



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR**  
**CURSO DE OCEANOGRAFIA**

**MARCUS VINICIUS DE ABREU ÁVILA**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA HIDROLOGIA  
EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NA REGIÃO NORDESTE E  
POSSÍVEIS IMPLICAÇÕES PARA ALOCAÇÃO DE ÁGUA**

**FORTALEZA**  
**2013**

MARCUS VINICIUS DE ABREU ÁVILA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA HIDROLOGIA  
EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NA REGIÃO NORDESTE E POSSÍVEIS  
IMPLICAÇÕES PARA ALOCAÇÃO DE ÁGUA

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins

FORTALEZA

2013

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal do Ceará

Biblioteca Rui Simões de Menezes

---

A972a      Ávila, Marcus Vinicius de Abreu.

Avaliação do impacto de mudanças climáticas na hidrologia em duas bacias hidrográficas na Região Nordeste e possíveis implicações para alocação de água / Marcus Vinicius de Abreu Ávila. – 2013.

24 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2013.

Orientação: Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins.

Co-Orientação: Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira

1. Clima - estudo. 2. Mudanças climáticas 3. Hidrologia. I. Título.

---

CDD 581.52

MARCUS VINICIUS DE ABREU ÁVILA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA HIDROLOGIA  
EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NA REGIÃO NORDESTE E POSSÍVEIS  
IMPLICAÇÕES PARA ALOCAÇÃO DE ÁGUA

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins.

Aprovada em \_18/\_02/\_2013\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Ávila e Marta.

À minha querida avó Julia.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por todas as bênçãos e livramentos concedidos a minha família, sobretudo, por ser prioridade na minha vida e por estar sempre a frente em todas as decisões tomadas por mim.

Ao Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira por todos os conselhos, palavras de incentivo e lições de vida, especialmente, nos momentos de descontração, no qual dei muitas risadas e tirei grandes lições.

Ao Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins pelas oportunidades que me ofertou durante a graduação, por toda sua sabedoria e ensinamentos passados, por acreditar no meu potencial e, sobretudo, pela amizade e respeito.

Aos professores do curso de Oceanografia pela dedicação e ensinamentos prestados.

Aos amigos da FUNCEME Diógenes Fontinele, Bruno Catunda, Marcelo Rodrigues, Arthur Costa, Robson Franklin e Paulo Santiago pela convivência, amizade, e descontração nas horas vagas.

Aos membros da banca examinadora pelas contribuições.

Aos colegas do curso de Oceanografia da UFC por todos os momentos felizes juntos, que certamente ficarão guardados na minha memória, em especial, aos meus queridos amigos Thiago Valério, Carlos Alberto e Ana Luzia Lacerda pela amizade sincera do início ao final do curso, e certamente, por toda a vida.

“Preparem no deserto o caminho do Senhor; O Senhor Deus vem aí, cheio de força e pronto para reinar.”

(Isaías 40, 3.10)

## RESUMO

O Nordeste do Brasil é a região mais vulnerável do país à variabilidade de clima e, possivelmente, para a mudança climática também. Registros históricos revelam um grande número de eventos de seca com impactos consideráveis para a sua população, apesar da vulnerabilidade ter sido reduzida por meio de investimentos em infra-estrutura e gestão da água. Um aumento na temperatura na região, como indicado por modelos globais do clima, associado a alterações na distribuição temporal e espacial da precipitação, podem representar um impacto significativo sobre a disponibilidade e a necessidade de água na região. Este estudo empregou regressão estatística para *downscaling*, precipitação e temperatura de três modelos climáticos globais (GCM), que fazem parte do modelo acoplado comparação Inter-Fase do Projeto 3 (CMIP3). Usando dados de precipitação e *downscaling*, e variáveis de temperatura, um modelo calibrado de aglomerados hidrológico foi usado para avaliar as mudanças nos padrões de geração de escoamento nas sub-bacias das duas principais bacias hidrográficas do Ceará e Rio Grande do Norte: Banabuiú, Castanhão e Orós para a Bacia do Rio Jaguaribe; Coremas-Mãe D'água e Armando Ribeiro Gonçalves para a bacia do Piranhas-Açu. Para o presente, utilizou-se o período de 1971-2000, o qual foi usado como comparação das alterações futuras na precipitação, temperatura, evapotranspiração potencial e do escoamento. Os cenários futuros foram a SRES A2 e B1, para o período 2041-2070. Em termos de precipitação média anual, em geral, para os dois cenários futuros, a regionalização desta variável dos GCMs adotadas para todas as sub-bacias não representam mudanças significativas. Em relação a evapotranspiração média anual, para ambos os cenários futuros, todas as sub-bacias apresentaram aumentos, o que combinado com o aumento da variabilidade inter-anual da precipitação geralmente resultaram em mudanças significativas no regime de escoamento da sub-bacias estudadas.

