



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDOS DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS GLOBAIS NA BACIA DO RIO MADEIRA.

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPQ/INPE)**

Lucas GarofoloLopes(FATEC, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: lucas.garofolo@inpe.br

Dr. Daniel Andres Rodriguez (CCST/INPE, Orientador)

E-mail: daniel.andres@inpe.br

COLABORADOR

José Lázaro de Siqueira Júnior (CCST/INPE)

JULHO DE 2013

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Nome: **Lucas Garofolo Lopes**

Local de Trabalho: **CPTEC / INPE**

Título do projeto: **Estudos dos efeitos das mudanças globais na bacia do Rio Madeira.**

Tipo de bolsa: **Bolsa PIBIC-IC**

Período: **Agosto/2012 – Agosto/ 2013**

ESTUDOS DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS GLOBAIS NA BACIA DO RIO MADEIRA

Lucas Garofolo Lopes¹ (FATEC, Bolsista PIBIC/CNPq)

Daniel Andres Rodriguez² (CCST/INPE, Orientador)

José Lázaro de Siqueira Júnior³ (CCST/INPE, Colaborador)

RESUMO

Eventos hidroclimáticos extremos tem se tornado mais recorrente nas últimas décadas na bacia Amazônica. Ainda, o quarto relatório do IPCC mostra que um grande número das projeções dos modelos atmosféricos concorda na tendência de incrementos na frequência e valor destes extremos. No intuito de analisar esses eventos, sob o impacto dos efeitos das mudanças globais na bacia do Rio Madeira, foram desenvolvidas análises de series de tempo das projeções futuras de descargas.

Este trabalho apresenta projeções de descargas máximas com base nas vazões geradas pelo Modelo Hidrológico de Grandes Bacias do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MGB-INPE) desenvolvido pelo Centro de Ciências do Sistema Terrestre. O modelo MGB foi alimentado com resultados dos cenários de mudanças climáticas desenvolvido no CPTEC-INPE com o modelo atmosférico Eta, e com dados de alguns dos modelos atmosféricos coordenados pelo CMIP5: MIROC5, CSIRO-Mk3.6.0, IPSL e o HadGEM2.

Foram aplicados dois métodos para a obtenção do Tempo de Recorrência: a análises de dados por cima de um limiar através da Distribuição Pareto Generalizada (GPD) e a análises de valores extremos anuais através da Distribuição Generalizada de Extremos (GEV). As projeções de ambos os métodos, retornam vazões máximas de 2, 5, 10, 50 e 100 anos para o exutório da Bacia do Rio Madeira, no período histórico de 1970 a 1990 e nos períodos futuros 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Os resultados apresentam uma importante variabilidade entre modelos durante o período histórico, com o GEV subestimando as vazões, em geral, e o GPD superestimando-as. Na maioria dos modelos, a metodologia GEV mostra a diminuição das descargas com menores tempos de retorno, enquanto que aquelas associadas com maiores tempos de retorno se incrementam até o final do século. Por outro lado, a aplicação do GPD resulta, em geral, no incremento das descargas máximas sob o impacto das mudanças climáticas.

¹ Aluno do Curso de Tecnologia da Informação - **E-mail: lucas.garofolo@inpe.br**

² Centro de Ciência do Sistema Terrestre - **E-mail: daniel.andres@inpe.br**

³ Centro de Ciência do Sistema Terrestre - **E-mail: jose.lazaro@cptec.inpe.br**

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	3
2.1.	OBJETIVO GERAL	3
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3.	A BACIA DO RIO MADEIRA	4
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	6
4.1.	DADOS OBSERVADO	6
4.2.	CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS REGIONAIS DO MODELO ATMOSFÉRICO ETA	6
4.3.	CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE MODELO ATMOSFÉRICO GLOBAL	7
4.4.	MODELO MGB	8
4.5.	MÉTODOS PROBABILÍSTICOS PARA ANÁLISES DE VALORES EXTREMOS	9
4.5.1.	GEV - Distribuição Generalizada de Valores Extremos	9
4.5.2.	GPD - Distribuição Generalizada de Pareto	10
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	11
5.1.	DESCARGAS MÉDIAS MENSAIS	11
5.2.	VAZÕES MÁXIMAS	11
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	18
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topografia da Bacia do Rio Madeira.....	4
Figura 2 – Área da bacia Amazônica e a bacia do Rio Madeira	5
Figura 3 – Média Residual do cenário CTL do modelo global ETA-INPE, sendo u o limiar.	11
Figura 4 – Descargas médias mensais na estação Fazenda Vista Alegre na bacia do Rio Madeira observadas e simuladas e projetadas com base nas projeções de modelos atmosféricos.....	12
Figura 5 – Vazões máximas, para diferentes tempos de retorno utilizando o método GEV e GPD, projetadas na Bacia do Rio Madeira, estação Fazenda Vista Alegre no período de 1970 a 1990	13
Figura 6 – Diferença de vazões entre os resultados obtidos de 2011 a 2040 e 1970 a 1990 (a) e (b), 2041 a 2070 e 1970 a 1990 (c) e (d), 2071 a 2100 e 1970 a 1990 (e) e (f) com a metodologia GEV e GPD.....	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 1970 a 1990 utilizando a metodologia GEV.	13
Tabela 2 - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 1970 a 1990 utilizando a metodologia GPD.....	14
Tabela 3.a - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2011 a 2040 utilizando a metodologia GEV.	15
Tabela 3.b - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2041 a 2070 utilizando a metodologia GEV.....	15
Tabela 3.c - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2071 a 2100 utilizando a metodologia GEV.....	15
Tabela 4.a - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2011 a 2040 utilizando a metodologia GPD.....	16
Tabela 4.b - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2041 a 2070 utilizando a metodologia GPD.....	16
Tabela 4.c - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2071 a 2100 utilizando a metodologia GPD.....	16

LISTA DE ABREVIATURA

ANA	-	Agência Nacional de Águas
BADC	-	<i>British Atmospheric Data Centre</i>
CMIP5	-	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i>
CPC	-	Centro de Previsão Climática (<i>Climate Prediction Center</i>)
CPTEC	-	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CSIRO	-	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization</i>
EVT	-	<i>Extreme Value Theory</i>
GEV	-	<i>Generalized Extreme Value</i>
GPD	-	<i>Generalized Pareto Distribution</i>
HadCM3	-	<i>Hadley Center Coupled Model</i>
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	-	<i>Intergovernmental Panel of Climate Changes</i>
IPH	-	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
IPSL	-	<i>Institute Pierre Simon Laplace</i>
MGB	-	Modelo de Grandes Bacias
MIROC	-	<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i>
NERC	-	<i>Natural Environment Research Council's</i>
NOAA	-	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Administração Oceânica e Atmosférica Nacional)
NCEP	-	<i>National Centers for Environmental Prediction</i> (Centros Nacionais de Previsão Ambiental)

PROCLIMA – Programa de Monitoramento Climático em Tempo Real da Região Nordeste

QTR – Vazão por Tempo de Retorno

SENAMHI - Serviços Nacionais de Meteorologia e Hidrologia

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Amazônica é a maior bacia hidrográfica do mundo, abrangendo uma área de 7 milhões de km², estendendo-se por Colômbia, Equador, Venezuela, Bolívia e Peru, onde se encontra a nascente do rio que dá o nome da bacia, o Rio Amazonas. Os rios, córregos e ribeirões são de extrema importância no Amazonas, possuindo uma topografia plana e cursos de água caudalosos, facilitando o transporte fluvial, principal meio de transporte da região Norte.

