983.

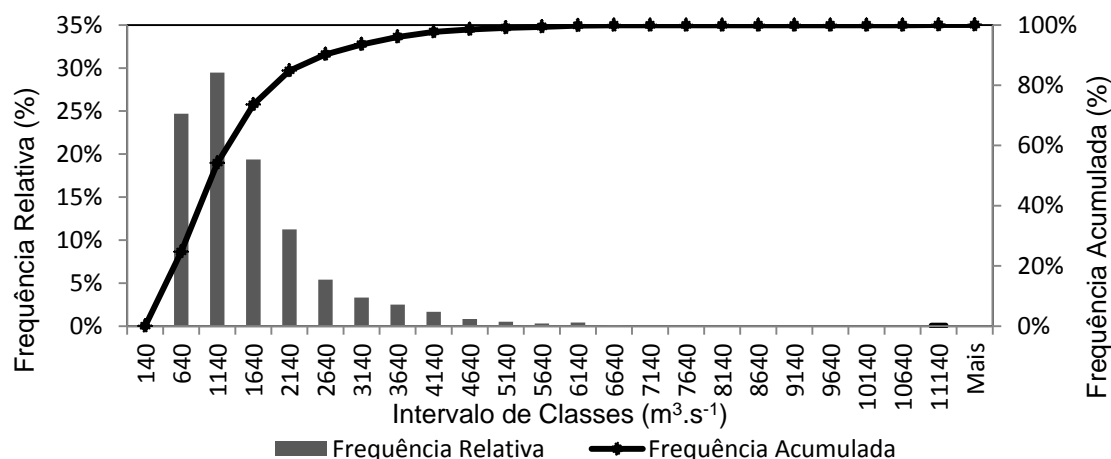


FIGURA 65- HISTOGRAMA DA VAZÃO NATURAL MENSAL NA USINA DE SALTO CAXIAS, PERÍODO 1931-2010

FONTE: O autor (2013)

Na FIGURA 66 é mostrada a curva de permanência das vazões naturais mensais em Salto Caxias. A partir da tabela que deu origem à construção da FIGURA 66, conclui-se que a vazão excedida em 90% do tempo (Q_{90}) está entre 340 e 540 $m^3 \cdot s^{-1}$, mais precisamente 440 $m^3 \cdot s^{-1}$, ou seja, aproximadamente o triplo da Q_{90} observada em Foz do Areia.

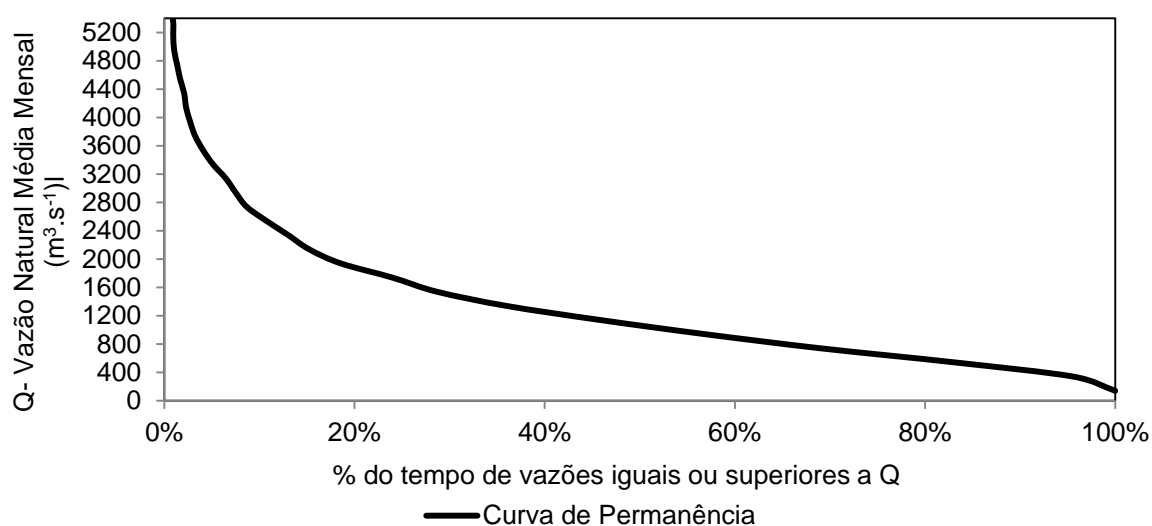


FIGURA 66 - CURVA DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES NATURAIS MÉDIAS MENSAIS DE 1931 A 2010, USINA DE SALTO CAXIAS

FONTE: O autor (2013)

4.5 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CHUVA PREVISTA

A FIGURA 67 mostra a comparação entre a série da chuva prevista e a série da chuva observada (média móvel de três meses) registrada nos pluviômetros, para a bacia entre as nascentes do Rio Iguaçu e a usina de Foz do Areia. A média móvel de três meses da chuva observada apresentou valores que variaram entre 30 e 340 mm.mês⁻¹, enquanto que a média móvel da chuva prevista variou entre 90 e 200 mm.mês⁻¹. Na FIGURA 67, observa-se que a chuva prevista estimou corretamente a chuva observada para valores em torno de 100 a 170 mm.mês⁻¹, mas vê-se que os maiores picos de chuva observada não foram reproduzidos pela chuva prevista. Por exemplo, a chuva de 339 mm em maio/1983 não foi estimada pela previsão. Alguns períodos de estiagem foram bem reproduzidos, como aqueles referentes a maio/1989, maio/1990, e dezembro/2004. Entretanto, constatou-se que, de maneira geral, a chuva prevista foi muito conservadora, ou seja, não conseguiu reproduzir com acurácia os extremos superiores e inferiores da chuva observada.

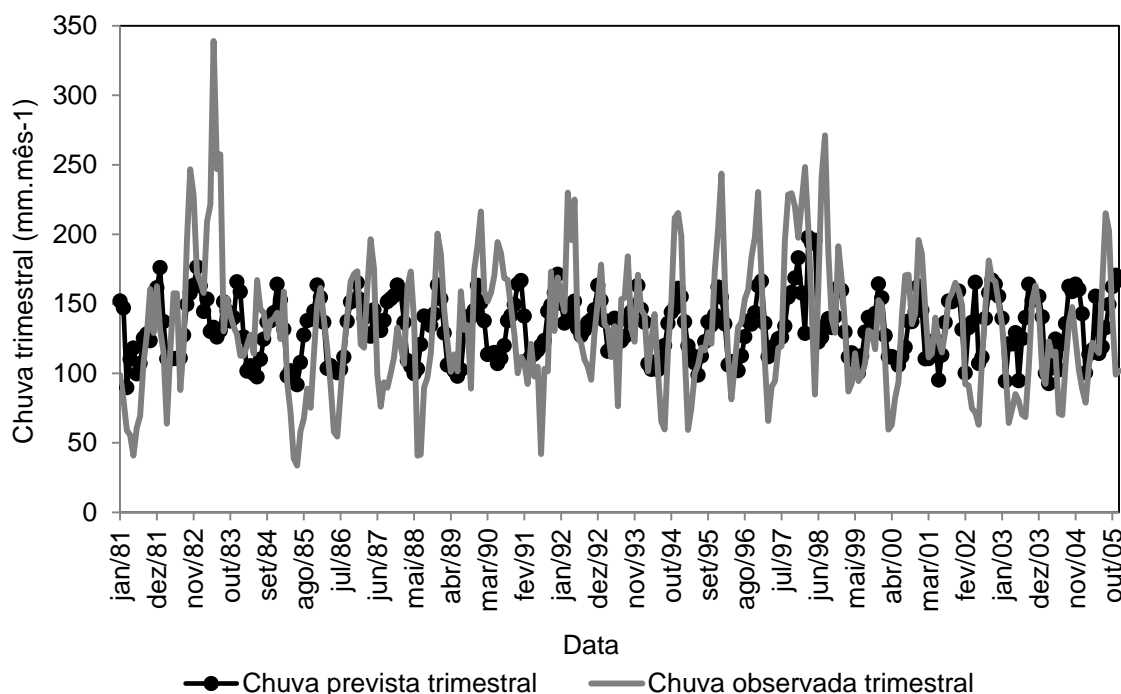


FIGURA 67- SÉRIE TEMPORAL DA CHUVA PREVISTA E DA CHUVA OBSERVADA NA BACIA ENTRE AS NASCENTES E FOZ DO AREIA, PERÍODO 1981-2005

FONTE: O autor (2013)

Na FIGURA 68 são apresentadas as previsões da FIGURA 67 em um gráfico de correlação entre chuva observada e prevista. A linha diagonal tracejada

representa o que seria uma previsão perfeita e os pontos circulares representam as previsões reais. Observa-se que os pontos da previsão real, de maneira geral, apresentam grande dispersão em relação à condição de previsão perfeita (linha tracejada).

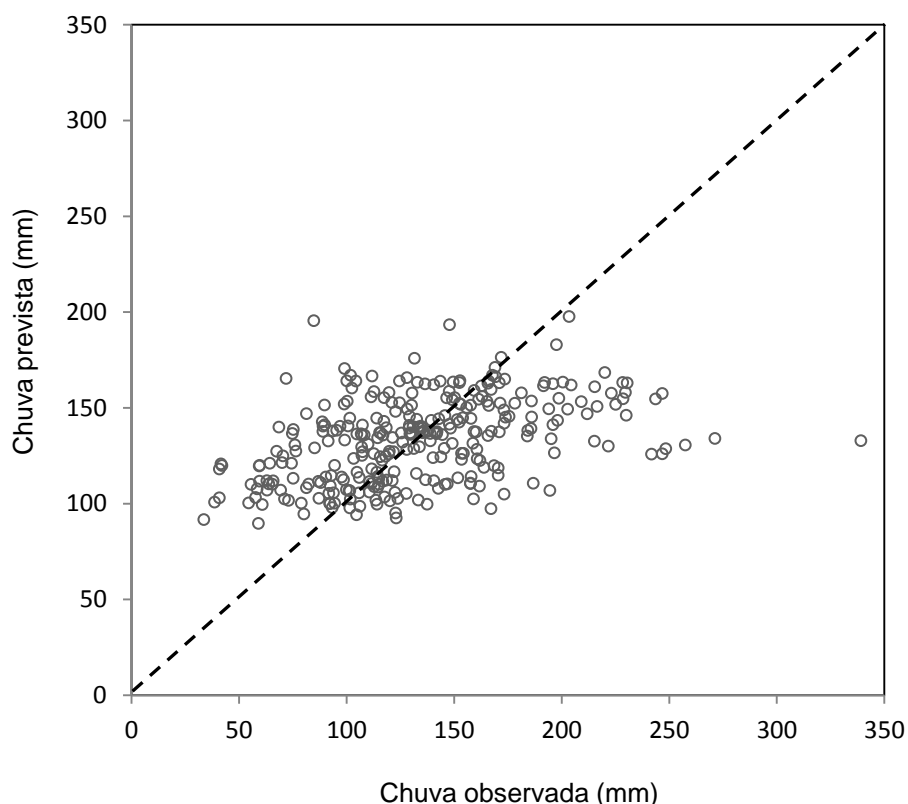


FIGURA 68 – CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS OBSERVADAS E PREVISTAS, REGIÃO ENTRE AS NASCENTES DO IGUAÇU E A UHE FOZ DO AREIA

FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 69 mostra a comparação, para a bacia incremental entre a usina de Salto Caxias e a usina de Foz do Areia, entre a série temporal da chuva prevista e a série da chuva observada, ambas com resolução trimestral.

A chuva trimestral média observada na bacia incremental apresentou valores que variaram entre 20 e 420 mm.mês^{-1} , enquanto que a chuva prevista variou entre 85 e 305 mm.mês^{-1} . Pela análise da FIGURA 69, vê-se que os maiores picos de chuva observada não foram reproduzidos pela chuva prevista. Por exemplo, a chuva de 420 mm de maio de 1983 não foi estimada pela previsão. Alguns períodos foram bem reproduzidos, como aqueles entre 2003 e 2005.

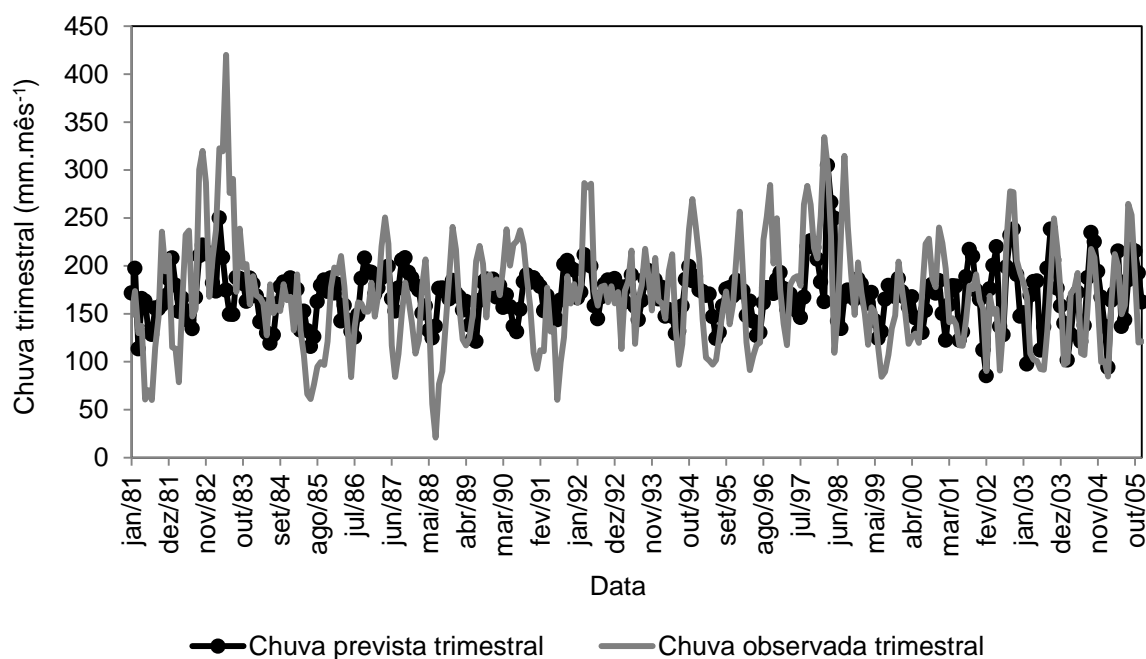


FIGURA 69- SÉRIE TEMPORAL DA CHUVA PREVISTA E DA CHUVA OBSERVADA NA BACIA INCREMENTAL ENTRE SALTO CAXIAS E FOZ DO AREIA, PERÍODO 1981-2005

FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 70 ilustra a correlação entre a chuva prevista e a chuva observada.