**Palavras-chave:** Modelos climáticos globais, mudanças climáticas, hidrologia.

## ABSTRACT

The Northeast of Brazil is the country's most vulnerable region to climatic variability and possibly to climate change as well. Historical records reveal a large number of droughts events with considerable impacts to its population, although vulnerability has been reduced through investments in water infrastructure and management. An increase in temperature in the region, as indicated by global climate models, associated with changes in the temporal and spatial distribution of precipitation, can represent a significant impact on both the availability of water and the water demand in the region.

This study employed statistical regression in order to downscale precipitation and temperature from three global climate models (GCM), which are part of the Coupled Model Inter-comparison Project Phase 3 (CMIP3). Using the downscaled precipitation and temperature variables, a calibrated lumped hydrological model was used to evaluate changes in the patterns of runoff generation in the sub-basins of the two main river basins of Ceará and rio Grande do Norte: Banabuiú, Castanhão and Orós for the Jaguaribe River Basin; Coremas-Mãe D'água and Armando Ribeiro Gonçalves for the Piranhas-Açu River Basin. For the present, it was used the period 1971-2000, which was used as comparison of the future changes in precipitation, temperature, potential evapotranspiration and runoff. The future scenarios were the SRES A2 and B1 for the period 2041-2070. In terms of average annual rainfall, in general, for both future scenarios, the regionalization of this variable from the adopted GCMs for all sub-basins did not represent significant changes. Regarding the mean annual evapotranspiration, for both future scenarios, all sub-basins showed increases, which combined with the increase in the inter-annual variability of rainfall generally resulted in significant changes in the runoff regime of the studied sub-basins.

**Keywords: Global Climate Models, climate change, hydrology.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Precipitação Média Anual (P), Evapotranspiração Potencial Média Anual (ETP) e Índice de Aridez (P/ETP) para os dados CRU (período: 1971-2000) e modelos climáticos globais BCM2, INCM3 e MIMR (Cenário A2, período: 2041-2070).....	17
Figura 2 - Precipitação Média Anual (P), Evapotranspiração Potencial Média Anual (ETP) e Índice de Aridez (P/ETP) para os dados CRU (período: 1971-2000) e modelos climáticos globais BCM2, INCM3 e MIMR (Cenário B1, período: 2041-2070).....	18
Figura 3 - Cenários SRES e diferentes representações de modelos de desenvolvimento.....	20
Figura 4 - Localização da área de estudo.....	22
Figura 5 - Pontos de grade da base de dados CRU TS 2.1 que englobam as Bacias do Rio Jaguaribe e Piranhas-Açu.....	26
Figura 6 - Estações fluviométricas das Bacias do Rio Jaguaribe e do Rio Piranhas-Açu utilizadas neste estudo.....	27
Figura 7 - Localização dos espelhos d'água, bacias elementares e as bacias dos hidrossistemas das Bacias do Rio Jaguaribe e do Rio Piranhas-Açu. Reservatórios principais dos hidrossistemas modelados indicados com losângulo vermelho.....	28
Figura 8 - Rede de drenagem das Bacias do Rio Jaguaribe (a esquerda) e Piranhas-Açu (a direita).....	29
Figura 9 - Componente Clima e Hidrologia.....	30
Figura 10 - Representação esquemática do modelo SMAP.....	34
Figura 11 - Razão entre a vazão com 90% de garantia dos cenários (a) B1 ( $Q_{90-B1}$ ) e (b) A2 ( $Q_{90-A2}$ ) e a vazão com 90% de garantia dos período de referência de cada modelo ( $Q_{90-20C3M}$ ).....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos Climáticos Globais do AR4 e número de rodadas disponíveis para cada modelo no período presente (20CM3) e futuro (A2, A1B, B1).....	15
Tabela 2 - Número de pluviômetros e pontos da base CRU disponíveis para cada sub-bacia das Bacias dos Rios Jaguaribe e Piranhas-Açu.....	25
Tabela 3 – Comparação entre <i>downscaling</i> estatístico e dinâmico.....	31
Tabela 4 - Calibração dos parâmetros identificados do modelo SMAP para cada hidrossistema.....	36
Tabela 5 - Aumentos e reduções em precipitação, evapotranspiração potencial e deflúvio superficial médio anual para os reservatórios das Bacias do Rio Jaguaribe e Piranhas-Açu no cenário B1 e modelos BCM2, INCM3 e MIMR.....	37
Tabela 6 - Aumentos e reduções em precipitação, evapotranspiração potencial e deflúvio superficial médio anual para os reservatórios das Bacias do Rio Jaguaribe e Piranhas-Açu no cenário A2 e modelos BCM2, INCM3 e MIMR.....	38
Tabela 7 - Variações no $Q_{90}$ do futuro com relação ao presente para os Sistemas Piranhas-Açu e Jaguaribe.....	41