O clima na região da Bacia do Rio Amazonas é equatorial, variando temperaturas entre 22 a 35 graus, dependendo da localização. Pelas suas magnitudes, a bacia é foco de muitas pesquisas, mostrando influência e modificações em seu ecossistema, como o aumento da temperatura global e o aumento da temperatura na superfície causada pelo desmatamento (NOBRE, 2011).

Extremos climáticos são definidos como sendo a ocorrência de um evento climático com valores acima ou abaixo de um valor limite, como é o caso das cheias e secas, respectivamente. Eventos estes, acarretados por mudanças climáticas serão mais frequentes, resultando em alterações nas intensidades, duração e extensão territorial dos extremos climáticos.

Sob este foco, o Estudo das mudanças globais na bacia do rio Madeira foi elaborado, visando analisar as vazões para tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos. Através de simulações com modelo hidrológico alimentado por dados provenientes do modelo atmosférico ETA-CPTEC e modelos globais utilizados no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*. Para medir os extremos máximos foi utilizado duas metodologias da Teoria de Valores Extremos (EVT): uma metodologia que utiliza somente os valores máximos de vazão de cada ano, denominada Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV – *Generalized Extreme Value distribution*) e, uma metodologia que estuda os excedentes de um limiar, determinado através da média residual da série temporal de vazão, conhecido como Distribuição Generalizada de Pareto (GPD – *Generalized Pareto Distribution*), ambas sob o pressuposto de estacionariedade.

Foi realizada uma comparação das projeções de extremos entre os modelos atmosféricos globais e a vazão observada, visando à importância nos estudos que os eventos extremos estão atualmente, como é o caso do Relatório Especial sobre Gerenciamento de Riscos de Eventos Extremos e Desastres do Painel Intergovernamental de mudanças climáticas (IPCC – SREX) (2012).

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo estudar os efeitos das mudanças globais na bacia do Rio Madeira.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os processos hidrológicos em macro bacias na região Amazônica, em particular na bacia do Rio Madeira;
- Mensurar os efeitos das mudanças climáticas e no uso e cobertura da terra na resposta hidrológica da bacia;
- Analisar os impactos das mudanças climáticas nas vazões extremas geradas pelo modelo hidrológico na bacia do Rio Madeira.

3. A BACIA DO RIO MADEIRA

A bacia do rio Madeira possui superfície de 1.420.000 km² representando 23% do total da bacia Amazônica, tendo 51% do seu território na Bolívia, 42% no Brasil e 7% no Peru, possuindo as seguintes unidades proporcionais: Andes (15%), planície Amazônica (44%) e território brasileiro (41%). A Figura 2 mostra a localização da bacia do rio Madeira dentro da Bacia Amazônica e dividida entre seus países.

O rio que dá o nome a bacia é um dos mais importantes tributários do rio Amazonas com vazão média anual de 31.200 m³ s⁻¹, nasce com o nome de rio Beni na Cordilheira dos Andes e ao encontrar com o rio Mamoré, na fronteira entre Brasil e Bolívia, recebe o nome de Madeira.

O clima é do tipo equatorial (quente e úmido), com zonas de instabilidade climáticas, influenciados por fenômenos de circulação atmosférica, chuvas intensas, alto índice de vazão e umidade da esfera gasosa que envolve a terra (RIBEIRO NETO, 2006). A precipitação média anual na bacia é de 1.940 mm. A área que o Madeira se encontra apresenta relevo variado com elevadas altitudes na região Andina da Bolívia, aproximando-se de 6400 metros, até profundos vales atingindo a planície amazônica com quase 500 metros como mostra a Figura 1.

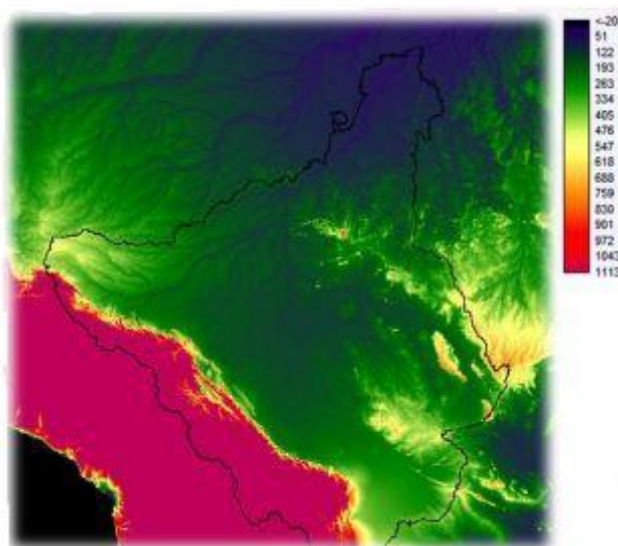


Figura 1 - Topografia da Bacia do Rio Madeira

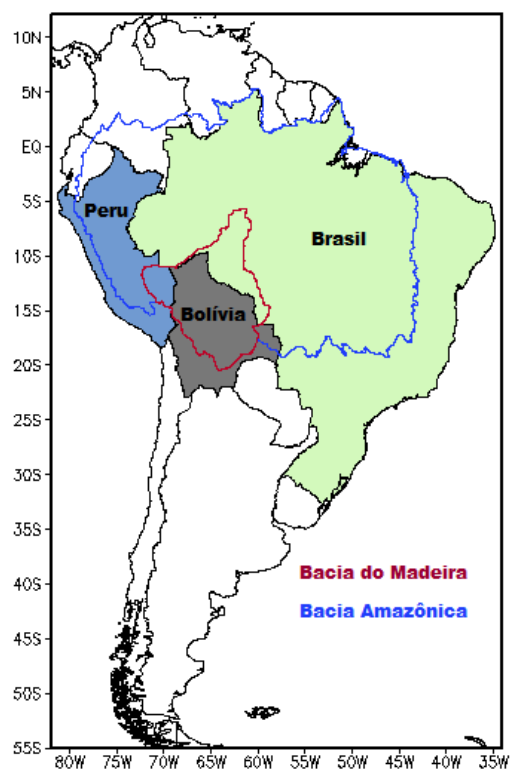


Figura 2 – Área da bacia Amazônica e a bacia do Rio Madeira

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. DADOS OBSERVADOS

Os dados meteorológicos observados utilizados na elaboração deste trabalho foram obtidos da base de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, dos Serviços Nacionais de Meteorologia e Hidrologia (SENAMHI) do Peru e Bolívia. As informações sobre as estações fluviométricas da bacia foram obtidas da Agencia Nacional de Águas – ANA.