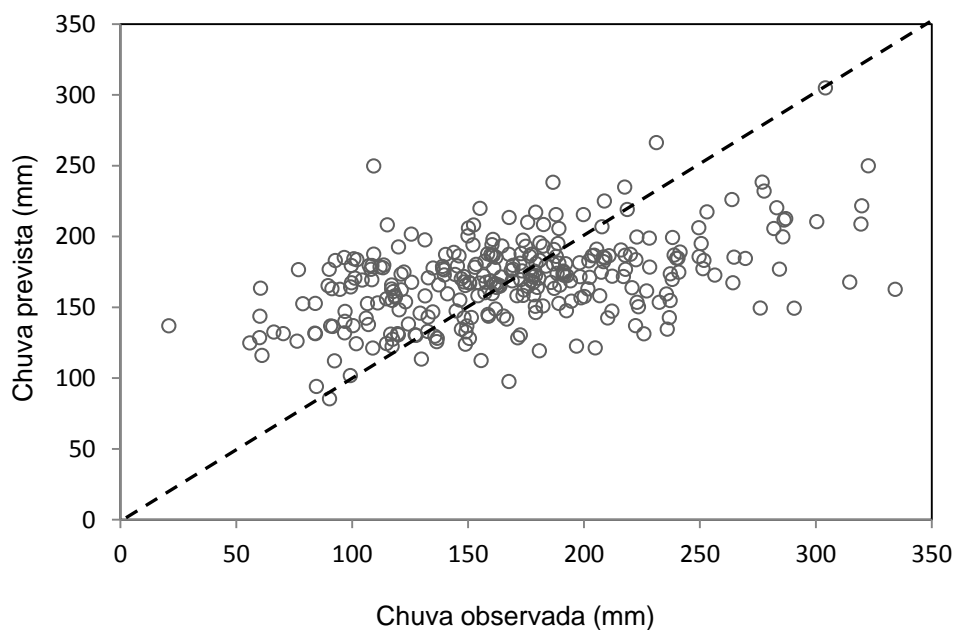


FIGURA 70 - CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS OBSERVADAS E PREVISTAS, REGIÃO ENTRE FOZ DO AREIA E SALTO CAXIAS

FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 71 mostra a comparação para a Bacia do Iguaçu inteira, ou seja, entre as nascentes do Iguaçu e a usina de Salto Caxias, comparando a série temporal da chuva prevista e a série da chuva observada, ambas com resolução trimestral.

A chuva trimestral média observada na bacia apresentou valores que variaram entre 29 e 385 mm.mês⁻¹, enquanto que a chuva prevista variou entre 97 e 254 mm.mês⁻¹. Pela análise da FIGURA 71, vê-se que os maiores picos da chuva observada não foram reproduzidos pela chuva prevista.

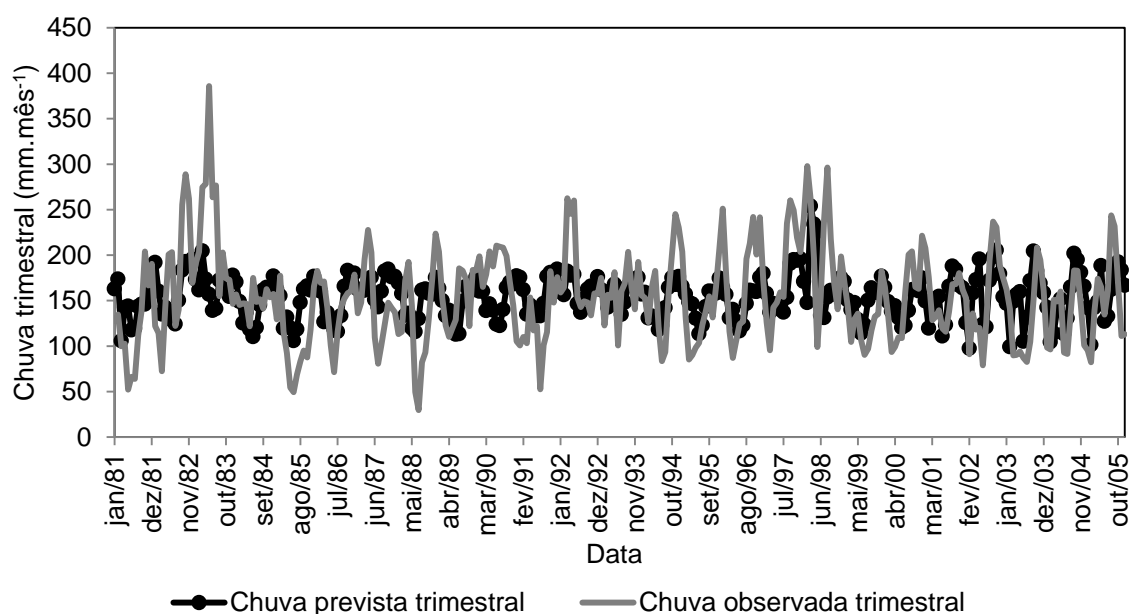


FIGURA 71 - SÉRIE TEMPORAL DA CHUVA PREVISTA E DA CHUVA OBSERVADA NA BACIA ENTRE AS NASCENTES E SALTO CAXIAS, PERÍODO 1981-2005

FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 72 mostra a correlação entre a chuva prevista e a chuva observada. Observa-se novamente que os pontos da previsão real, de maneira geral, apresentam grande dispersão em relação à condição de previsão perfeita (linha tracejada).

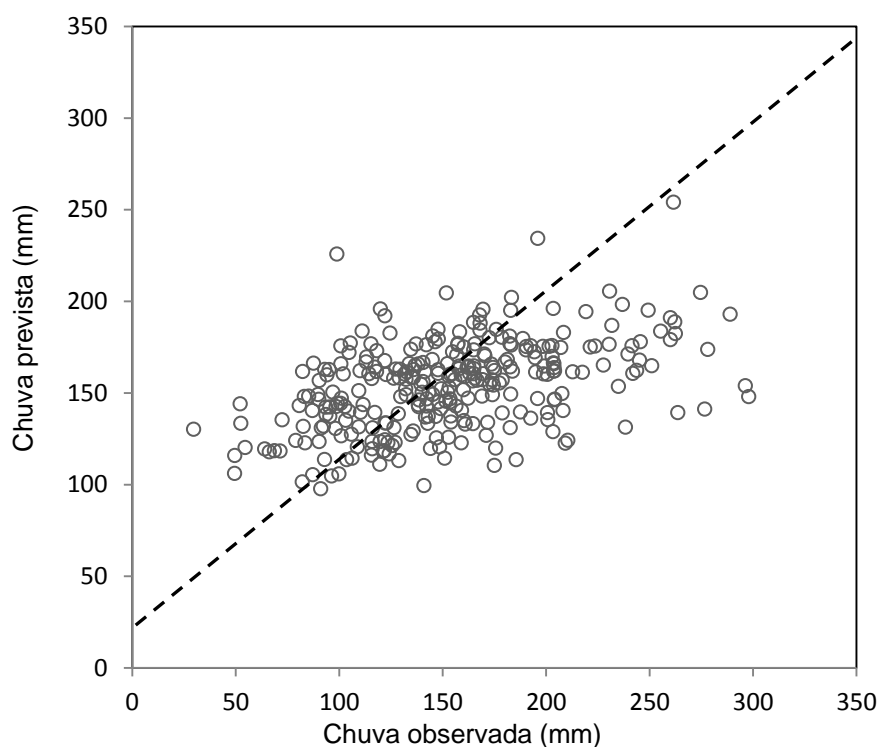


FIGURA 72– CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS OBSERVADAS E PREVISTAS, REGIÃO ENTRE AS NASCENTES DO IGUAÇU E A UHE SALTO CAXIAS

FONTE: O autor (2013)

A TABELA 22 resume as estatísticas de avaliação entre a chuva prevista e a chuva observada, para as três regiões da bacia analisadas.

TABELA 22 – ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DA CHUVA PREVISTA COM RELAÇÃO À CHUVA OBSERVADA NOS PUVIÔMETROS

ESTATÍSTICAS	NASCENTES A	FOZ DO AREIA A	NASCENTES A
	FOZ DO AREIA	SALTO CAXIAS	SALTO CAXIAS
Correlação	0,44	0,46	0,45
Nash-Sutcliffe	0,19	0,21	0,20
Erro médio absoluto (mm.mes ⁻¹)	32,05	39,88	35,11
Raiz do erro quadrático médio (mm.mes ⁻¹)	42,50	51,56	46,18

FONTE: O autor (2013)

Através dos índices de verificação fornecidos pelo projeto EUROBRISA (seção 2.3.2), fez-se uma análise dos mapas disponíveis no *website* do CPTEC (2013) referente ao ano de 2012, onde a verificação foi feita comparando-se a anomalia de chuva prevista e observada referentes ao período de 1981-2005, para a

usina de Foz do Areia e para Salto Caxias. Com isso, pôde-se ter conhecimento do período do ano em que o acerto da previsão foi o melhor e o período em que o acerto foi pior. Dentre os índices fornecidos, analisou-se o índice de correlação.

TABELA 23 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIA PREVISTA E OBSERVADA, 1981-2005, UHE FOZ DO AREIA.

TRIMESTRE	FAIXA	MÉDIA
JFM	$-0,4 < \rho < -0,2$	-0,3
AMJ	$0,2 < \rho < 0,4$	0,3
MJJ	$-0,2 < \rho < 0,2$	0,0
JJA	$0,2 < \rho < 0,4$	0,3
JAS	$-0,4 < \rho < -0,2$	-0,3
ASO	$-0,2 < \rho < 0,2$	0,0
SON	$0,2 < \rho < 0,4$	0,3
OND	$0,2 < \rho < 0,4$	0,3
NDJ	$-0,2 < \rho < 0,2$	0,0
DJF	$-0,2 < \rho < 0,2$	0,0

FONTE: O autor (2013)

TABELA 24 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIA PREVISTA E OBSERVADA, 1981-2005, UHE SALTO CAXIAS

TRIMESTRE	FAIXA	MÉDIA
JFM	$-0,2 < \rho < 0,2$	0,0
AMJ	$0,4 < \rho < 0,6$	0,5
MJJ	$0,2 < \rho < 0,4$	0,3
JJA	$0,2 < \rho < 0,4$	0,3
JAS	$-0,2 < \rho < 0,2$	0,0
ASO	$-0,2 < \rho < 0,2$	0,0
SON	$0,2 < \rho < 0,4$	0,3
OND	$-0,2 < \rho < 0,2$	0,0
NDJ	$-0,2 < \rho < 0,2$	0,0
DJF	$-0,2 < \rho < 0,2$	0,0

FONTE: O autor (2013)

Analisando a TABELA 23, percebe-se que, para a usina de Foz do Areia, os maiores índices de correlação são encontrados em quatro trimestres: abril-maio-junho (AMJ), junho-julho-agosto (JJA), setembro-outubro-novembro (SON) e outubro-novembro-dezembro (OND), enquanto que os menores índices são os dos trimestres janeiro-fevereiro-março (JFM) e julho-agosto-setembro (JAS). Já na TABELA 24, vê-se que, para a usina de Salto Caxias, a maior correlação é encontrada no trimestre abril-maio-junho (AMJ). Já as piores correlações são observadas em seis trimestres: JFM, JAS, ASO, OND, NDJ e DJF. A FIGURA 73 e a

FIGURA 74 ilustram alguns exemplos dos mapas a partir dos quais foi possível construir a TABELA 23 e a TABELA 24. Os mapas de todos os trimestres podem ser encontrados no *website* do CPTEC/EUROBRISA.

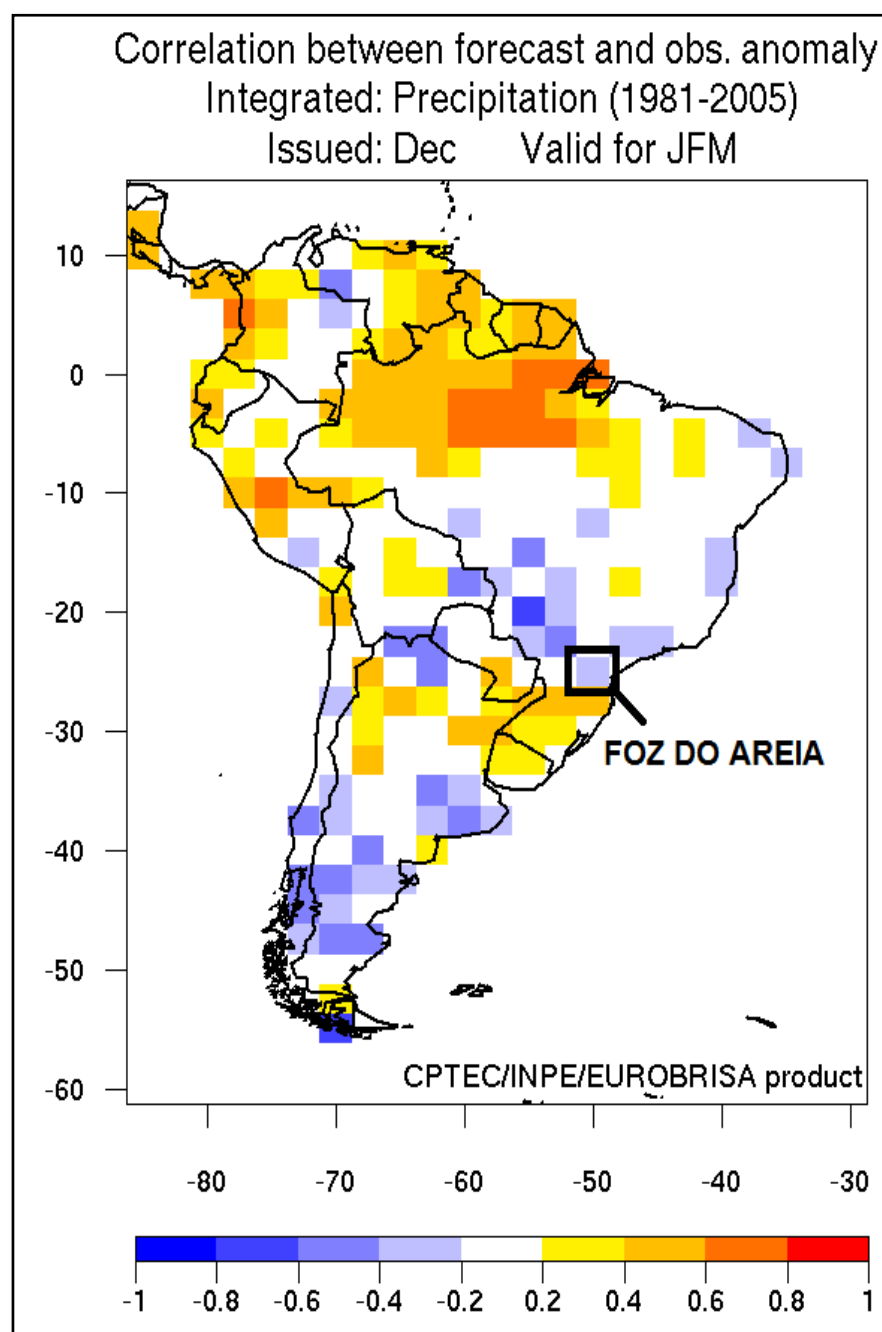


FIGURA 73– MENOR CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIA PREVISTA E OBSERVADA, 1981-2005, USINA DE FOZ DO AREIA