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1. 2 REVISAO BIBLIOGRÁFICA.....	14
1.2.1 O relatório AR4 do IPCC.....	14
1.2.2 O presente e os cenários futuros utilizados.....	19
2. OBJETIVOS.....	21
2.1 Gerais.....	21
2.2 Específicos.....	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1 Área de estudo.....	22
3.2 A escolha dos modelos climáticos globais a serem utilizados.....	22
3.3 Os dados observados disponíveis.....	23
3.4 A componente clima e hidrologia do estudo.....	29
3.5 Hidrologia.....	32
4. RESULTADOS.....	37
5. CONCLUSÕES.....	44
6. REFERÊNCIAS.....	46

## 1 INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil é a região mais vulnerável do país à variabilidade de clima e possivelmente à mudança climática. Registros históricos revelam um grande número de eventos de seca com impactos consideráveis a sua população, embora a vulnerabilidade tenha sido reduzida através de investimentos em infraestrutura hídrica e em gerenciamento. Um aumento em temperatura na região, conforme indicado por modelos climáticos globais, aliado a mudanças em totais e na distribuição temporal e espacial da precipitação, pode representar impactos significativos tanto sobre a disponibilidade de água quanto sobre a demanda hídrica na região. Estas mudanças podem representar impactos significativos sobre o processo de alocação de água, sendo o objetivo deste trabalho fornecer as informações necessárias para esta avaliação.

Com esta motivação, o presente estudo fez uso de modelos de regressão para regionalizar as variáveis Precipitação e Temperatura obtidas a partir de três modelos climáticos globais (MCGs) utilizados pelo Relatório de Avaliação No. 4 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). A partir de informação mais detalhada das variáveis precipitação e temperatura, foi calculada a evapotranspiração pelo método de Hargreaves e utilizados modelos hidrológicos concentrados, previamente calibrados com dados do presente, para avaliação das mudanças nos padrões de geração de escoamento nas sub-bacias dos principais reservatórios das duas bacias hidrográficas do Nordeste do Brasil. Esses reservatórios são o Banabuiú, Castanhão e Orós da Bacia do Rio Jaguaribe; Coremas-Mãe-D'água e Armando Ribeiro Gonçalves da Bacia do Piranhas-Açu. As sub-bacias destes cinco reservatórios serão, a partir de agora, denominadas como hidrossistemas, uma vez que são os principais reservatórios destas bacias para o suprimento hídricos dos vários usos nas mesmas. Foram utilizados como cenário presente o período de 1971-2000, e para o futuro os cenários de emissão A2 e B1 durante o período de 2041-2070.