Os dados de precipitação no período 1970-1990 foram utilizados na correção dos erros sistemáticos nos campos de precipitação simulados pelos modelos atmosféricos. As informações de descarga nas estações fluviométricas no mesmo período permitem a avaliação do desempenho do modelo hidrológico na simulação de vazões no tempo presente.

4.2. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS REGIONAIS DO MODELO ATMOSFÉRICO ETA

O modelo Eta é utilizado operacionalmente no CPTEC/INPE desde 1997 para o prognóstico de tempo (Chou, 1996) com base na qual foi desenvolvida uma versão para uso em estudos de mudanças climáticas que requerem integrações de longo prazo (Pesquero et al. 2009; Chou et al. 2012; Marengo et al. 2012). O modelo utiliza a coordenada vertical ETA (Mesinger et al, 1984). As equações dinâmicas são resolvidas através do esquema modificado de Mesinger (1974), os termos de inércia gravidade através de Janjic (1979) e o método de Arakawa é utilizado na diferenciação espacial, permitindo a conservação de entropia e energia (Janjic 1984; Mesinger 1984; Mesinger et al. 1988). Três esquemas de convecção estão disponíveis com opções no modelo: Betts-Miller-Janjic (Betts and Miller 1986; Janjic 1994), Kain-Fritsch (Kain 2004) e Kain-Fritsch com fluxo de momentum (Bastos 2007). A micro física de nuvens é resolvida de acordo com Ferrier et al. (2002) e a transferência radiativa com o esquema GFDL (Lacis and Hansen 1974; Schwarzkopf and Fels 1991). O modelo utiliza o esquema de Mellor-Yamada 2.5 para a representação das trocas turbulentas na vertical (Mellor and Yamada 1982; Janjic 2002; Mesinger 2010), e a teoria de Monin-Obukhov na simulação das trocas de energia na

camada limite superficial (Zilitinkevich, 1995; Janjic, 1994; Mesinger et al. 1996). O modelo de superfície utilizado é o NOAH, originalmente desenvolvido por Pan e Mahrt (1987), e modificado por Chen(1997) e Ek (2003).

Para este trabalho foram utilizadas informações das downscaling dinâmico de quatro membros do *Hadley Center Coupled Model* (Chou et al., 2011) desenvolvido com o modelo Eta para o período histórico (1970-1990) e as projeções para o futuro (2011-2099). Estas informações são utilizadas para alimentar o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias – MGB-INPE.

4.3. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE MODELO ATMOSFÉRICO GLOBAL

Os modelos atmosféricos utilizados nesse trabalho foram escolhidos com base em alguns modelos utilizados pelo CMIP5 (IPCC, 2007) no *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

Um deles é a nova versão do *Model for Interdisciplinary Research on Climate*, conhecido como MIROC. Desenvolvido pelo Center for Climate System Research (CCSR) da Universidade de Tokyo, o modelo encontra-se na versão 5, que diferente da sua versão anterior, obteve uma atualização das parametrizações do modelo para aumentar a resolução, porém com o mesmo tempo de execução que o MIROC3. Esta versão é baseada no núcleo dinâmico espectral e incluem novas metodologias físicas (Numagutiet al. 1997), mostrando melhorias na precipitação, campos atmosféricos e na simulação do El Niño (Watanabe, 2010).

Utilizou-se também o CSIRO-Mk3.6.0, atualização do GCM CSIRO-Mk3.5. Com uma melhora na resolução norte-sul reforçada nos oceanos comparada ao anterior, é capaz de simular interações sazonais tropicais e extratropicais (Collier *et al.*, 2011). Na versão utilizada neste trabalho, uma das melhorias foi no regime de radiação, onde houve uma inclusão de um sistema de aerossol interativo (Rotstayn *et al.*, 2010), permitindo o estudo de impactos de um número de agentes aerossóis no clima global.

O IPSL-CM5B, também utilizado neste trabalho, é um *Earth System Model* (ESM) que permite a execução de um conjunto de modelos com diferentes graus de complexidade, vários números de componentes, processos e resoluções diferentes. Foram acrescentadas algumas metodologias desde a sua versão anterior, o IPSL-CM4A, sendo estas: a inclusão dos processos necessários para o estudo da química do clima e interações climáticas biogeoquímica, aumentando a resolução vertical da estratosfera, como cita Dufresne (2011).

Por último foi também incorporado ao estudo o *Hadley Centre Global Environmental Model2*, conhecido como HadGEM2. Projetado no intuito de simular e obter o grau de evolução centenária nas escalas do clima, incluindo retorno biogeoquímico, no qual a versão anterior, o HadGEM1 não possuía (Collins *et al.*, 2011).

4.4. MODELO MGB

A parametrização do MGB-INPE combina a formulação probabilística de distribuição de colunas de água nos pontos de grade como no modelo Xinanjiang (ZHAO, 1992; ZHAO; LIU, 1995) com os princípios utilizados no TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979) para simular a resposta hidrológica. A posição do nível freático é calculada no modelo como uma proporção da quantidade d'água em excesso sobre a capacidade de campo em cada reservatório, seguindo a formulação do modelo DHSVM (WIGMOSTA et al, 2002).

A perda d'água por interceptação é simulada no modelo através da metodologia proposta por Gash et al. (1995). A captura d'água da vegetação desde o solo é resolvida considerando o modelo de distribuição de raízes de Jarvis (1989). A bacia é subdividida em células regulares, comunicadas por canais de drenagem representando a rede de drenagem da mesma. Cada célula está dividida em blocos de uso do solo, que resultam da combinação da vegetação, do tipo do solo e do uso da terra.