FONTE: CPTEC (2013), adaptada

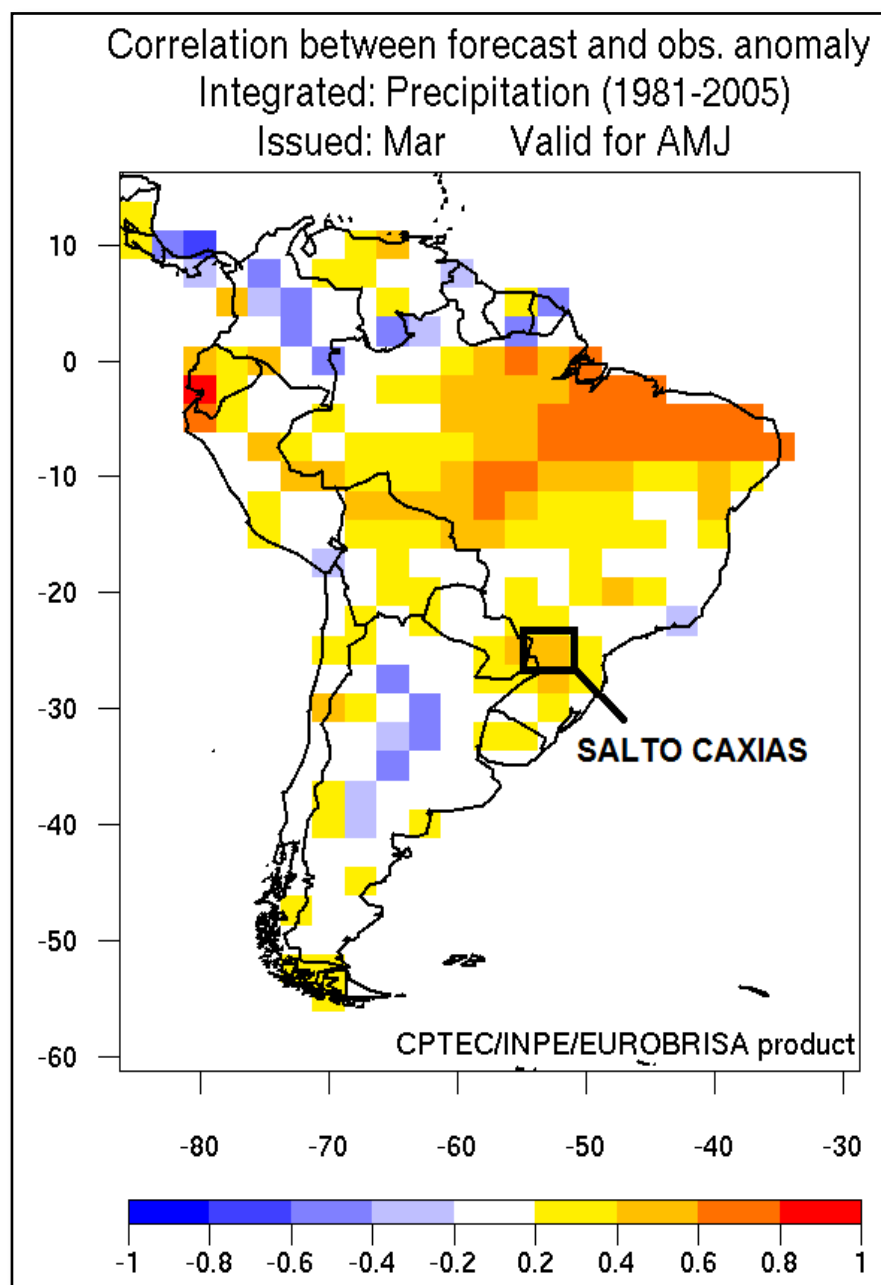


FIGURA 74- MAIOR CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIA PREVISTA E OBSERVADA, 1981-2005, USINA DE SALTO CAXIAS.

FONTE: O CPTEC (2013), adaptada

4.5.1 Evolução temporal da acurácia da previsão climática de chuva

Bettinardi (2011) analisou a chuva prevista do sistema EUROBRISA para a usina de Foz do Areia. A TABELA 25 compara a versão do sistema EUROBRISA usada por Bettinardi (2011) com a da presente dissertação.

TABELA 25 – DIFERENÇAS DO SISTEMA EUROBRISA ENTRE BETTINARDI (2011) E O AUTOR (2013)

	BETTINARDI (2011)	O AUTOR (2013)
Versão EUROBRISA	2009	2012
Modelo ECMWF	System 3 (Anderson <i>et al.</i> , 2007)	System 4 (Stockdale <i>et al.</i> , 2011)
Modelo UKMO	GloSea 4 (Graham <i>et al.</i> 2005)	GloSea 4 (Arribas <i>et al.</i> 2011)
Modelo Météo-France	System 3	System 3
Modelo do CPTEC	Nobre <i>et.al.</i> 2012	Nobre <i>et.al.</i> 2012
Modelo Empírico	Coelho <i>et. al.</i> 2006	Coelho <i>et. al.</i> 2006
Modelo Integrado	Coelho <i>et. al.</i> 2006	Coelho <i>et. al.</i> 2006
Série de <i>hindcast</i>	1987-2001	1981-2005

FONTE: O autor (2013)

Para comparar os possíveis avanços entre as duas versões do sistema EUROBRISA, fez-se necessário reconstruir a chuva prevista usando como dado de entrada a mesma série de chuva observada utilizada por Bettinardi (2011) e o mesmo período de *hindcast* (1987-2001). A TABELA 26 resume os resultados obtidos, comparando as estatísticas de avaliação entre a chuva prevista e a chuva observada para a UHE Foz do Areia entre 1987-2001.

TABELA 26– COMPARAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES DE CHUVA ENTRE BETTINARDI (2011) E O AUTOR (2013), USINA DE FOZ DO AREIA, PERÍODO 1987-2001.

ESTATÍSTICA DE AVALIAÇÃO	BETTINARDI (2011)	O AUTOR (2013)
Coefficiente de Correlação	0,32	0,45
Nash-Sutcliffe	0,06	0,20
Raiz do erro quadrático médio	49,46	45,64
Erro médio absoluto	39,26	35,62

FONTE: O autor (2013)

Analisando a TABELA 26, vê-se que, apesar do acerto da previsão de chuva ainda ser baixo, ele cresceu substancialmente, com destaque para o coeficiente de Nash-Sutcliffe, que aumentou cerca de três vezes.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO BALMES

O modelo hidrológico de balanço hídrico mensal (BALMES) tem por finalidade assegurar que as séries de chuva, vazão e evapotranspiração potencial sejam consistentes entre si. Através dele, foi possível estimar a variação do

armazenamento da água no solo para o período 1998-2010. Se, nesse período de cálculo, o armazenamento estimado da água no solo se comportar de maneira estacionária, e se a ordem de grandeza desses armazenamentos for um valor condizente com a realidade, então há grande probabilidade de que os dados de chuva, evapotranspiração potencial e vazão sejam consistentes entre si.

Os eventos hidrológicos inconsistentes ocorrem, por exemplo, quando os valores de vazão são altos, sem que haja um respectivo registro elevado de chuva. Neste caso, é necessário que o armazenamento da água no solo seja muito alto para que se possa representar o evento chuvoso, sem a chuva correspondente. Outro exemplo de inconsistência hidrológica ocorre quando houver uma elevada precipitação, mas não houver registro de aumento da vazão, logo também é necessário que o armazenamento de água no solo seja muito alto para absorver esse “excesso” de precipitação, sem produzir o respectivo aumento da vazão.

A análise de consistência foi realizada usando como dados de entrada:

- 1) Chuva observada mensal nos pluviômetros, ou chuva prevista do sistema EUROBRISA (mm.mês^{-1});
- 2) Séries de vazões naturalizadas mensais do ONS para as usinas de Foz do Areia e Salto Caxias, em unidades de deflúvio, ou seja, divididas pela área de drenagem de cada bacia incremental (mm.mês^{-1});
- 3) Séries de evapotranspiração de referência mensal calculadas com base nos dados meteorológicos fornecidos pelo SIMEPAR (mm.mês^{-1}).

As saídas do modelo hidrológico BALMES compreendem:

- 1) Séries de evapotranspiração potencial mensal ($\text{EVT}_{\text{REF}} * K_c * 1$, mm.mês^{-1});
- 2) Séries de evapotranspiração real mensal ($\text{EVT}_{\text{REF}} * K_c * K_s$, mm.mês^{-1});
- 3) Séries de armazenamento de água no solo (mm.mês^{-1});
- 4) Médias climatológicas (sazonais) dos dados hidrológicos.

4.6.1 Análise de sensibilidade do coeficiente de cultivo (K_c)

Através da aplicação do modelo hidrológico BALMES, foi possível analisar qual o comportamento do armazenamento da água no solo para diferentes valores do coeficiente de cultivo, que, multiplicado pela evapotranspiração de referência e considerando o coeficiente de saturação do solo igual a (+1), fornece a evapotranspiração potencial, como mostra a EQUAÇÃO (39):

$$EVT_{\text{REAL}} = EVT_{\text{REF}} \times K_C \times K_S \quad (39)$$

Onde: EVT_{REAL} = evapotranspiração real (mm.mês^{-1}); EVT_{REF} = evapotranspiração de referência (mm.mês^{-1}); K_C = coeficiente de cultivo (adimensional); K_S = coeficiente de saturação de água no solo (adimensional).

A análise de sensibilidade do coeficiente de cultivo tem por finalidade determinar qual o coeficiente de cultivo que melhor conduz a uma variação de armazenamento de água no solo estacionária e realística. A análise foi feita para quatro situações hipotéticas distintas, a saber:

- 1) $K_c=1$;
- 2) $K_c=K_{ci}$ (baseado na literatura especializada);
- 3) $K_c=1,2 \cdot K_{ci}$;
- 4) $K_c=0,8 \cdot K_{ci}$.

A TABELA 27 resume as quatro situações analisadas.

TABELA 27 - VALORES DO COEFICIENTE DE CULTIVO A SEREM ANALISADOS

MÊS	$K_c = 1$	$K_c = K_{ci}$	$K_c = 1,2 * K_{ci}$	$K_c = 0,8 * K_{ci}$
JAN	1,00	0,40	0,48	0,32
FEV	1,00	1,09	1,31	0,87
MAR	1,00	1,60	1,92	1,28
ABR	1,00	1,60	1,92	1,28
MAI	1,00	1,28	1,54	1,02
JUN	1,00	0,40	0,48	0,32
JUL	1,00	0,40	0,48	0,32
AGO	1,00	0,40	0,48	0,32
SET	1,00	0,88	1,06	0,70
OUT	1,00	1,23	1,48	0,98
NOV	1,00	1,23	1,48	0,98
DEZ	1,00	0,79	0,95	0,63

FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 75 e a FIGURA 76 ilustram, respectivamente, a variação da água armazenada no solo nas regiões da bacia do Iguaçu compreendidas entre as nascentes e Foz do Areia e entre as nascentes e Salto Caxias.

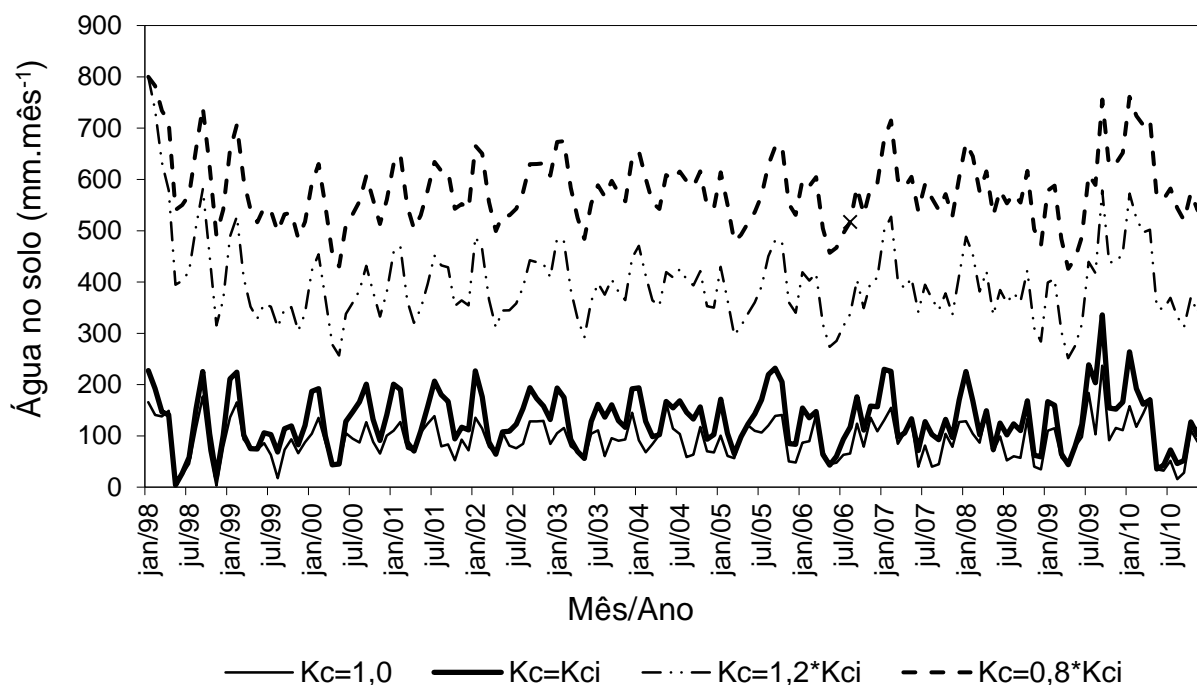


FIGURA 75- VARIAÇÃO DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA NO SOLO EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO, ENTRE AS NASCENTES E FOZ DO AREIA

FONTE: O autor (2013)