## 1.2 Revisão bibliográfica

### 1.2.1 O relatório AR4 do IPCC

A variabilidade climática presente da Região Nordeste (NE) do Brasil já impõe grandes desafios ao gerenciamento dos recursos hídricos, podendo este quadro ainda ser agravado diante as mudanças do clima. Assim, é de interesse identificar o que os MCGs do Relatório de Avaliação No. 4 (AR4) do IPCC (IPCC, 2007) estão apontando para a região NE em termos de mudanças climáticas para o período 2041-2070 incluindo cenários de emissões disponíveis.

Esse estudo partiu de uma análise dos modelos climáticos globais (MCGs) usados para o AR4, com os quais foram executadas simulações com o objetivo de identificar os modelos que melhor representassem o clima da região de estudo. A Tabela 1 mostra a lista de modelos e as simulações com cenário de emissões disponíveis para cada um deles. As simulações aqui listadas incluem o presente (20C3M) e futuro forçados por dois cenários de emissões, a saber, A2 e B1, nos quais serão explicados na seção seguinte deste trabalho.

Tabela 1. Modelos Climáticos Globais do AR4 e número de rodadas disponíveis para cada modelo no período presente (20CM3) e futuro (A2, A1B, B1).

Centro	Modelo	20CM3	A2	A1B	B1
Beijing Climate Center-China	CM1	2	1		1
Bjerknes Centre for Climate Research-Norway	BCM2.0	1	1	1	1
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis-Canada	CGCM3	2	2	2	2
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis-Canada	CGCM3*	1		1	1
Centre National de Recherches Met.-France	CM3	1	1	1	1
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation-Australia	Mk3.0	2	1	1	1
Max-Planck- Institut for Meteorology-Germany	ECHAM5-OM	2	2	2	2
Meteorological Institute, University of Bonn-Germany					
Meteorological Research Institute of KMA-Korea	ECHO-G	2	2	2	2
Model and Data Groupe at MPI-M-Germany					
Institute of Atmospheric Physics-China	FGOALS-g1.0	2		2	2
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-USA	CM2.0	2	1	1	1
	CM2.1	2	1	1	1
Goddard Institute for Space Studies-USA	AOM	2		2	2
	E-H	2		2	
	E-R	2	1	2	1
Institute for Numerical Mathematics-Russia	INCM3	1	1	1	1
Institut Pierre Simon Laplace-France	CM4	2	1	1	1
National Institute for Environmental Studies-Japan (MIMR)	MIMR - IROC3.2	1		1	1
	MIMR- IROC3.2*	2	2	2	2
Meteorological Research Institute-Japan	CGCM2.3.2	2	2	2	2
National Centre for Atmospheric Research-USA	PCM	2	2	2	2
	CCSM3	2	2	2	2
	HadCM3	2	1	1	1
UK Met. Office-UK					
	HadGEM1	2	1	1	
National Institute of Geophysics and Volcanology-Italy	SXG 2005	1	1	1	1