4.5. MÉTODOS PROBABILÍSTICOS PARA ANÁLISES DE VALORES EXTREMOS

Utilizando as séries temporais de vazão observadas e geradas pelo modelo MGB-INPE, foram aplicados dois métodos probabilísticos para o estudo dos extremos máximos. Utilizamos dois tipos de distribuições modeladas pela EVT (Extreme Value Theory – Teoria de valores extremos), uma delas utilizando os máximos anuais e a outro utilizando os excedentes sobre um limiar.

As séries de descargas simuladas pelo modelo MGB-INPE, alimentado com as projeções dos modelos atmosféricos, foram utilizadas para estas análises, juntamente com os dados de descargas observados na estação fluviométricas de Fazenda Vista Alegre, na foz da bacia. Foram calculadas as descargas extremas para tempos de retorno frequentes como 2, 5 e 10 anos, e os menos frequentes para 50 e 100 anos em ambas as distribuições probabilísticas, para cada um dos períodos considerados.

4.5.1. GEV – Distribuição Generalizada de Valores Extremos

A Distribuição Generalizada de valores Extremos, conhecida pela sigla GEV, é uma distribuição onde são analisados os eventos extremos durante um intervalo de tempo ou em blocos. Neste projeto foram utilizados os máximos anuais de vazão nos períodos de 1970 a 1990, 2011 a 2040, 2041 a 2070, e 2071 a 2100.

O GEV é a junção de três distribuições assintóticas de valores extremos conhecidos como valor extremo do tipo I (VEI), valor extremo do tipo II (VEII) e valor extremo do tipo III (VEIII) (Queiroz, 2006), respectivamente, Distribuição de Gumbel ou Fisher-Tippet, a distribuição de Fréchet e a distribuição Weibull. Proposta por Jenkinson (1955) e também conhecida como distribuição de Von Mises-Jenkinson. A função utiliza 3 parâmetros sendo eles, localização μ , escala σ e a forma ξ , de acordo com a equação 1.

$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{-1}{\xi}} \right\} \quad (1)$$

Onde:

$-\infty < z < \infty, \varepsilon = 0$ – Distribuição de Gumbel

$\varepsilon \leq z < \infty, \varepsilon > 0$ – Distribuição de Fréchet

$-\infty < z \leq \omega, \varepsilon < 0$ – Distribuição de Weibull

Esta distribuição aplica o pressuposto de estacionariedade das séries temporais de vazão, em que as descargas máximas seguem a mesma verossimilhança no decorrer do período, e sua distribuição probabilística é conhecida. Tratando deste pressuposto, o conceito de independência também é aplicado, onde um máximo não tem correlação com o máximo posterior nem com o anterior.

4.5.2. GPD – Distribuição Generalizada de Pareto

Expondo o conceito de excedentes sobre um limiar, utilizamos a Distribuição Generalizada de Pareto (GPD). Essa metodologia consiste num suposto de uma sequencia de medições independentes e identicamente distribuídos, onde os valores máximos são identificados pelos excessos de um limiar determinado e suficientemente grande, utilizando o argumento de Embrechts *et al.* (2004). A função (2) é descrita por 3 parâmetros: localização μ , escala σ e forma ξ .

$$G_{\varepsilon, \sigma}(y) = \begin{cases} 1 - (1 + \frac{\varepsilon}{\sigma}(x - \mu))^{\frac{-1}{\varepsilon}} & \text{for } \varepsilon \neq 0, \\ 1 - e^{\frac{-(x-\mu)}{\sigma}} & \text{for } \varepsilon = 0. \end{cases} \quad (2)$$

A escolha de um limiar u é parte fundamental na implementação desta metodologia, pois um valor muito elevado irá resultar em poucos máximos na série, e um limiar baixo incluirá vazões que podem alterar os resultados finais nos tempos de retorno.

Utilizamos a média residual como método de escolha do limiar, pois ela mostra de acordo com uma série temporal de dados, um gráfico com a média dos valores que excedem o limiar. Coles (2001) conceitua que um limiar apropriado para a distribuição Pareto deve ser escolhido através de uma média residual aproximadamente linear com o limiar (u), considerado assim uma aproximação válida para o excesso da distribuição.

Analisando as médias residuais - *Mean Residual Life* - (exemplo na Figura 3) das séries temporais de vazão, consentiu-se a escolha de apenas um valor de iteração e limiar, que fosse suficiente para que gerasse descargas máximas extremas satisfatórias para todos os modelos e períodos.

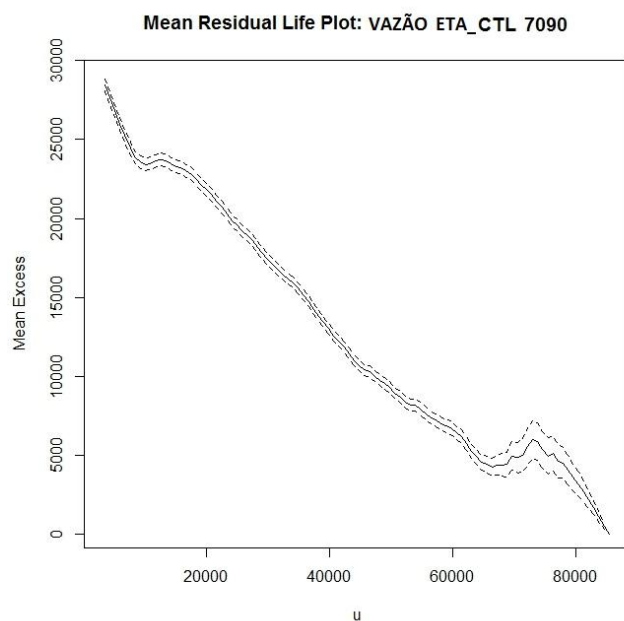


Figura 1 - Média Residual do cenário CTL do modelo global ETA-INPE, sendo u o limiar.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. DESCARGAS MÉDIAS MENSAIS

A comparação dos resultados obtidos com os diferentes conjuntos de dados apresenta uma variabilidade entre modelos das projeções dos impactos das mudanças climáticas na bacia. Estes resultados sugerem, em geral, a diminuição das vazões até o fim do século (Figura 3). Pode-se perceber um maior decremento das descargas médias nos cenários Eta-CPTec (CTL, LOW, MED, HIG), que apresentam também mudanças na sazonalidade, com uma época de estiagem mais extensa a partir de 2041. Os experimentos com CSIRO e MIROC apresentaram mudanças no mês de ocorrência do máximo.