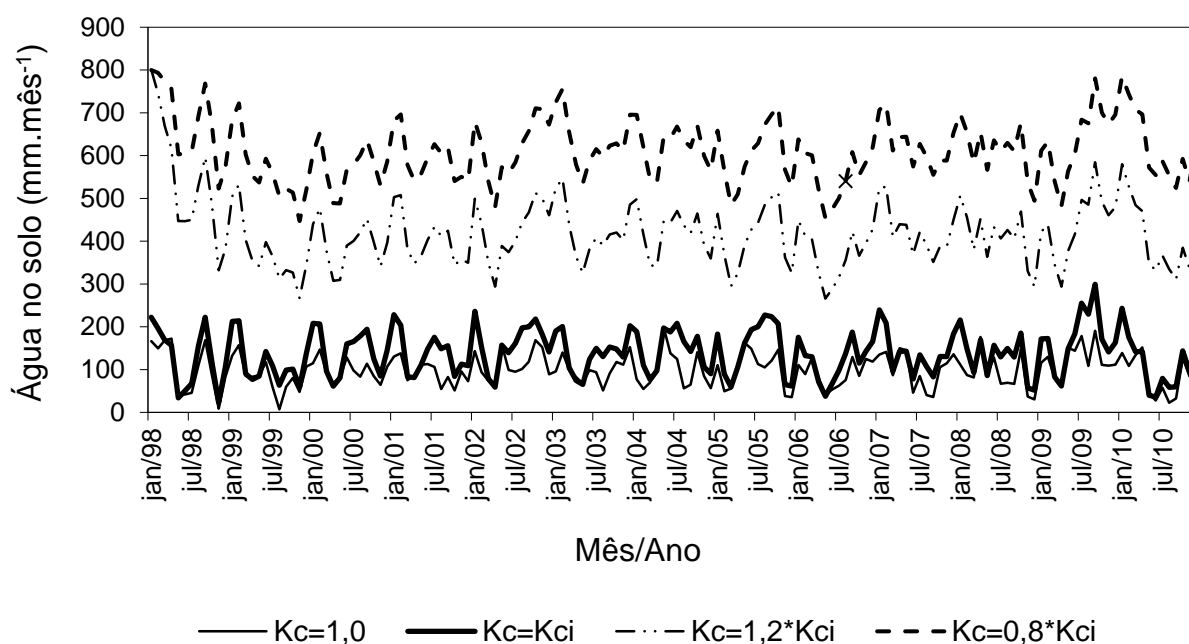


FIGURA 76- VARIAÇÃO DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA NO SOLO EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO, ENTRE AS NASCENTES E SALTO CAXIAS

FONTE: O autor (2013)

Analisando a FIGURA 75 e a FIGURA 76, observa-se que um coeficiente de cultivo igual a $(1,2 \cdot K_{ci})$ e $(0,8 \cdot K_{ci})$, requer, respectivamente, que o armazenamento da água no solo seja da ordem de 400 e 600 mm, os quais são valores considerados altos. Já os coeficientes de cultivo ($K_c=1$) e ($K_c=K_{ci}$) produziram armazenamentos de água no solo da ordem de grandeza de 100 mm, que são mais realistas. A conclusão desta análise é que, dentre os quatro coeficientes de cultivo analisados, os coeficientes ($K_c=1$) e ($K_c=K_{ci}$) foram os que melhor representaram um armazenamento de água no solo. Como ($K_c=K_{ci}$) foi estimado com base na literatura especializada, sendo função da cobertura vegetal da bacia e da variação do cultivo conforme a época do ano, ele foi adotado como o coeficiente de cultivo a ser usado na estimativa da evapotranspiração potencial.

4.7 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO HIDROLÓGICO 3R

A calibração do modelo hidrológico chuva-vazão 3R usou como dados de entrada as séries das chuvas observadas e das evapotranspirações potenciais médias nas bacias, para o período de treze anos entre jan/1998 e dez/2010. Os

parâmetros calibrados para as bacias até Foz do Areia e até Salto Caxias são apresentados na TABELA 28.

TABELA 28- PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	FOZ DO AREIA	SALTO CAXIAS
X_1^0	Capacidade da camada inferior do solo	76,5 mm	199,8 mm
X_2^0	Capacidade da camada superior do solo	286,0 mm	124,0 mm
m_1	Expoente da função de escoamento superficial	0,617	0,551
C_1	Taxa de recessão do escoamento sub-superficial	0,022 mês ⁻¹	0,179 mês ⁻¹
m_2	Expoente da função de percolação	1,80 (assumido)	1,80 (assumido)
m_3	Expoente da função de transpiração	1,00 (assumido)	1,00 (assumido)
C_2	Taxa de recessão da camada inferior do solo	0,038 mes ⁻¹	0,046 mes ⁻¹
C_3	Coefficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	34,35	196,50
μ	Fração de recarga do aquífero	0,03	0,09
β	Taxa de recessão da propagação	0,958 mês ⁻¹	1,465 mês ⁻¹
m	Expoente da função de propagação	1,157	1,099
N	Número de reservatórios conceituais na cascata	2 (assumido)	2 (assumido)

FONTE: O autor (2013)

Os expoentes das funções de percolação e transpiração, não foram calibrados, mas foram assumidos com base em estudos anteriores. O modelo de propagação foi assumido como uma cascata de dois reservatórios conceituais.

A TABELA 29 e a TABELA 30 listam as estatísticas (1998-2010) dos fluxos observados e simulados para as duas bacias estudadas. A chuva observada e a evapotranspiração potencial são dados de entrada para o modelo 3R, o deflúvio observado é usado para estimar os erros da simulação. O modelo 3R produz o deflúvio simulado e a evapotranspiração real.

TABELA 29 – MÉDIAS DOS FLUXOS OBSERVADOS E SIMULADOS MENSAIS PARA O PERÍODO 1998-2010 EM FOZ DO AREIA E SALTO CAXIAS

FLUXO	FOZ DO AREIA		SALTO CAXIAS	
	OBSERVADO (mm.mes ⁻¹)	SIMULADO (mm.mes ⁻¹)	OBSERVADO (mm.mes ⁻¹)	SIMULADO (mm.mes ⁻¹)
Chuva	128,4	---	147,5	---
Evapotranspiração Potencial	134,9	---	152,1	---
Evapotranspiração Real	---	63,1	---	75,7
Deflúvio Total	62,9	62,9	70,3	70,3
Deflúvio Superficial	---	58,7	---	66,5
Deflúvio de Base	---	4,2	---	3,8

FONTE: O autor (2013)

TABELA 30 – DESVIO PADRÃO DOS FLUXOS OBSERVADOS E SIMULADOS MENSIS PARA O PERÍODO 1998-2010 EM FOZ DO AREIA E SALTO CAXIAS

FLUXO	FOZ DO AREIA		SALTO CAXIAS	
	OBSERVADO (mm.mes ⁻¹)	SIMULADO (mm.mes ⁻¹)	OBSERVADO (mm.mes ⁻¹)	SIMULADO (mm.mes ⁻¹)
Chuva	70,1	---	77,0	---
Evapotranspiração Potencial	74,8	---	82,4	---
Evapotranspiração Real	---	32,0	---	35,8
Deflúvio Total	45,8	35,9	51,3	41,3
Deflúvio Superficial	---	47,7	---	51,5
Deflúvio de Base	---	1,4	---	1,4

FONTE: O autor (2013)

Dos resultados apresentados na TABELA 29, obtém-se os coeficientes de escoamento de 0,49 para Foz do Areia e 0,48 para Salto Caxias. As razões entre evapotranspiração real e potencial são 0,47 para Foz do Areia e 0,50 para Salto Caxias, sendo que a evapotranspiração real foi decorrente da simulação da variação da água armazenada no solo produzida pelo Modelo 3-R. O modelo também produziu as estimativas das razões entre escoamento de base e vazão total que foram 0,066 para Foz do Areia e 0,054 para Salto Caxias.

As razões entre a soma dos escoamentos superficial e sub-superficial e o deflúvio total foram de 0,934 para Foz do Areia e 0,946 para Salto Caxias; portanto, a simulação do deflúvio na Bacia do Iguaçu é dominada pela chuva e pelos demais processos superficiais e sub-superficiais simulados na camada superior do solo do Modelo 3-R. O modelo hidrológico simulou adequadamente a fase dos picos e as recessões, mas subestimou alguns picos.

A FIGURA 77 e a FIGURA 78 ilustram as intercomparações entre os deflúvios simulados pelo Modelo 3-R e a precipitação e deflúvio observados nas bacias de Foz do Areia e Salto Caxias, respectivamente.

Os resultados da calibração produziram erros iguais a zero e correlações entre os deflúvios observados e simulados de $\rho=0,85$ para Foz do Areia e $\rho=0,88$ para Salto Caxias. Observa-se na FIGURA 77 que a menor subestimativa foi de -104,6 mm/mês em maio/2010 e a maior superestimativa foi de 44,1 mm/mês em janeiro/1999.

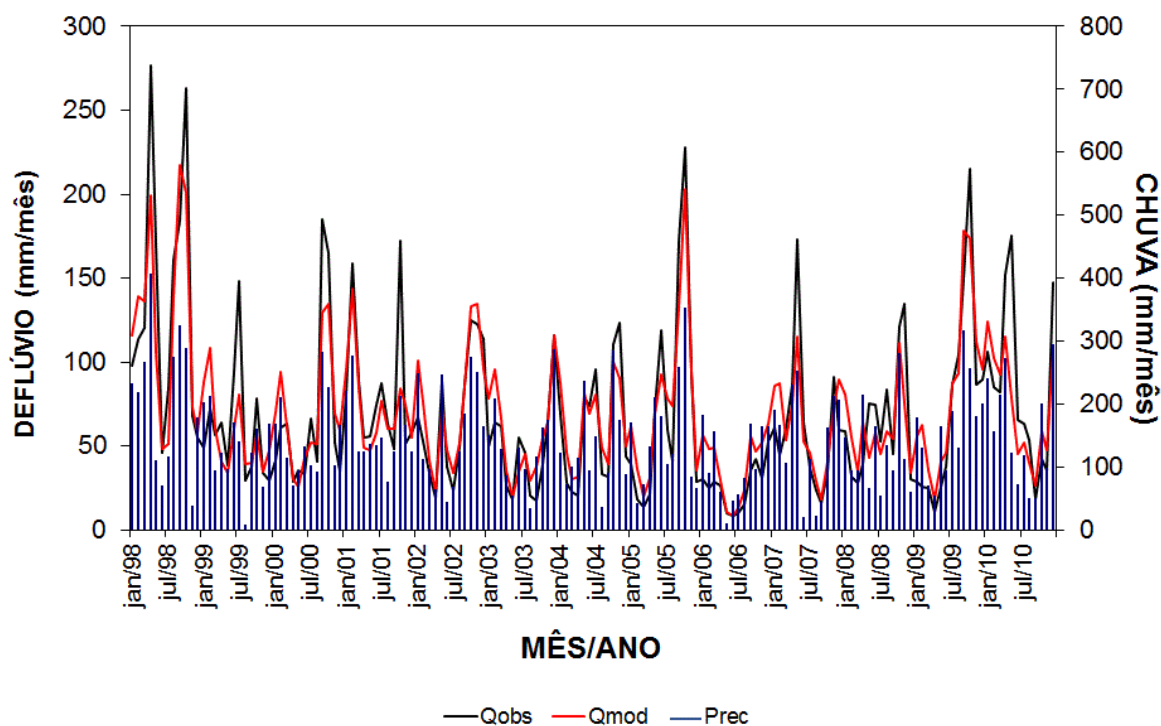


FIGURA 77– INTERCOMPARAÇÃO DOS DEFLÚVIOS MODELADO E OBSERVADO PRODUZIDAS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA MÉDIA EM FOZ DO AREIA
 FONTE: O autor (2013)

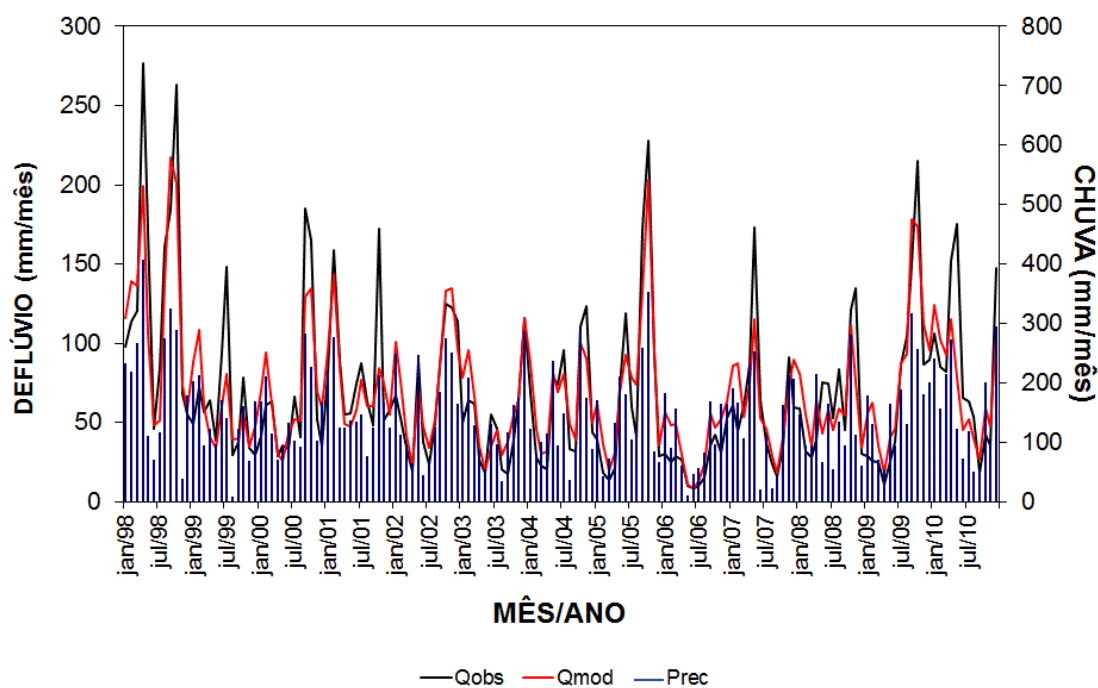


FIGURA 78– INTERCOMPARAÇÃO DOS DEFLÚVIOS MODELADO E OBSERVADO PRODUZIDAS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA MÉDIA EM SALTO CAXIAS
 FONTE: O autor (2013)

Observa-se na FIGURA 78 que a menor subestimativa foi de -97,1 mm/mes em maio/2010 e a maior superestimativa foi de 42,8 mm/mês em fevereiro/2007. Adicionalmente, a FIGURA 79 e a FIGURA 80 ilustram as correlações entre os deflúvios simulados pelo Modelo 3-R e os deflúvios observados nas bacias de Foz do Areia e Salto Caxias, respectivamente.

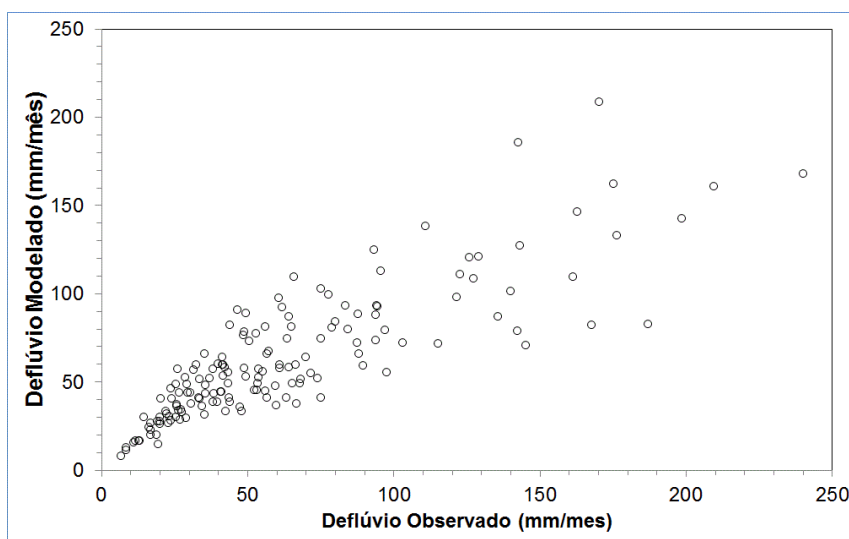


FIGURA 79– CORRELAÇÃO ENTRE OS DEFLÚVIOS SIMULADOS E OBSERVADOS EM FOZ DO AREIA
FONTE: O autor (2013)

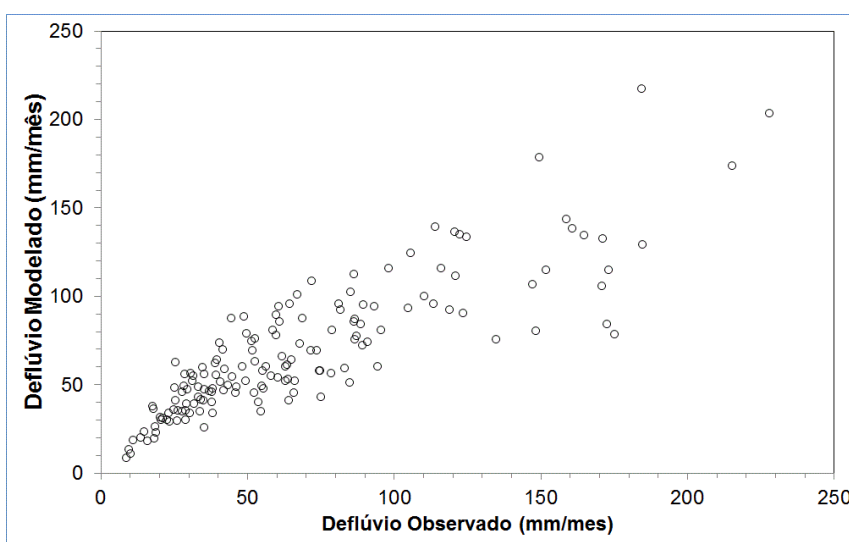


FIGURA 80– CORRELAÇÃO ENTRE OS DEFLÚVIOS SIMULADOS E OBSERVADOS EM SALTO CAXIAS
FONTE: O autor (2013)

As variações do armazenamento de água nas camadas superior e inferior do solo estão ilustradas na FIGURA 81 e na FIGURA 82 para Foz do Areia e Salto Caxias, respectivamente.

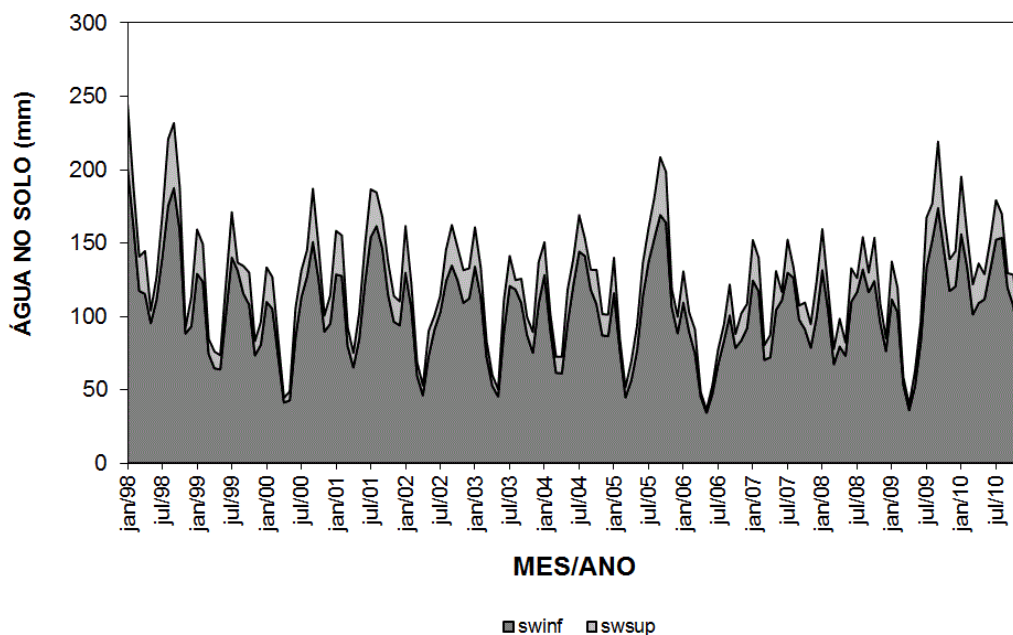


FIGURA 81– VARIAÇÕES DOS ARMAZENAMENTOS DA ÁGUA NO SOLO EM FOZ DO AREIA, SIMULADOS PELO MODELO 3-R

FONTE: O autor (2013)

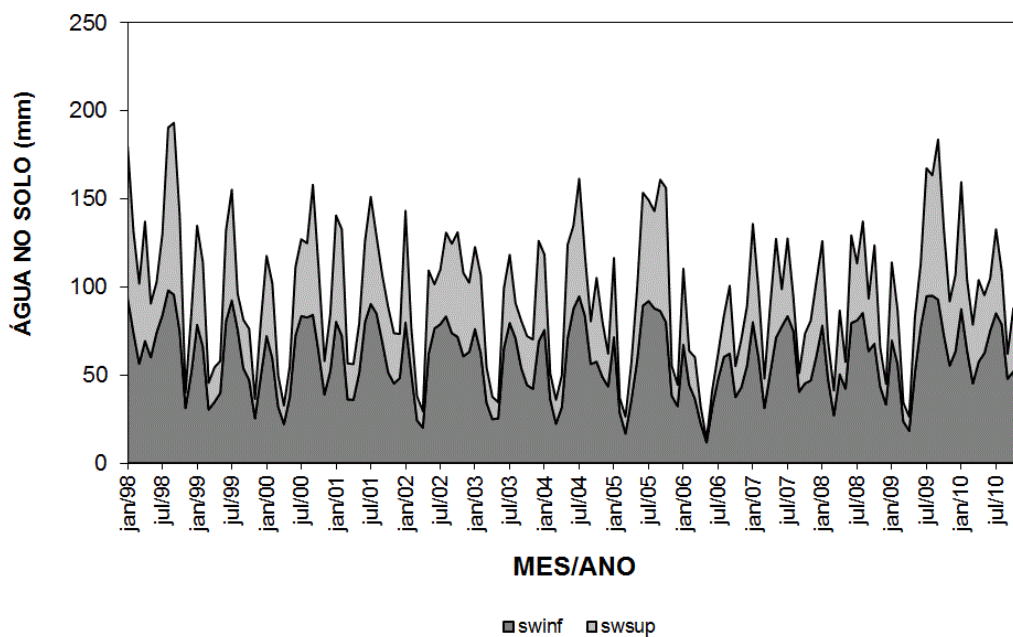


FIGURA 82– VARIAÇÕES DOS ARMAZENAMENTOS DA ÁGUA NO SOLO EM FOZ DO AREIA, SIMULADOS PELO MODELO 3-R

FONTE: O autor (2013)

Ao se comparar os armazenamentos de água no solo para as bacias até Foz do Areia e até Salto Caxias, se observam variações significativas na escala sazonal, mesmo para a camada inferior do solo. Portanto, a “memória” do armazenamento de água no solo é bastante curta para a Bacia do Iguaçu, de forma que a previsão do deflúvio depende fortemente da previsão da chuva na bacia.

4.8 ANÁLISE DA PREVISÃO DE VAZÃO

A previsão de vazão foi obtida com a aplicação do modelo 3R calibrado com as séries de chuva observada entre 1998-2010. A aplicação em modo de previsão consistiu na simulação da vazão a partir da série de chuva observada até o mês (i), em seguida, se usa como dado de entrada a chuva mensal prevista 3 meses a frente; assim se produz a vazão prevista para os meses (i+1), (i+2) e (i+3).

Considerou-se o erro da previsão como a diferença entre o deflúvio previsto e o observado. A TABELA 31 e a TABELA 32 listam as médias e os desvios padrão dos erros da previsão de deflúvio, para Foz do Areia e Salto Caxias, bem como a correlação e o coeficiente de Nash-Sutcliffe entre o deflúvio previsto e observado para os horizontes de previsão de um, dois e três meses.

TABELA 31 – ESTATÍSTICAS DOS ERROS DOS DEFLÚVIOS PREVISTOS EM FOZ DO AREIA 1 MÊS, 2 MESES E 3 MESES A FRENTE

ESTATÍSTICA			
Média do deflúvio observado	67,1 mm.mês ⁻¹		
Desvio padrão do deflúvio observado	52,1 mm.mês ⁻¹		
	Q _{PREV} (1 MES)	Q _{PREV} (2 MESES)	Q _{PREV} (3 MESES)
Média do deflúvio prevista	69 mm.mes ⁻¹	68,4 mm mes ⁻¹	68,5 mm mes ⁻¹
Desvio padrão do deflúvio previsto	23,5 mm.mes ⁻¹	18,4 mm mes ⁻¹	18,8 mm mes ⁻¹
Média do erro	1,9 mm.mes ⁻¹	1,3 mm mes ⁻¹	1,6 mm mes ⁻¹
Desvio padrão do erro	46,3 mm mes ⁻¹	54,1 mm mes ⁻¹	55,9 mm mes ⁻¹
Correlação PREV-OBS	0,46	0,18	0,06
Coeficiente de Nash Sutcliffe	0,21	0,00	-0,09
Raiz do erro quadrático médio	46,37	52,08	54,34
Erro médio absoluto	33,00	37,44	39,13

FONTE: O autor (2013)

TABELA 32– ESTATÍSTICAS DOS ERROS DOS DEFLÚVIOS PREVISTOS EM SALTO
CAXIAS 1 MÊS, 2 MESES E 3 MESES A FRENTE

ESTATÍSTICA			
Média do deflúvio observado	76,8 mm mes ⁻¹		
Desvio padrão do deflúvio observado	59,5 mm mes ⁻¹		
	Q _{PREV} (1 MES)	Q _{PREV} (2 MESES)	Q _{PREV} (3 MESES)
Média do deflúvio prevista	69,6 mm mes ⁻¹	68,5 mm mes ⁻¹	68,6 mm mes ⁻¹
Desvio padrão do deflúvio previsto	22,4 mm mes ⁻¹	14,0 mm mes ⁻¹	14,7 mm mes ⁻¹
Média do erro	-7,2 mm mes ⁻¹	-8,4 mm mes ⁻¹	-8,6 mm mes ⁻¹
Desvio padrão do erro	51,6 mm mes ⁻¹	58,3 mm mes ⁻¹	60 mm mes ⁻¹
Correlação PREV-OBS	0,52	0,25	0,03
Coefficiente de Nash Sutcliffe	0,23	0,04	-0,07
Raiz do erro quadrático médio	51,98	58,10	61,30
Erro médio absoluto	34,48	38,86	41,68

FONTE: O autor (2013)

A análise das estatísticas listadas na TABELA 31 para a UHE Foz do Areia indica que:

- 1) O erro médio da previsão com horizonte de um mês corresponde a 2,8% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 45% do desvio padrão da vazão observada;
- 2) O erro médio da previsão com horizonte de dois meses corresponde a 1,9% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 35% do desvio padrão da vazão observada;
- 3) O erro médio da previsão com horizonte de três meses corresponde a 2,3% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 36% do desvio padrão da vazão observada;
- 4) O desvio padrão do erro aumenta com o horizonte de previsão;
- 5) A correlação entre a vazão prevista e observada diminui com o horizonte de previsão, sendo 0,46 para um mês, 0,18 para dois meses e 0,06 para três meses;
- 6) O coeficiente de Nash Sutcliffe entre a vazão prevista e a observada diminui com o horizonte de previsão, sendo 0,21 para um mês, 0,00 para dois meses e -0,09 para três meses;
- 7) O erro médio absoluto e a raiz do erro quadrático médio aumentam com o horizonte de previsão.

A análise das estatísticas listadas na TABELA 32 para a UHE Salto Caxias indica que:

- 1) O erro médio da previsão com horizonte de um mês corresponde a 9% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 37,6% do desvio padrão da vazão observada;
- 2) O erro médio da previsão com horizonte de dois meses corresponde a 11% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 23,5% do desvio padrão da vazão observada;
- 3) O erro médio da previsão com horizonte de três meses corresponde a 11% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 24,7% do desvio padrão da vazão observada;
- 4) O desvio padrão do erro aumenta com o horizonte de previsão;
- 5) A correlação entre a vazão prevista e observada diminui com o horizonte de previsão, sendo 0,52 para um mês, 0,25 para dois meses e 0,03 para três meses;
- 6) O coeficiente de Nash Sutcliffe entre a vazão prevista e a observada diminui com o horizonte de previsão, sendo 0,23 para um mês, 0,04 para dois meses e -0,07 para três meses;
- 7) O erro médio absoluto e a raiz do erro quadrático médio aumentam com o horizonte de previsão.

A FIGURA 83 e a FIGURA 84 comparam os hidrogramas previstos e observados para o horizonte de previsão de 1 mês, em Foz do Areia e Salto Caxias, respectivamente. As previsões de deflúvio reproduzem a fase e a variabilidade interanual, mas as magnitudes dos maiores picos e períodos secos são subestimadas.