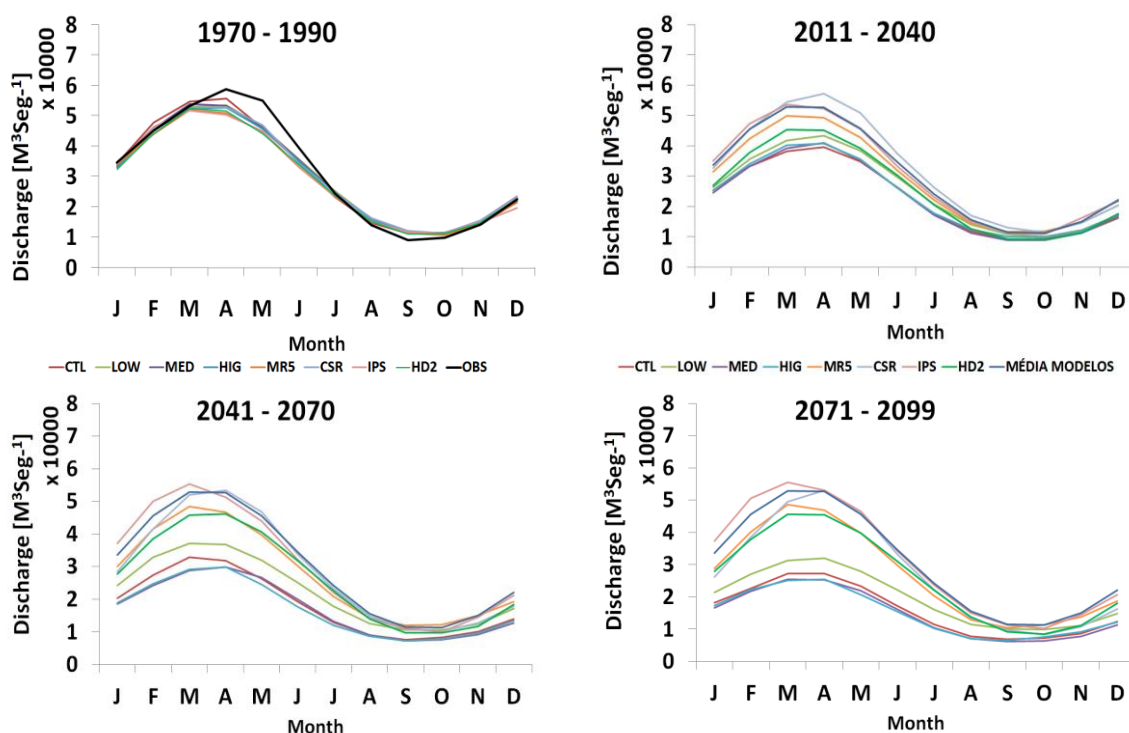


Figura 4 - Descargas médias mensais na estação Fazenda Vista Alegre na bacia do Rio Madeira observadas e simuladas e projetadas com base nas projeções de modelos atmosféricos.

5.2. VAZÕES MÁXIMAS

Nas projeções geradas com a metodologia GEV, os resultados das simulações com base nos resultados dos modelos atmosféricos apresentaram vazões inferiores às

obtidas a partir da série de descargas observadas. Apenas o experimento que utiliza dados do modelo global CSIRO apresenta valores similares com os da linha de base - Vazões observadas (Fig. 5).

Diferente da metodologia anterior, as descargas calculadas com a Distribuição Generalizada de Pareto, doravante GPD, apresentaram, em geral, menor incremento com o período de retorno (Figura 4). A função GPD não obteve um ajuste adequado à série de vazões do modelo IPSL, mostrando uma vazão de aproximadamente 250.000 m^3s^{-1} em 100 anos de tempo de retorno (Tabela 2). A série de dados observados apresentou menor incremento das descargas assim como os demais modelos, apresentando valores análogos ao experimento que utilizou dados do modelo global MIROC5.

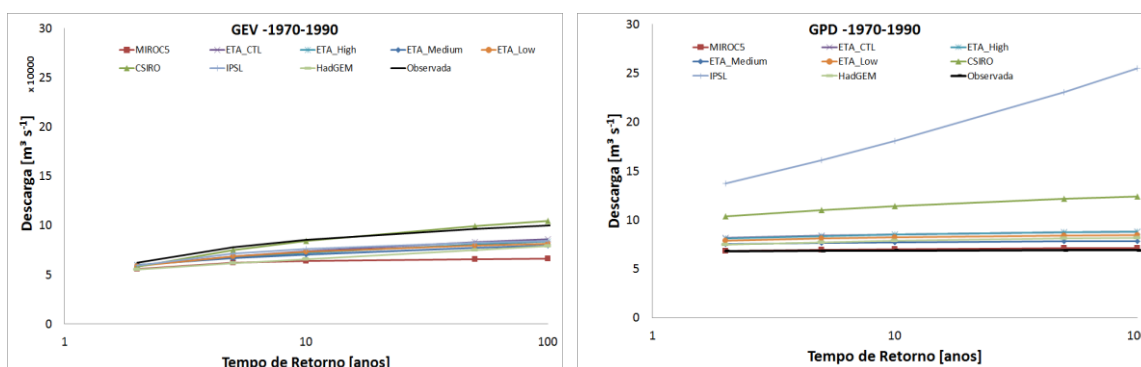


Figura 5 - Vazões máximas, para diferentes tempos de retorno utilizando o método GEV e GPD, projetadas na Bacia do Rio Madeira, estação Fazenda Vista Alegre no período de 1970 a 1990.

As tabelas 1 e 2 a seguir mostram os valores obtidos por tempo de retorno pelas metodologias utilizadas no período de 1970 a 1990.

Tabela 1 - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 1970 a 1990 utilizando a metodologia GEV.

GEV - 1970-1990

Anos	MIROC5	ETA_CTL	ETA_High	ETA_Medium	ETA_Low	CSIRO	IPSL	HadGEM	Observada
2	55675.32	59249.77	60180.81	60056.2	59069.42	58302.86	59604.7	55139.64	62323.49
5	62259.47	68881.53	67768.47	66864.33	68544.61	75048.9	71321.92	61610.04	77886.02
10	64238.98	74147	72210.08	70616.67	73027.59	84105.58	76294.43	65858.51	85384.52
50	65971.45	83272.12	80583.09	77184.66	79558.98	99596.29	82675.51	75110.17	96547.64
100	66235.25	86303.09	83615.93	79388.98	81362.24	104671.7	84206.01	78980.97	99702.82

Tabela 2 - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 1970 a 1990 utilizando a metodologia GPD.