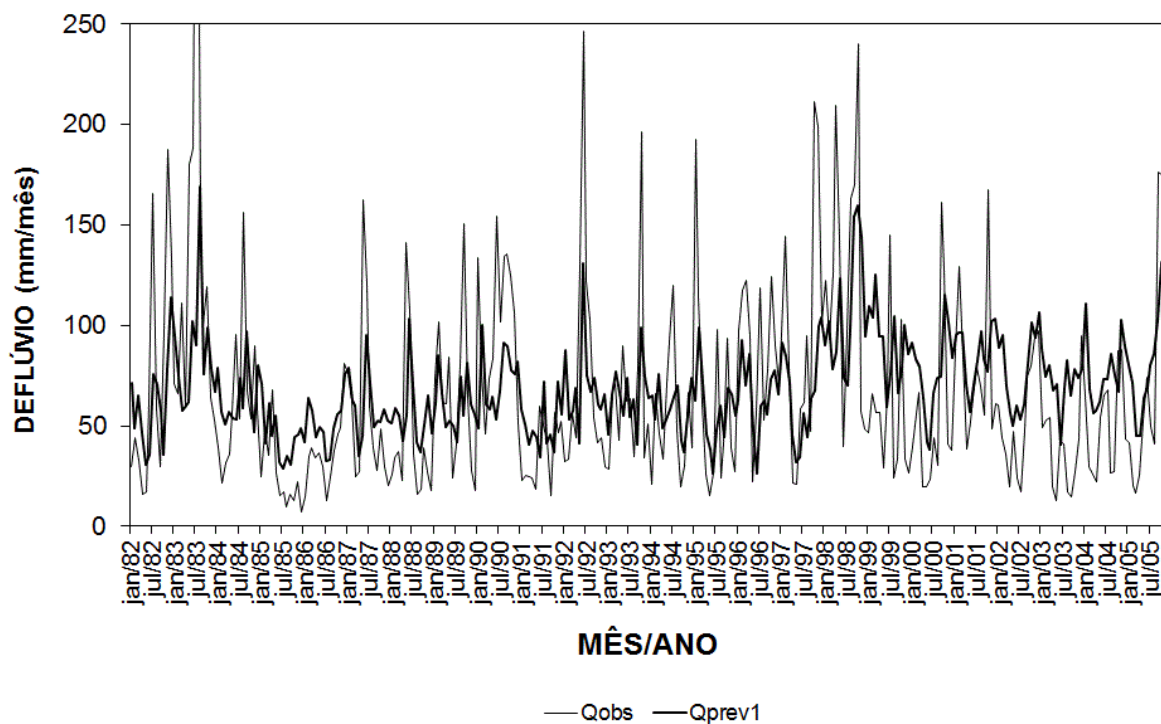


FIGURA 83– DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 1 MÊS EM FOZ DO AREIA
 FONTE: O autor (2013)

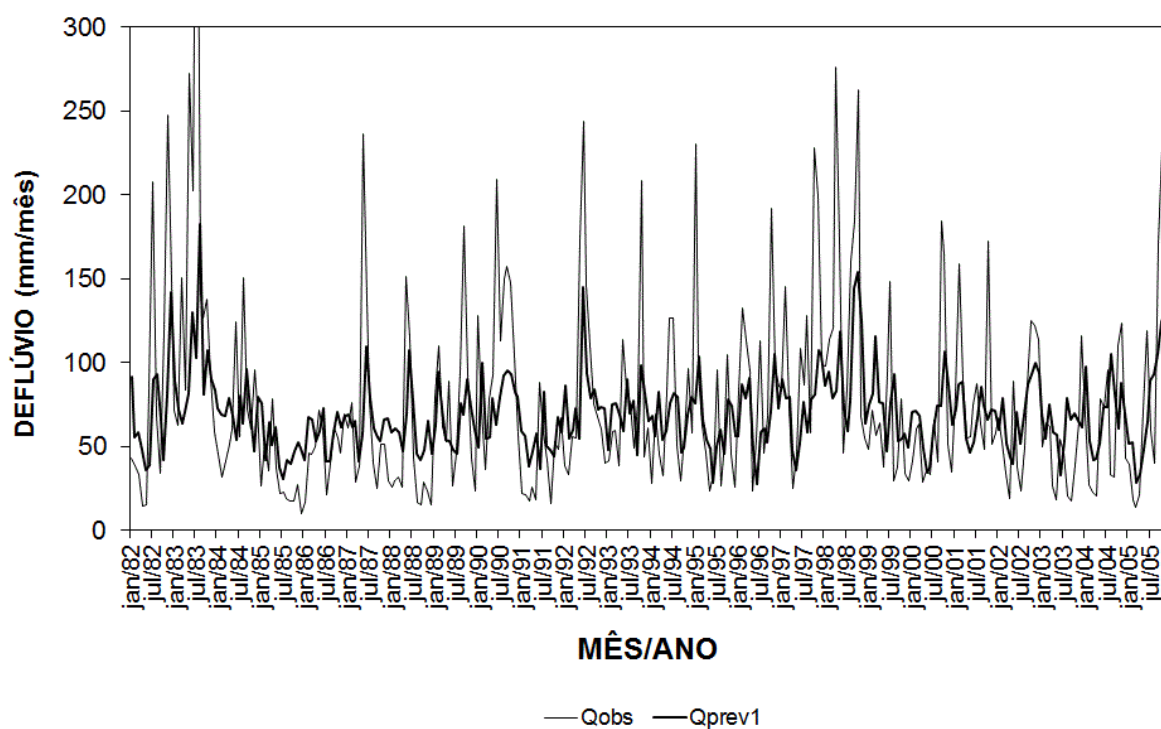


FIGURA 84– DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 1 MÊS EM SALTO CAXIAS
 FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 85 e a FIGURA 86 comparam os hidrogramas previstos e observados 2 meses a frente, em Foz do Areia e Salto Caxias, respectivamente.

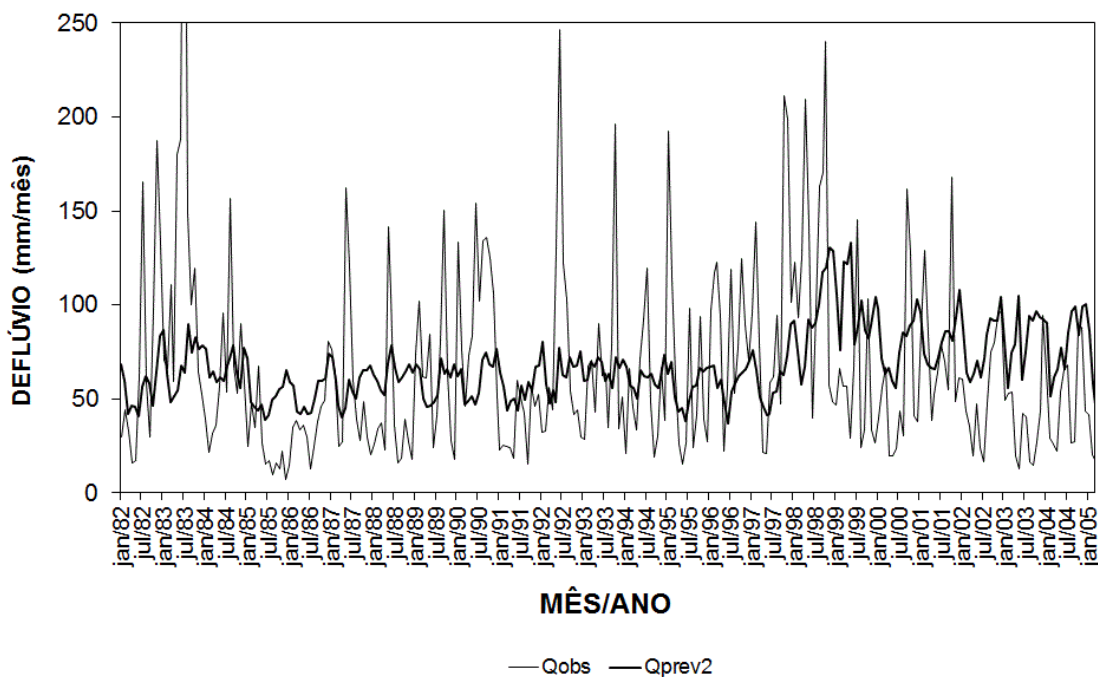


FIGURA 85– DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 2 MESES EM FOZ DO AREIA

FONTE: O autor (2013)

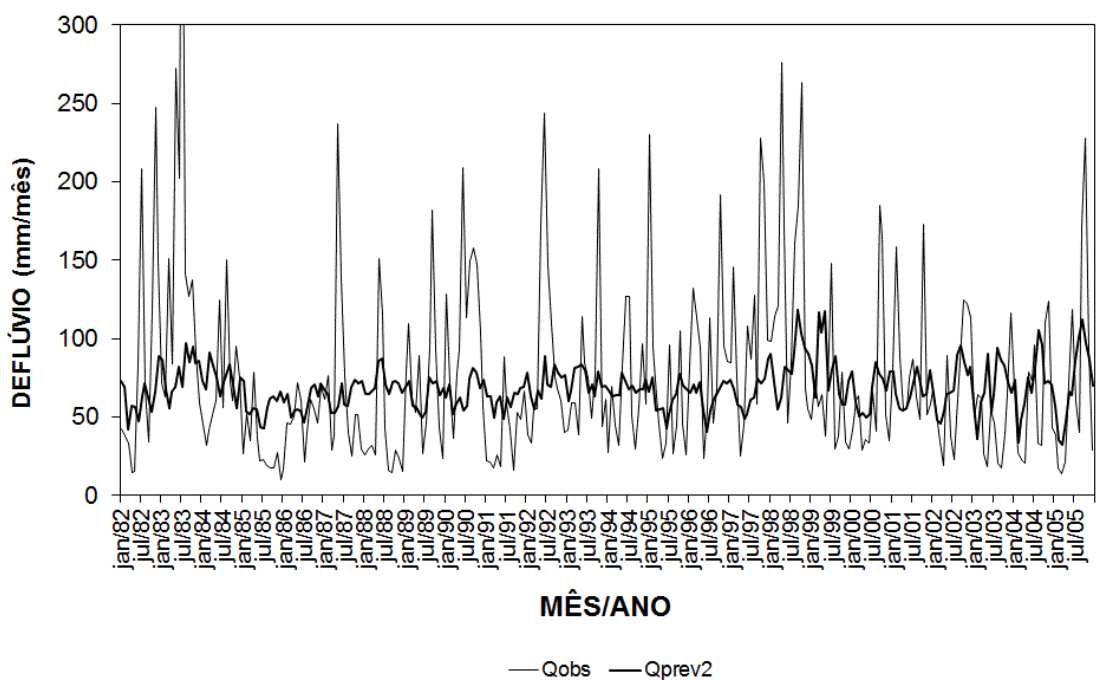


FIGURA 86– DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 2 MESES EM SALTO CAXIAS

FONTE: O autor (2013)

A FIGURA 87 e FIGURA 88 a comparam os hidrogramas previstos e observados 3 meses a frente, em Foz do Areia e Salto Caxias, respectivamente.

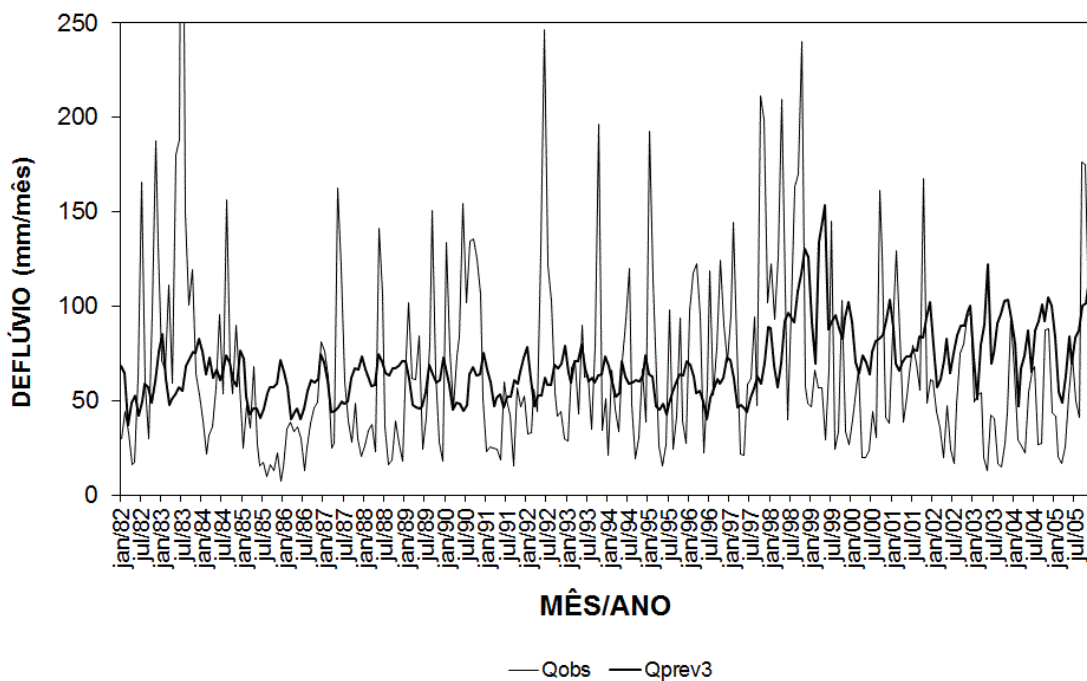


FIGURA 87– DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 3 MESES EM FOZ DO AREIA

FONTE: O autor (2013)

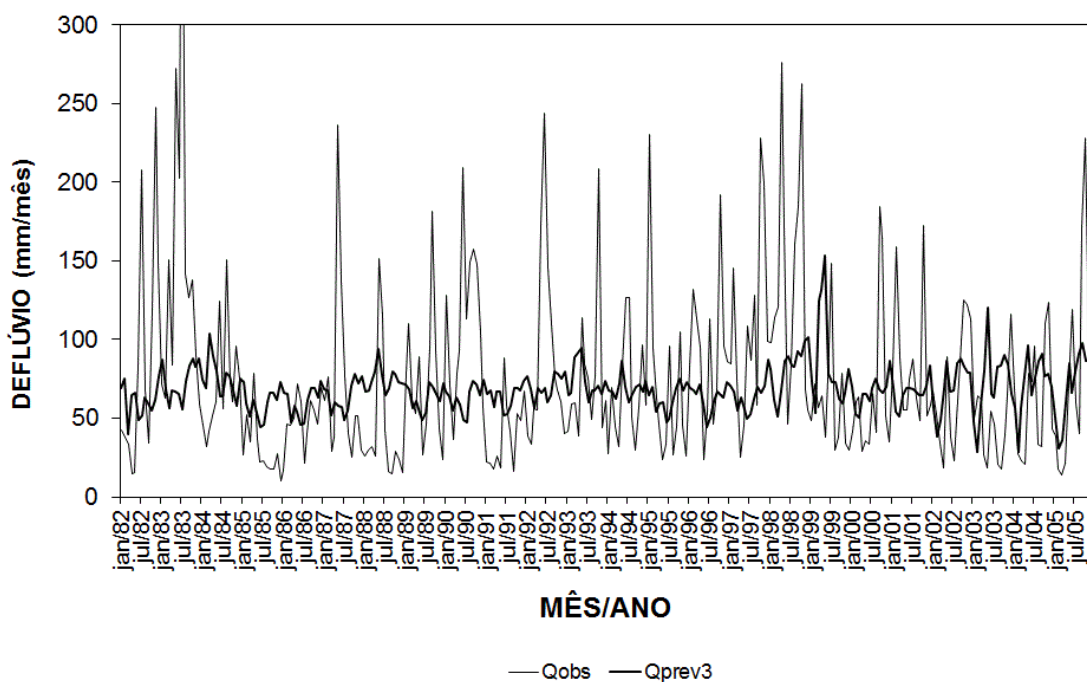


FIGURA 88– DEFLÚVIOS OBSERVADOS E PREVISTOS, COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 3 MESES EM SALTO CAXIAS

FONTE: O autor (2013)

Para as previsões de vazões com 2 e 3 meses de antecedência, verificou-se que o sistema de previsão não conseguiu representar a maioria dos picos e estiagens dos hidrogramas, resultando em baixos coeficientes de correlação tanto para a bacia até Foz do Areia, quanto para toda a bacia.