GPD - 1970-1990

Anos	MIROC5	ETA_CTL	ETA_High	ETA_Medium	ETA_Low	CSIRO	IPSL	HadGEM	Observada
2	68338.08	81544.41	80866.76	75329.34	78879.56	103676.6	137210.5	74890.89	68009.94
5	69539.68	83855.97	83353.51	76523.92	80886.38	109844.5	161130.6	77196.86	68460.76
10	70180.25	85184.12	84803.97	77146.14	82018.97	113865.1	180602.6	78546.14	68661.61
50	71100.22	87291.12	87151.93	78012.96	83773.19	121438.6	230863.3	80739.62	68890.53
100	71337.43	87898.7	87844.28	78228.82	84265.74	124068.8	254891	81389.45	68935.5

A Figura 6 apresenta a diferença de vazões por tempo de retorno - Q_{tr} - obtido para cada período no futuro (2011 – 2040, 2041 - 2070, 2071-2100) subtraindo o Q_{tr} do presente (1970 – 1990) para todos os modelos. Nas projeções das descargas futuras, a metodologia GEV apresentou um menor incremento nas descargas nos tempos de retorno até 10 anos e um incremento nas descargas associadas com tempos de retorno maiores (Figura 6 (a), (c), (e) e Tabela 3.a, b e c). Já nos resultados obtidos com a GPD, a maioria dos experimentos apresenta incremento das descargas associados a todos os tempos de retorno até o final do século (Figura 6 (b), (d), (f) e Tabela 4.a, b, c). As projeções que utilizam dados do modelo IPSL mostram uma redução das descargas desde 2011 até o final do século. Nas que utilizam dados do modelo CSIRO a redução acontece a partir de 2041.

Em ambos os resultados os maiores incrementos das descargas aparecem nos experimentos do período 2011-2040 que utilizam os dados do modelo atmosférico Eta-High. Nas análises GEV, as maiores diminuições também aparecem associadas a Eta-High, mas no período final. Por outro lado, a redução das descargas projetadas com dados do modelo IPSL domina em todos os períodos nas análises GPD, mas este resultado está associado com um ajuste não satisfatório da função de Pareto aos dados. O modelo global CSIRO também demonstrou diminuições nas suas vazões, porém com menos intensidade, no começo e no final do século.

Nas análises destes resultados, resulta importante salientar que os mesmas foram realizadas em períodos de 30 anos. Disto se desprende que os valores obtidos para as descargas associadas com tempos de retorno de 50 e 100 anos correspondem a uma extrapolação das distribuições de frequências utilizadas.

Tabela 3.a - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2011 a 2040 utilizando a metodologia GEV.

GEV - 2011-2040

Anos	MIROC5	ETA_CTL	ETA_High	ETA_Medium	ETA_Low	CSIRO	IPSL	HadGEM
2	54329,04	47959,46	51366,87	46813,36	51638,41	61376,31	58763,36	48255,95
5	65248,6	61273,87	72474,24	58890,42	63636,12	73540,21	71873,34	54045,91
10	70683,22	69210,39	89243,18	68352,43	71428,53	80681,4	77742,3	56917,25
50	79091,98	84512,71	136031,4	94269,7	88164,37	94192,2	85755,37	61340,98
100	81569,6	90183,72	160807,9	107762	95071,88	99104,06	87815,25	62638,45

Tabela 3.b - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2041 a 2070 utilizando a metodologia GEV.

GEV - 2041-2070

Anos	MIROC5	ETA_CTL	ETA_High	ETA_Medium	ETA_Low	CSIRO	IPSL	HadGEM
2	53537,52	38494,05	36867,42	36306,23	43104,06	57874,22	59508,77	49892
5	66170,46	52516,13	47571,73	47439,65	56176,35	78130,47	78659,1	57231,49
10	72753,07	61659,72	55281,66	56382,45	66476,02	89645,86	89361,46	60953,79
50	83515,28	81397,18	74193,13	81701,92	94899,35	110582,7	108415,9	66844,59
100	86878,08	89584,25	83069,65	95291,27	109798,8	117890,7	114924,5	68622,7

Tabela 3.c - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2071 a 2100 utilizando a metodologia GEV.

GEV - 2071-2100

Anos	MIROC5	ETA_CTL	ETA_High	ETA_Medium	ETA_Low	CSIRO	IPSL	HadGEM
2	51010,2	34095,34	30090,54	33782,79	39112,65	57249,64	62323,49	47547,54
5	62461,29	46889,72	42899,67	44683,54	51022,86	74052,14	77886,02	56674,45
10	69731,32	55235,92	55406,54	52393,19	60422,39	83276,51	85384,52	62501,7
50	84901,73	73260,81	101598,6	70862,3	86418,34	99345,01	96547,64	74748,42
100	90987,36	80741,05	132995,4	79337,85	100072,9	104711	99702,82	79696,04

Tabela 4.a - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2011 a 2040 utilizando a metodologia GPD.

GPD - 2011-2040

Anos	MIROC5	ETA_CTL	ETA_High	ETA_Medium	ETA_Low	CSIRO	IPSL	HadGEM
2	81728	85175,67	121023,1	93283,5	84153,89	100653,2	90520,75	82963,1
5	85663,52	89119,61	135297,2	100637,6	87385,55	106934	94752,32	91641,45
10	88147,49	91575,87	145917	105714,9	89336,79	111070,5	97396,36	98054,96
50	92623,16	95921,46	169996,3	116073,3	92646,33	118973,6	102095,2	112459,1
100	94105,82	97333,06	180122,4	119984,2	93673,41	121759,9	103628,9	118458,6

Tabela 4.b - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2041 a 2070 utilizando a metodologia GPD.

GPD - 2041-2070

Anos	MIROC5	ETA_CTL	ETA_High	ETA_Medium	ETA_Low	CSIRO	IPSL	HadGEM
2	87188,15	83667,82	81804,42	81978,29	89577,19	104485,3	107286,9	86982,94
5	92710,76	90504,65	89818,09	89782,38	94941,12	111702,4	115378,9	96234,05
10	96371,97	95230,48	95594,41	95383,51	98447,26	116507,1	120878,2	103082,7
50	103431	104888,4	108116,2	107451,9	105076,5	125824,6	131853,4	118502
100	105943,7	108541,3	113147,8	112271,4	107388	129161,3	135903,6	124940,3

Tabela 4.c - Valores de vazões e tempo de retorno para diferentes modelos no período de 2071 a 2100 utilizando a metodologia GPD.