5 CONCLUSÃO

O objetivo desse estudo foi verificar se a previsão de chuva do projeto EUROBRISA é adequada para produzir previsões de vazões, com resolução mensal e horizonte de três meses, com acerto adequado para produzir previsões de vazões que sejam úteis para a otimização da geração hidrelétrica e do controle de cheias na Bacia do Iguaçu. Os instrumentos necessários para atingir o objetivo foram: (1) estimativa da chuva média na bacia a partir da rede de pluviômetros; (2) estimativa da evapotranspiração potencial a partir dos dados meteorológicos diários e de cultivo na bacia; (3) calibração de um modelo chuva-vazão-propagação concentrado (3R) para grandes bacias, com resolução mensal, e com os parâmetros calibrados para o período 1998-2010.

As conclusões gerais desse estudo estão relacionadas com as questões: (1) se as previsões de chuva sazonal já são úteis para a operação dos reservatórios no Rio Iguaçu; e (2) qual é o procedimento recomendado para transformar a previsão de chuva sazonal em previsão de aflúências naturais aos reservatórios.

Para a Bacia do Iguaçu, foram analisados os deflúvios naturais afluentes aos aproveitamentos hidrelétricos de Foz do Areia e Salto Caxias. As vazões na Bacia do Iguaçu são caracterizadas por pequena variabilidade sazonal e grande variabilidade interanual. O Rio Iguaçu é considerado um rio “rápido”, ou seja, a subida e pico dos hidrogramas dependem fortemente da magnitude e distribuição de chuvas na bacia, sendo que os eventos de chuvas severas podem ocorrer em todos os meses do ano.

O sistema de previsões de vazão proposto neste estudo teve desempenho adequado em relação à previsão da fase das grandes anomalias (secas e úmidas), mas subestimou a magnitude das mesmas. Portanto, as previsões sazonais de chuva podem ser úteis para a operação dos reservatórios durante a transição de condições de estiagem para um período de chuva normal, mas não são adequadas para o controle de cheias, quando se precisa prever transições de vazões normais para os grandes picos de vazão.

Em relação ao procedimento para produzir previsões de vazões mensais a partir das previsões sazonais de chuva, esse estudo identificou os principais elementos para atingir este objetivo, que são: (1) estimativa das séries e das

estatísticas temporais da chuva média na bacia a partir de medições locais (pluviômetros); (2) estimativa da evapotranspiração potencial mensal em grandes bacias, usando-se o método combinado de balanço energético e aerodinâmico, bem como as estimativas de variação de cultivo; (3) calibração de modelo chuva-vazão, usando como dado de entrada a chuva média na bacia, a partir das medições de pluviômetros, e séries de vazões naturalizadas para o período 1998-2010; (4) previsões de chuva compostas a partir das estatísticas das chuvas de pluviômetros e das previsões da chuva sazonal e seu desvio padrão.

O uso de chuvas estimadas em pontos de grade (GPCP) para a calibração do modelo hidrológico produziu estimativas de vazão com baixo índice de acerto, uma vez que a chuva do GPCP apresenta grandes diferenças com as observadas localmente nos pluviômetros.

Na Bacia do Iguaçu, que se caracteriza por apresentar uma distribuição de chuvas quase uniforme, mas com grande variabilidade interanual, destaca-se que:

- os reservatórios na Bacia do Iguaçu possuem pequeno volume útil, acarretando em menor índice de armazenamento (da ordem de 1 a 2 meses), de forma que a previsão da recuperação do volume do reservatório após uma estiagem pode ocorrer com eventos de chuvas normais. Portanto, o sistema de previsão deste estudo pode ser útil nessas condições;

- embora a previsão sazonal de chuva tenda a acertar a fase, ela atenua fortemente a intensidade das chuvas severas e, conseqüentemente, subestima o pico do hidrograma. Desse modo, o volume afluente ao reservatório durante os eventos de chuvas severas é subestimado, não sendo adequado para o controle de cheias;

Recomenda-se que se complemente este estudo com a implementação do modelo chuva vazão com resolução pentadal (5 dias), ou mesmo diária, para a Bacia do Iguaçu, uma vez que a resolução mensal pode ser muito grosseira para representar adequadamente a dinâmica da transformação chuva-vazão para esse tipo de bacia. A adoção da resolução diária também implica em se desenvolver um modelo de desagregação da chuva sazonal para chuva diária. Espera-se que o refinamento da resolução temporal aumente o índice de acerto do modelo hidrológico, mas há grandes incertezas sobre o desempenho do sistema de desagregação da chuva sazonal em diária.

REFERÊNCIAS

- ADLER, R.F.; HUFFMAN, G.J.; CHANG, A.; FERRARO, R.; XIE, P.; JANOWIAK, J.; RUDOLF, B.; SCHNEIDER, U.; CURTIS, S.; BOLVIN, D.; GRUBER, A.; SUSSKIND, J.; ARKIN, P. **The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present)**. J. Hydrometeor., v. 4, 1147- 1167, 2003.
- ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb)**. Disponível em: < [HTTP://HIDROWEB.ANA.GOV.BR/](http://hidroweb.ana.gov.br/)>. Acesso em: julho/2012.
- ANDERSON, D.; STOCKDALE, T.; BALMASEDA, M.; FERRANTI, L.; VITART, F.; MOLteni, F.; DOBLAS-REYES, F.; MOGENSEN, K.; VIDARD, A. **Development of the ECMWF seasonal forecast System 3**. ECMWF Technical Memorandum 503. Disponível em < http://www.ecmwf.int/publications/library/ecpublications/_pdf/tm/501-600/tm503.pdf> 2007.
- ARRIBAS, A., M. GLOVER, A. MAIDENS, K. PETERSON, M. GORDON, C. MACLACHLAN, R. GRAHAM, D. FEREDAY, J. CAMP, A. A. SCAIFE, P. XAVIER, P. MCLEAN, A. COLMAN, S. CUSACK: **The GloSea4 ensemble prediction system for seasonal forecasting**. Mon. Wea. Rev. Vol 139, 1891-1910, 2011.
- BETTINARDI, I. W., **Impactos da previsão sazonal de chuva sobre as previsões de vazões no sistema interligado sul/sudeste**. 160 f. Dissertação de Mestrado. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- BRUTSAERT, W., **Evaporation into the atmosphere**, D. Reidel., Dordrecht, Holland, 1982, table 5.1 p. 114 (adaptada).
- BURNASH, R.J.C.; FERRAL, R.L.; MCGUIRE, R.A. **A generalized streamflow simulation system-conceptual modeling for digital computers**. Technical Report. NOAA, NWS and state of California Department of Water Resources, Joint Federal-State River Forecast Center, Sacramento, California, 204 f, 1973.
- COELHO, C.A.S.; STEPHENSON, D.B.; BALMASEDA, M.; DOBLAS-REYES, F.J. ; VAN OLDENBORGH, G.J. **Towards an integrated seasonal forecasting system for South America**. J. Climate, v. 19, 3704-3721, 2006.
- COPEL-COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, **Manual de Informações Hidráulico-Operativas**, Versão 4, 12/1997.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R. e MAYS, L. W., **Applied Hydrology**, McGraw Hill, New York, 1988.
- CPTEC-CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **EUROBRISA – A EURO-BRazilian Initiative for Improving South American Seasonal Forecasts**. Disponível em: <<http://eurobrisa.cptec.inpe.br/>> Acesso em: fevereiro/2013.

- DALLEDONNE, G.L.; **Variabilidade e previsibilidade de vazões com o uso da previsão climática de chuva.** 160 f. Dissertação de Mestrado. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements.** Rome: FAO, 179p (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 24), 1977.
- EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Embrapa Milho e Sorgo.** Sistema de Produção, 1 ISSN 1679-012X Versão Eletrônica, 6ª edição, Setembro/2010. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/imanejo.htm> Acesso em: Março/2013.
- EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2012.** Ministério de Minas e Energia, 2012.
- FIETZ, C. R. and RANGEL, M. A. S.. **Época de semeadura da soja para a região de Dourados - MS. com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo.** *Eng. Agríc.* [online]. 2008, vol.28, n.4, pp. 666-672. ISSN 0100-6916.
- GRAHAM, R.J., M. GORDON, P. J. MCLEAN, , S. INESON, M. R. HUDDLESTON, M. K. DAVEY, A. BROOKSHAW and R.T.H. BARNES: **A performance comparison of coupled and uncoupled versions of the Met Office seasonal prediction General Circulation Model.** *Tellus*, 57A, 320-339, 2005.
- GUEREMY, J-F.; DEQUE., M.; BRAU, A.; PIEDELIEVRE, J-P. **Actual and potential skill of seasonal predictions using the CNRM contribution to DEMETER: coupled versus uncoupled model.** *Tellus*, 57A, 308–319, 2005.
- GUETTER, A.K.; GEORGAKAKOS, K.P.; TSONIS, A.A. Hydrologic applications of satellite data: 2. Flow simulation and soil water estimates. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D21, p. 26527 – 26538, 1996.
- GUETTER, A.K.; GEORGAKAKOS, K.P. Uncertainty in the prediction of streamflow by real-time prediction models using satellite rainfall estimates. **Preprints 13th Conference on Hydrology**, 77th AMS Annual Meeting, Long Beach, EUA, p. J109-J112, 2-7 fev, 1997.
- GUETTER, A.K.; KRAUSKOPF, R.; MINE, M.R.M. **Modelo Hidrológico com Atualização de Estado Parte I: Modelagem Hidrológica.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n. 3, p. 93-103, 2007.
- HUFFMAN, G.J, R.F. ADLER, D.T. BOLVIN, G. GU 2009: **Improving the Global Precipitation Record: GPCP Version 2.1.** *Geophys. Res. Lett.* 2009.
- INTERTECHNE; LEME; ENGEVIX; ESTEIO; COPEL. **Estudo de Impacto Ambiental - EIA: Usina Hidrelétrica de Salto Caxias.** Curitiba, 1993.
- JOLLIFFE I. T. AND D. B. STEPHENSON: **Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science.** Wiley. 240pp, 2003.
- MACEIRA, M.E.P., COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M. **Modelos de Previsão Hidrológica Aplicados ao Planejamento da Operação do Sistema Elétrico**

- Brasileiro/** Artigo apresentado no Workshop de Previsão de Vazões do ONS, 2007.
- MINE, M. R. M. **Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre/RS, 1998, 146p. Tese de Doutorado.
- NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Disponível em: < <http://precip.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: Março/2013.
- NOBRE, P.; ALMEIDA, R. A.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E. **Coupled ocean-atmosphere variations over the south atlantic ocean.** Journal of Climate, v. 25, p. 6349-6358, 2012.
- ONS: **Série de vazões naturais médias mensais.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx> Acesso em: Fevereiro/ 2013.
- ONS(a). Disponível em <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: Fevereiro/2013.
- PECK, E.L. **Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather Service River Forecast Systems.** NWS HYDRO-31. NOAA, NWS, Office of Hydrology, Silver Springs, Maryland, EUA, 1976.
- PENMAN, H.L. : **Natural evaporation from open water, bare soil and grass.** Proc. Roy. Soc. London A(194), S. 120-145, 1948.
- PRESS, W.H.; FLANNERY, B.P.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T. **Numerical recipes: the art of scientific computing.** Cambridge University Press, EUA, 818 f., 1986.
- SEMA, Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Governo do Estado do Paraná, **Bacias Hidrográficas do Paraná – Uma Série Histórica, 2008,** disponível em<<http://www.meioambiente.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=176>>, 2008.
- SOFTWARE R. **The R Project for Statistical Computing.** Disponível em: < <http://www.r-project.org>> Acesso em: fev. 2013.
- SMA-ABC; **Sistema de Monitoramento Agrometeorológico,** Fundação ABC Pesquisa e Desenvolvimento Agropecuário, 2013. Disponível em: < <http://sma.fundacaoabc.org.br/>>
- STOCKDALE, T. N., D. L. T. ANDERSON, M. A. BALMASEDA, F. DOBLAS-REYES, L. FERRANTI, K. MOGENSEN, T. N. PALMER, F. MOLTENI AND F. VITART. **ECMWF seasonal forecast system 3 and its prediction of sea surface temperature.** Clim. Dyn. doi 10.1007/s00382-010-0947-3, 2011.
- THORNTHWAITE, C.W. **An approach toward a rational classification of climate.** Geogr. Rev, v.38, p.55-94, 1948.
- TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W.; CLARKE, R. T.; CHOU, S. C.; **Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts.** Journal of Hydrology, Volume 344, Issues 1–2, Pa 112-122, 2007.

ANEXOS

ANEXO 1 – ROTINA FORTRAN MET_ANALISE.F	149
ANEXO 2 – ROTINA FORTRAN BALMES.F	153

ANEXO 1 – ROTINA FORTRAN MET_ANALISE.F

```

C      *****
C      met_analise.f
C
C      Alexandre Guetter
C      UFPR, 30/03/2013
C
C      Analise dos dados meteorologicos diarios do SIMEPAR para a
C      dissertação de mestrado do Luiz Noronha
C
C      Objetivo:
C      (1) Determinar o indice de disponibilidade
C      (2) Analise climatologica
C      *****
C
C      parameter(nm=12, nday=31)
C      parameter(ibeg=1998, iend=2012, ny=iend-ibeg+1)
C      parameter(codfal=-999.9, icodfal=-99999)
C
C      character*3 cmes(nm)
C      character*40 adum
C
C      dimension
C      &          iyc(ny), nd(ny, nm), x(ny, nm, nday), icount(ny, nm),
C      &          ifalha(ny, nm), rfalha(ny, nm),
C      &          xm(ny, nm), xy(ny), xmed(nm), xmax(nm), xmin(nm)
C
C      abrir os arquivos de entrada-----
C
C      open(10, file='Curitiba_P.txt', status='old')
C
C      abrir os arquivos de saida-----
C
C      open(20, file='Curitiba_P_falhas')
C      open(25, file='Curitiba_P_dia')
C      open(30, file='Curitiba_P_mes')
C      open(35, file='Curitiba_P_ano')
C      open(40, file='Curitiba_P_clim')
C
C      defini#Eo dos meses -----
C
C      cmes(1)='JAN'
C      cmes(2)='FEV'
C      cmes(3)='MAR'
C      cmes(4)='ABR'
C      cmes(5)='MAI'
C      cmes(6)='JUN'
C      cmes(7)='JUL'
C      cmes(8)='AGO'
C      cmes(9)='SET'
C      cmes(10)='OUT'
C      cmes(11)='NOV'
C      cmes(12)='DEZ'
C
C      header das series dia-mes-ano-----
C
C      write(20, '(5x,a40/)' ) 'Taxa de Falhas (%)'

```

```

write(25,'(3a5,a13)')'ano','mes','dia','Pressao(hPa) '
write(30,'(2a5,2a13)')'ano','mes','Pressao(hPa) ','TaxaFalha'
write(35,'(a5,a13)')'ano','Pressao(hPa) '
write(40,'(a5,3a10)')'mes','min(hPa) ','med(hPa) ','max(hPa) '
c
c  criar calend rio -----
c
do iy=1,ny
  iyc(iy)=ibeg+iy-1
  do im=1,nm
    if(im.eq.1.or.im.eq.3.or.im.eq.5.or.im.eq.7.or.im.eq.8.or.
&    im.eq.10.or.im.eq.12)nd(iy,im)=31
    if(im.eq.4.or.im.eq.6.or.im.eq.9.or.im.eq.11) nd(iy,im)=30
    if(im.eq.2)then
      nd(iy,im)=28
      if(iyc(iy).eq.2000.or.iyc(iy).eq.2004.or.iyc(iy).eq.2008.
&      or.iyc(iy).eq.2012)nd(iy,im)=29
    endif
  enddo
enddo
c
c  ler os dados do banco, gerar c#digo de falhas, contar as falhas ---
c
write(*,'(a40)')'Inicio do controle de qualidade'
itcount=0
itfal=0
c
read(10,*)adum
do iy=1,ny
  xy(iy)=0.0
  imcount=0
  do im=1,nm
    xm(iy,im)=0.0
    icount(iy,im)=0
    ifalha(iy,im)=0
    do id=1,nd(iy,im)
      icount(iy,im)=icount(iy,im)+1
      read(10,*)iyr,imr,idr,x(iy,im,id)
c  detec#Eo de falhas-----
      if(iyr.ne.iyc(iy).or.imr.ne.imr.or.idr.ne.idr)then
        x(iy,im,id)=codfal
write(*,'(3i5,f10.3,i5)')iyr,imr,idr,x(iy,im,id),ifalha(iy,im)
        backspace(10)
      endif
c  serie mensal-----
      if(x(iy,im,id).ne.codfal)then
        xm(iy,im)=xm(iy,im)+x(iy,im,id)
        itcount=itcount+1
      endif
      if(x(iy,im,id).eq.codfal)then
        ifalha(iy,im)=ifalha(iy,im)+1
        itcount=itcount+1
      endif
      write(25,'(3i5,f12.2)')iyc(iy),im,id,x(iy,im,id)
c  final do loop di rio-----
    enddo
    rfalha(iy,im)=float(ifalha(iy,im))/
&    float(icontains(iy,im))
    if(rfalha(iy,im).eq.0.0)
&    xm(iy,im)=(xm(iy,im))/float(icontains(iy,im))

```



```

        if(rfalha(iy,im).gt.0.0.and.rfalha(iy,im).le.0.33)
&           xm(iy,im)=(xm(iy,im))/
&           (float(icount(iy,im))-float(ifalha(iy,im)))
        if(rfalha(iy,im).gt.0.33) xm(iy,im)=codfal
        write(30,'(2i5,2f13.2)') iyc(iy),im,xm(iy,im),rfalha(iy,im)
        write(*,'(2i5,2f9.2,2i5)') iyc(iy),im,xm(iy,im),
&           rfalha(iy,im),icount(iy,im),ifalha(iy,im)
        if(xm(iy,im).ne.codfal) then
            xy(iy)=xy(iy)+xm(iy,im)
            imcount=imcount+1
        endif
        rfalha(iy,im)=rfalha(iy,im)*100.
        itfal=itfal+ifalha(iy,im)
c     final do loop mensal-----
        enddo
        if(imcount.eq.nm) xy(iy)=xy(iy)/float(nm)
        if(imcount.lt.nm.and.imcount.gt.8)
&           xy(iy)=xy(iy)/float(imcount)
        if(imcount.lt.8) xy(iy)=codfal
        write(35,'(i5,f12.2)') iyc(iy),xy(iy)
        write(*,'(2i5,f12.2)') iyc(iy),imcount,xy(iy)
c     final do loop anual-----
        enddo
        write(*,'(a40)') 'Final do controle de qualidade'
        pause
c
c     escrever o arquivo de falhas (20)-----
c
        rtfal=100*float(itfal)/float(itcount)
        write(20,'(10x,a10,f6.2,/)' ) '%totfal=',rtfal
        write(20,'(a5,12a6)') 'ANO',(cmes(im),im=1,nm)
        do iy=1,ny
            write(20,'(i5,12f6.1)') iyc(iy),(rfalha(iy,im),im=1,nm)
        enddo
c
c     escrever o arquivo de climatologia (40)-----
c
        xminano=10000.
        xmaxano=0.0
        xmedano=0.0
        do im=1,nm
            xmin(im)=10000.
            xmax(im)=0.0
            xmed(im)=0.0
            nydum=0
            do iy=1,ny
c     calcular o maximo-----
                if(xm(iy,im).ne.codfal.and.xm(iy,im).gt.xmax(im)) then
                    xmax(im)=xm(iy,im)
                    if(xmax(im).ne.codfal.and.xmax(im).gt.xmaxano)
&                       xmaxano=xmax(im)
                endif
c     calcular o minimo-----
                if(xm(iy,im).ne.codfal.and.xm(iy,im).lt.xmin(im)) then
                    xmin(im)=xm(iy,im)
                    if(xmin(im).ne.codfal.and.xmin(im).lt.xminano)
&                       xminano=xmin(im)
                endif
c     calcular a media-----
                if(xm(iy,im).ne.codfal) then

```

```

        xmed(im)=xmed(im)+xm(iy,im)
        nydum=nydum+1
    endif
enddo
xmed(im)=xmed(im)/float(nydum)
write(40,'(a5,3f10.2)') cmes(im),xmin(im),
&                                xmed(im),xmax(im)
write(*,'(a5,3f10.2)') cmes(im),xmin(im),
&                                xmed(im),xmax(im)
enddo
c  calcular a MLT-anual-----
do im=1,nm
    if(xmed(im).ne.codfal)xmedano=xmedano+xmed(im)
enddo
xmedano=xmedano/float(nm)
write(40,'(a5,3f10.2)') 'ANO',xminano,xmedano,xmaxano
write(*,'(a5,3f10.2)') 'ANO',xminano,xmedano,xmaxano
pause
c
stop
end

```

ANEXO 2 – ROTINA FORTRAN BALMES.F

```

C      *****
C      This program computes the monthly water balance.
C      Land-surface water balance, based on linear evap model.
C      Actual evap=Potential evap * soil water saturation fraction
C
C      Alex Guetter UFPR, 08/04/2010
C      *****
C
      parameter (nm=12,ibeg=1998,iend=2010)
      parameter (ny=iend-ibeg+1,np=ny*nm)
      parameter (xkc1=1.00,xkc2=1.00,xkc3=1.00,xkc4=1.00,
&              xkc5=1.00,xkc6=1.00,xkc7=1.00,xkc8=1.00,
&              xkc9=1.00,xkc10=1.00,xkc11=1.00,xkc12=1.00)
C
      character*80 adum
      dimension  pet(np),q(np),p(np),aet(np),x(np),r(np),
&              petave(nm),aetave(nm),qave(nm),pave(nm),xave(nm),
&              petsdev(nm),aetsdev(nm),qsdev(nm),psdev(nm),xsdev(nm),
&              pet1(ny,nm),q1(ny,nm),p1(ny,nm),x1(ny,nm),aet1(ny,nm),
&              icy(ny)
C      -----
C      open input files
C      -----
      open(unit=11,file='inbal_month_1.txt',status='old')
      open(unit=12,file='EVT_Nascentes_FAreia.txt',status='old')
      open(unit=13,file='Chuva_Nascentes_FAreia.txt',status='old')
      open(unit=14,file='DEF_Nascentes_FAreia.txt',status='old')
C      -----
C      open output files
C      -----
      open(unit=22,file='Flux_FAreia_1')
      open(unit=25,file='Clim_FAreia_1')
      open(unit=30,file='SW_FAreia_1')
C
C      write output file headers-----
C
      write(22,'(2a5,5a8)') 'mes','ano','pet','aet','prec','outf'
      write(25,'(a3,7a11)') 'mes','pet','aet','prec','outf','SW'
      write(30,'(2a5,a8)') 'mes','ano','SW'
C
C      read inial values and coeff-----
C
      read(11,'(a)') adum
      read(11,*) x0,dt,xi,c,cpet
C
C      x0=soil water capacity in mm (initial guess)
C      dt=time interval (months)
C      xi=soil water initial value (fraction of x0)
C      c=groundwater coefficient (applied to observed streamflow)
C      cpet=PET correction coefficient (degree of belief)
C
C      read input fluxes-----
C
      read(12,'(a)') adum
      read(13,'(a)') adum
      read(14,'(a)') adum

```

```

c
  it=0
  ip=0
  do iy=1,ny
    icy(iy)=ibeg+iy-1
    do im=1,nm
      ip=ip+1
      read(12,*)iyr,imo,pet(ip)
      if(imo.eq.1)pet(ip)=pet(ip)*xkc1
      if(imo.eq.2)pet(ip)=pet(ip)*xkc2
      if(imo.eq.3)pet(ip)=pet(ip)*xkc3
      if(imo.eq.4)pet(ip)=pet(ip)*xkc4
      if(imo.eq.5)pet(ip)=pet(ip)*xkc5
      if(imo.eq.6)pet(ip)=pet(ip)*xkc6
      if(imo.eq.7)pet(ip)=pet(ip)*xkc7
      if(imo.eq.8)pet(ip)=pet(ip)*xkc8
      if(imo.eq.9)pet(ip)=pet(ip)*xkc9
      if(imo.eq.10)pet(ip)=pet(ip)*xkc10
      if(imo.eq.11)pet(ip)=pet(ip)*xkc11
      if(imo.eq.12)pet(ip)=pet(ip)*xkc12
      read(13,*)iyr,imo,p(ip)
      read(14,*)iyr,imo,qdum,q(ip)
      write(*,'(2i5,3f8.1)')iyr,imo,pet(ip),p(ip),q(ip)
      pet(ip)=cpet*pet(ip)
      x(ip)=0.
    enddo
c   pause
  enddo
  PAUSE
c
c   water balance-----
c
  ip=0
  x(1)=xi*x0
  r(1)=xi
  aet(1)=pet(1)*r(1)
11  do 100 iy=1,ny
      nm1=nm
      if(iy.eq.ny)nm1=nm-1
      do 200 im=1,nm1
        ip=ip+1
        x(ip+1)=(dt*(p(ip+1)-pet(ip+1)*x(ip)/2./x0-
&          (1.+c)*q(ip+1))+x(ip))/(1.+dt*pet(ip+1)/2./x0)
c
        r(ip+1)=(x(ip)+x(ip+1))/x0/2.
        aet(ip+1)=pet(ip+1)*r(ip+1)
c
c      write(*,'(2i5,6f7.1)')im,icy(iy),pet(ip),p(ip),q(ip),x(ip+1),
c      &          r(ip+1),aet(ip+1)
  200  continue
c      pause
  100  continue
c
c   search for rmax and rmin-----
c
  ip=0
  rmax=0.
  xmin=10000.
  do iy=1,ny
    do im=1,nm

```

```

        ip=ip+1
        if(r(ip).gt.rmax) rmax=r(ip)
        if(x(ip).lt.xmin) xmin=x(ip)
    enddo
enddo
c
c   secure x>0.-----
c
    if (xmin.lt.0.0) then
        x0=x0+10.0
        x(1)=xi*x0
        write(*,'(a,i5,3x,a,f7.2,3x,a,f6.3)') 'it=',it,'x0=',x0,
&   'xmin=',xmin
        ip=0
        go to 11
    endif
c
c   iterations to satisfy 0.82<rmax<0.83-----
c
    it=it+1
c
    if (rmax.lt.0.82) then
        x0=x0-1.0
        x(1)=xi*x0
        write(*,'(a,i5,3x,a,f7.2,3x,a,f6.3)') 'it=',it,'x0=',x0,
&   'rmax=',rmax
c
        pause
        ip=0
        go to 11
    endif
c
    if (rmax.gt.0.83) then
        x0=x0+1.0
        x(1)=xi*x0
        write(*,'(a,i5,3x,a,f7.2,3x,a,f6.3)') 'it=',it,'x0=',x0,
&   'rmax=',rmax
c
        pause
        ip=0
        go to 11
    endif
c
c   output to ratio_month & flux_month-----
c
    ip=0
    xmin1=10000
    do iy=1,ny
        iyr=iy+ibeg-1
        do im=1,nm
            ip=ip+1
            year=iyr+float(im-1)/12.
            clim=pet(ip)/p(ip)
            run=q(ip)/p(ip)
            ppe=aet(ip)/pet(ip)
            write(22,'(2i5,6f8.1)') im,iyr,pet(ip),aet(ip),p(ip),q(ip)
            if(x(ip).le.xmin1) xmin1=x(ip)
        enddo
    enddo
c
    write(*,'(10x,a,f8.2)') 'xmin=',xmin1
c

```

```

c   remove historical minimum-----
c
c   ip=0
c   do iy=1,ny
c       iyr=ibeg+iy-1
c       do im=1,nm
c           ip=ip+1
c           x(ip)=x(ip)-xmin1
c           x(ip)=x(ip)/x0
c           write(30,'(2i5,3f8.1)')im,iyr,x(ip)
c       enddo
c   enddo
c
c   climatology-----
c
c   ip=0
c   do iy=1,ny
c       do im=1,nm
c           ip=ip+1
c           pet1(iy,im)=pet(ip)
c           aet1(iy,im)=aet(ip)
c           p1(iy,im)=p(ip)
c           q1(iy,im)=q(ip)
c           x1(iy,im)=x(ip)
c       enddo
c   enddo
c
c   cmin=10000.
c   do im=1,nm
c       call moment(nm,im,pet1,ny,ave,sdev)
c       petave(im)=ave
c       petsdev(im)=sdev
c       call moment(nm,im,aet1,ny,ave,sdev)
c       aetave(im)=ave
c       aetsdev(im)=sdev
c       call moment(nm,im,p1,ny,ave,sdev)
c       pave(im)=ave
c       psdev(im)=sdev
c       call moment(nm,im,q1,ny,ave,sdev)
c       qave(im)=ave
c       qsdev(im)=sdev
c       call moment(nm,im,x1,ny,ave,sdev)
c       xave(im)=ave
c       xsdev(im)=sdev
c       if(ave.lt.cmin)cmin=ave
c   enddo
c
c   remove climatological minimum-----
c
c   do im=1,nm
c       xave(im)=xave(im)-cmin
c       xave(im)=xave(im)
c   enddo
c
c   write clim output-----
c
c   write(*,'(a3,7a11)')'mes','pet','aet','prec','outf','SW'
c   do im=1,nm
c       write(25,'(i3,7f11.2)')im,petave(im),aetave(im),
&           pave(im),qave(im),xave(im)

```

```

        write(*,'(i3,7f11.2)')im,petave(im),aetave(im),
&         pave(im),qave(im),xave(im)
    enddo
    pause
c
    stop
    end
c
c *****
c   Subroutine MOMENT
c *****
SUBROUTINE MOMENT(nm,iff,DATA,N,AVE,SDEV)
DIMENSION DATA(N,nm)
IF(N.LE.1)PAUSE 'N must be at least 2'
S=0.
DO 11 J=1,N
    S=S+DATA(J,iff)
11 CONTINUE
AVE=S/N
VAR=0.
DO 12 J=1,N
    S=DATA(J,iff)-AVE
    P=S*S
    VAR=VAR+P
12 CONTINUE
VAR=VAR/(N-1)
SDEV=SQRT(VAR)
RETURN
END

```