GPD - 2071-2100

Anos	MIROC5	ETA_CTL	ETA_High	ETA_Medium	ETA_Low	CSIRO	IPSL	HadGEM
2	84605,53	86050,74	93244,75	77146,55	84140,13	98667,44	94473,34	95231,14
5	88606,51	98472,57	108570	87627,35	91500,8	103968	98805,86	107405,1
10	91108,01	108198,3	120892,9	95790,8	96713,34	107326,1	101497,3	116752,4
50	95557,23	131924,7	152136,8	115557,6	107734,2	113408,2	106242,3	138924,1
100	97010,78	142657,4	166815,4	124433,3	112051	115434,3	107777,9	148678,3

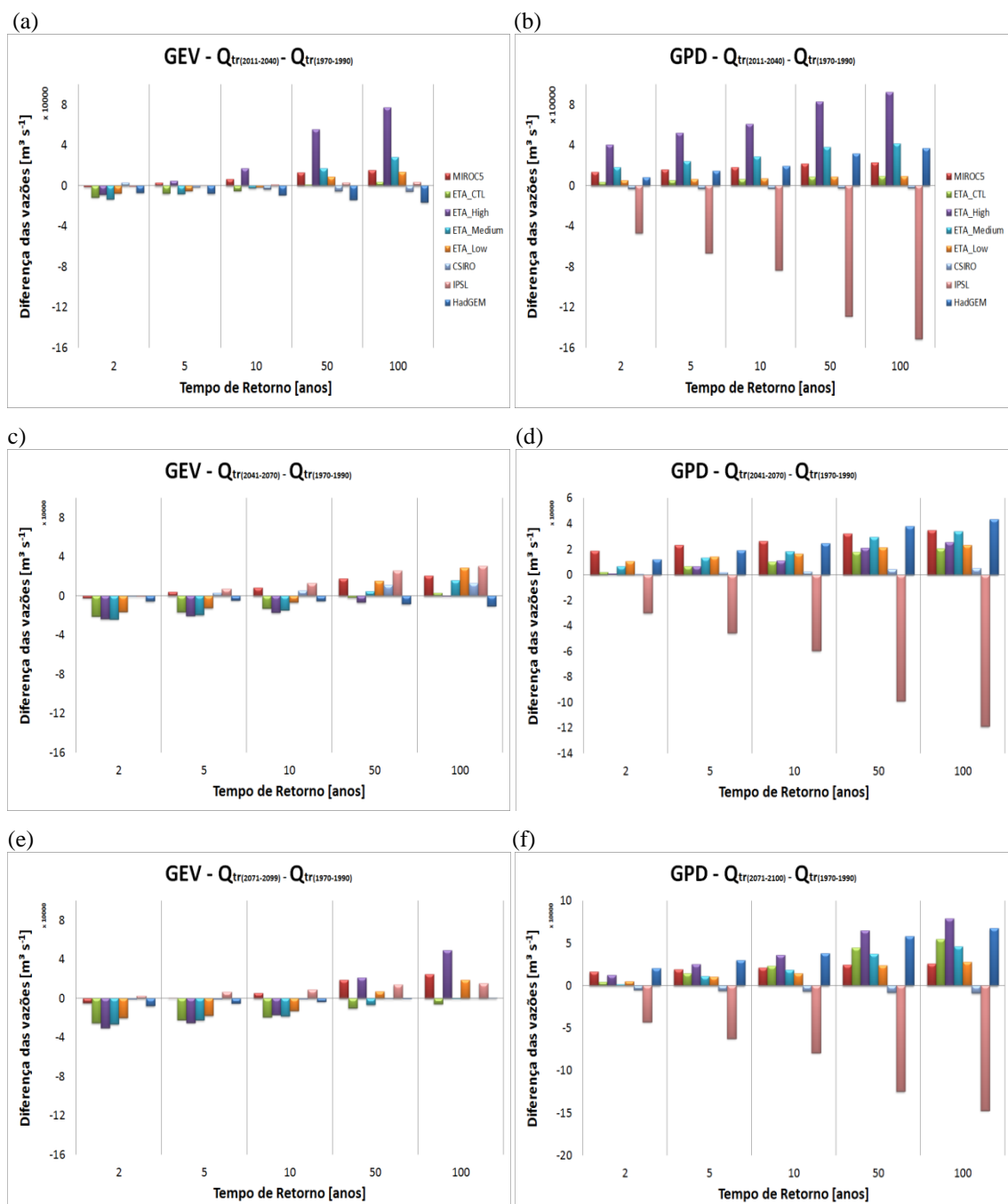


Figura 6 – Diferença de vazões entre os resultados obtidos de 2011 a 2040 e 1970 a 1990 (a) e (b), 2041 a 2070 e 1970 a 1990 (c) e (d) e 2071 a 2100 e 1970 a 1990 (e) e (f) com a metodologia GEV e GPD

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

As análises desenvolvidas mostraram que existe uma importante dispersão entre resultados, não apenas associada com as diferentes projeções atmosféricas, mas principalmente com a metodologia de estudo, principalmente nas descargas máximas menos frequentes. Esta dispersão representa limitações na transferência de informações para tomadores de decisão e precisa ser abordada através de análises de incertezas que permita a seleção de estratégias robustas.

Por outro lado, ambas as metodologias foram aplicadas sob o suposto de estacionariedade, ou seja, considerando que os parâmetros das distribuições permanecem constantes no tempo. A separação da serie temporal em períodos, como no caso deste trabalho, permite o relaxamento desta premissa, considerando apenas a variação das distribuições entre períodos. Não obstante, tendências nos parâmetros ainda podem persistir que precisam ser abordadas através de metodologias que consideram a não-estacionariedade das series.

A continuação deste trabalho implicará na aplicação das mesmas séries de vazão transformando-as de maneira satisfatórias, para o pressuposto da não-estacionariedade, buscando resultados mais concretos em se tratando de mudanças climáticas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bastos PR (2007) Inclusão da perturbação de momentum no esquema de parametrização de cumulus Kain-Fritsch e impactos sobre um caso de chuva convectiva. MSc dissertation. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, SP, Brazil
- Betts AK, Miller MJ (1986) A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX and Arctic air-mass data sets. *Q J R Meteorol Soc* 112:693–709
- CHAMBERS, J.M. *Programming with Data*. New York: Springer-Verlag, 1998.
- Chou SC (1996) Modelo Regional Eta. Climanálise (São José dos Campos), Cachoeira Paulista, SP, v. 1, ED ESPECIAL.
- Chou SC, Bustamante J, Gomes JL (2005) Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 12:537–555.
- Chou SC, Marengo JA, Lyra AA, Sueiro G, Pesquero JF, Alves LM, Kay G, Betts R, Chagas DJ, Gomes JL, Bustamante JF, Tavares P (2011) Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Clim Dyn*. doi:10.1007/s00382-011-1002-8
- Chou SC, Gomes JL, Ristic I, Mesinger F, Sueiro G, Andrade D, Lima PP et al. (2013) Tests of high-resolution simulations over a region of complex terrain in Southeast coast of Brazil. *EGU General Assembly Conference Abstracts* 15, 2659
- Collier et al., 2011: **The CSIRO Mk 3-6-0 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication**, 19th International Congress on Modelling and Simulation, 2011.
- Coles, Stuart. **An introduction to statistical modeling of extreme values**. University of Bristol. p. 79. 2001
- Collins et al., W.j., 2011: **Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2**. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 2011.
- Dufresne, J. L. et al, 2013. **Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5**. Springerlink, p.2125, 2013.
- Ek MB, Mitchell KE, Lin Y, Rogers E, Grunmann P, Koren V, Gayno G, Tarpley JD (2003) Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *J Geophys Res*. 108(D22): 8851–8866. doi:10.1029/2002JD003296
- EMBRECHTS, P.; KLÜPPELBERG, C.; MIKOSCH, T. *Modelling extremal events for insurance and finance*. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- Ferrier BS, Jin Y, Lin Y, Black T, Rogers E, DiMego G (2002) Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta Model. In: 19th conference on weather analysis and forecasting/15th conference on numerical weather prediction, San Antonio. *Am Meteorol Soc*, pp 280–283
- GASH, J.H.C.; Lloyd, C.R.; Lachaud, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, v. 170, p. 79-86, 1995. IPCC, Cambridge Univ. Press. 2007
- Janjic ZI (1979) Forward-backward scheme modified to prevent two grid-interval noise and its application in r coordinate models. *Contrib Atmos Phys* 52:69–84
- Janjic ZI (1984) Nonlinear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids. *Mon Weather Rev* 112(6):1234–1245

Janjic ZI (1994) The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon Weather Rev* 122(5):927–945

Janjic ZI (2002) Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note No. 437, 61 pp

Janjic ZI, Gerrity JP Sr, Nickovic S (2001) An alternative approach to nonhydrostatic modeling. *Mon Weather Rev* 129(5):1164–1178

JARVIS, N.J. A simple empirical model of root water uptake. **Journal of Hydrology**, v. 107, p. 57-72, 1989.

Kain JS (2004) The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *J Appl Meteor* 43:170–181

Lacis AA, Hansen JE (1974) A parameterization of the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J Atmos Sci* 31:118–133

Marengo JA, Chou SC, Kay G, Alves L, Pesquero JF, Soares WR, Santos DC, Lyra AA, Sueiro G, Betts R, Chagas DJ, Gomes JL, Bustamante JF, Tavares P (2012) Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. *Climate Dynamics*. Vol 38, n 9-10, 1829-1848, doi 10.1007/s00382-011-1155-5

Mellor GL, Yamada T (1982) Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev Geophys Space Phys* 20:851–875

Mesinger F (1974) An economical explicit scheme which inherently prevents the false two-grid-interval wave in the forecast fields. In: Proc. Symp. "Difference and Spectral Methods for Atmosphere and Ocean Dynamics Problems", Acad. Sci., Novosibirsk, 17-22 September 1973; Part II, 18-34.

Mesinger F (1977) Forward-backward scheme, and its use in a limited area model. *Contrib Atmos Phys* 50:200–210

Mesinger F (1984) A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Riv Meteorol Aeronautica* 44:195–200

Mesinger F (2010) Several PBL parameterization lessons arrived at running an NWP model. Intern. Conf. on Planetary Boundary Layer and Climate Change, IOP Publishing, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science **13** (2010) 012005 doi: 10.1088/1755-1315/13/1/012005

Mesinger F, Janjic ZI, Nickovic S, Gavrilo D, Deaven DG (1988) The step-mountain coordinate: model description, and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. *Mon Weather Rev* 116(7):1493–1518

Mesinger F, Wobus RL, Baldwin ME (1996) Parameterization of form drag in the Eta Model at the National Centers for Environmental Prediction. In: 11th Conf. Numerical Weather Prediction, Norfolk. Am Meteorol Soc, pp 324–326

Mesinger F, Chou SC, Gomes JL, Jovic D, Bastos P, Bustamante JF, Lazic L, Lyra AA, Morelli S, Ristic I, Veljovic K (2012) An upgraded version of the Eta model. *Meteorology and Atmospheric Physics*. Vol 116 (3), 63-79. doi: 10.1007/s00703-012-0182-z

MESINGER, F., Z. I. JANJIC, S. NICKOVIC, D. GAVRILOV, E D. G. DEAVEN, 1988: **The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment.** *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1493-1518.

NOBRE, C., **Parcerias Estratégicas.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Vol. 1, n.27, p. 24, 2007.

Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima, and A. Sumi, 1997: **Description of CCSR/NIES atmospheric general circulation model.** CGER's Supercomputer Monograph Report, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, 3, 1-48.

Pesquero JF, Chou SC, Nobre CA, Marengo JA (2009) Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. *Theoretical and Applied Climatology*. 99(1-2):75-93. doi: 10.1007/s00704-009-0123-z

Queiroz, Manoel M. F. *et al.* **Análise de eventos hidrológicos extremos, usando-se a distribuição GEV e momentos LH.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol 10 nº2. Campina Grande. Jun/2006.

RIBEIRO NETO, ALFREDO: **Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira [Rio de Janeiro] 2006.** XVII, 178 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2006). Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

Rotstayn, L.D., Collier, M.A., Dix, M.R., Feng, Y., Gordon, H.B., O'Farrell, S.P., Smith, I.N. and J.I. Syktus (2010). **Improved Simulation of Australian Climate and ENSO-related rainfall variability in a global climate model with interactive aerosol treatment.** *Int. J. Climatol.* 30: 1067-1088. doi: 10.1002/joc.1952.

Schwarzkopf MD, Fels SB (1991) The simplified exchange method revisited: an accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes. *J Geophys Res* 96:9075–9096

Venables, W.N.; Smith, D.M.; R Development Core Team ***An Introduction to R - Notes on R: a programming environment for data analysis and graphics.*** Versão 2.5.1 (2007-06-27).

Zilitinkevich SS (1995) Non-local turbulent transport: Pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows. In: Power H, Moussiopoulos N, Brebbia CA (eds) *Air pollution III. Air pollution theory and simulation*, vol I. Computational Mechanics Publications, Southampton, pp 53–60

ZHAO, R.J. and Liu, X.R. The Xinanjiang model. In: Singh, V.P. (Ed.) **Computer Models of Watershed Hydrology.** Highlands Ranch: Water Resources Publication, 1995. p. 215–232.

Watanabe, Masahiro *et al.* **2010: Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity.** *J. Climate*, **23**, 6312–6335

WIGMOSTA, M.S.; Nijssen, B.; Storck, P.; Lettenmaier, D.P. The Distributed Hydrology Soil Vegetation Model, In: Singh, V.P.; Frevert, D.K. (Ed.) **Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications.** Littleton, CO: Water Resource Publications, 2002, p. 7-42.