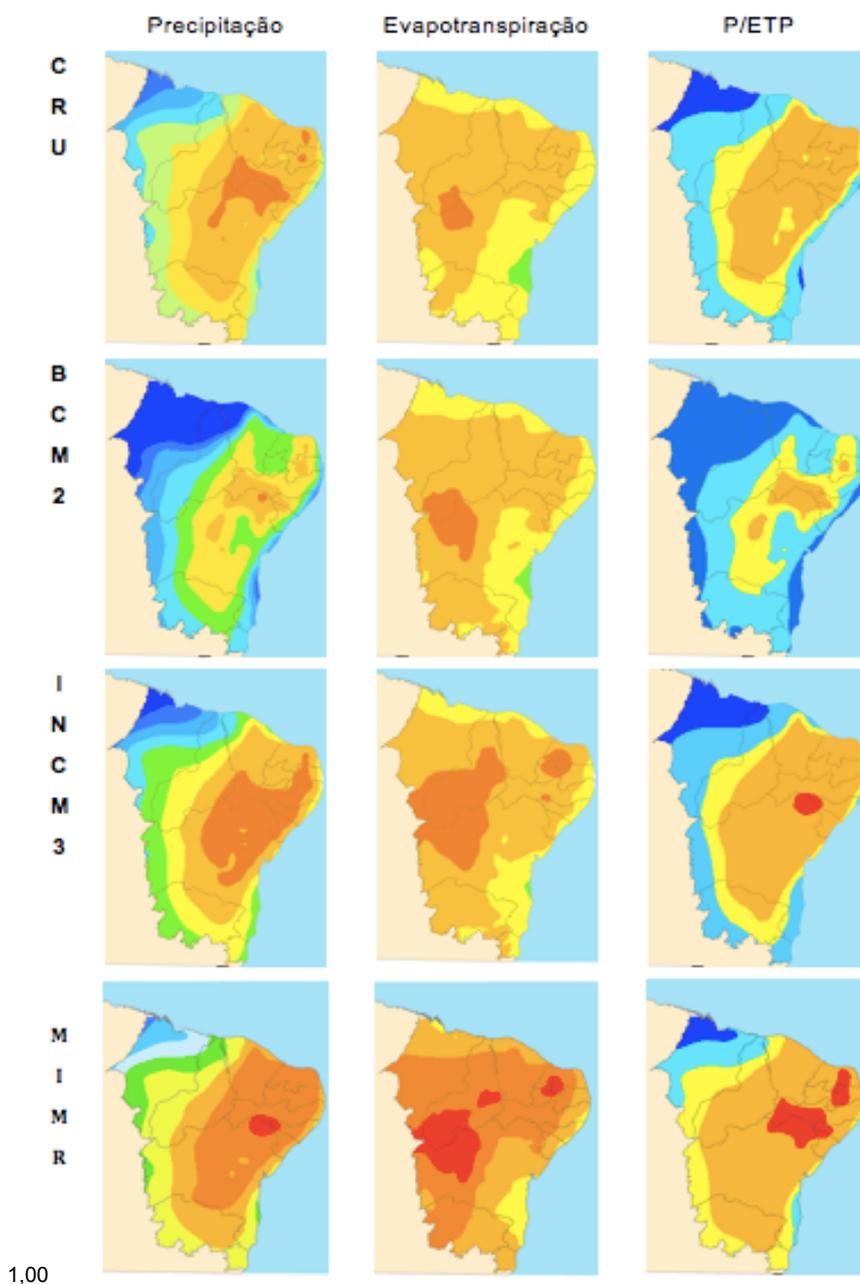
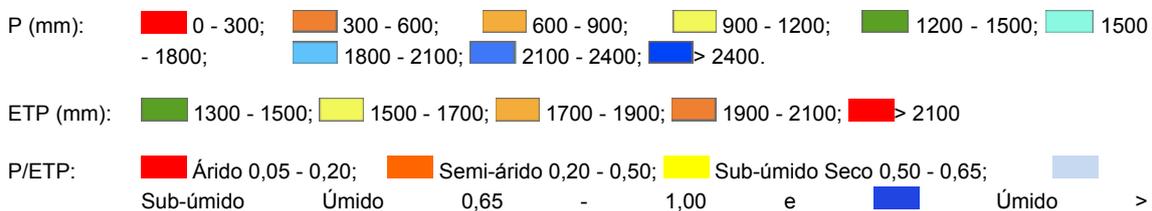
Fonte: FUNCEME 2013.

Três modelos foram selecionados dentre os analisados (BCM2, o MIMR e o INCM3), conforme método detalhado nas seções seguintes desse trabalho. A Figura 1 apresenta a precipitação média anual, evapotranspiração potencial média anual e a relação P/ETP (razão entre a precipitação mensal média e a evapotranspiração potencial mensal em mm, aqui calculada por Hargreaves, 1974) calculados para o passado mais recente (1971-2000) com base nos dados CRU TS2.1 (Mitchell, 2004) e para o futuro (2041-2070) sob o cenário A2 com base nos modelos BCM2, INCM3 e MIMR. Os resultados dos modelos foram corrigidos com base em seu desempenho em descrever o período histórico (1971-2000).

A análise da Figura 1 revela para o modelo INCM3 uma intensificação das condições de aridez para o centro-leste da região, ao mesmo tempo em

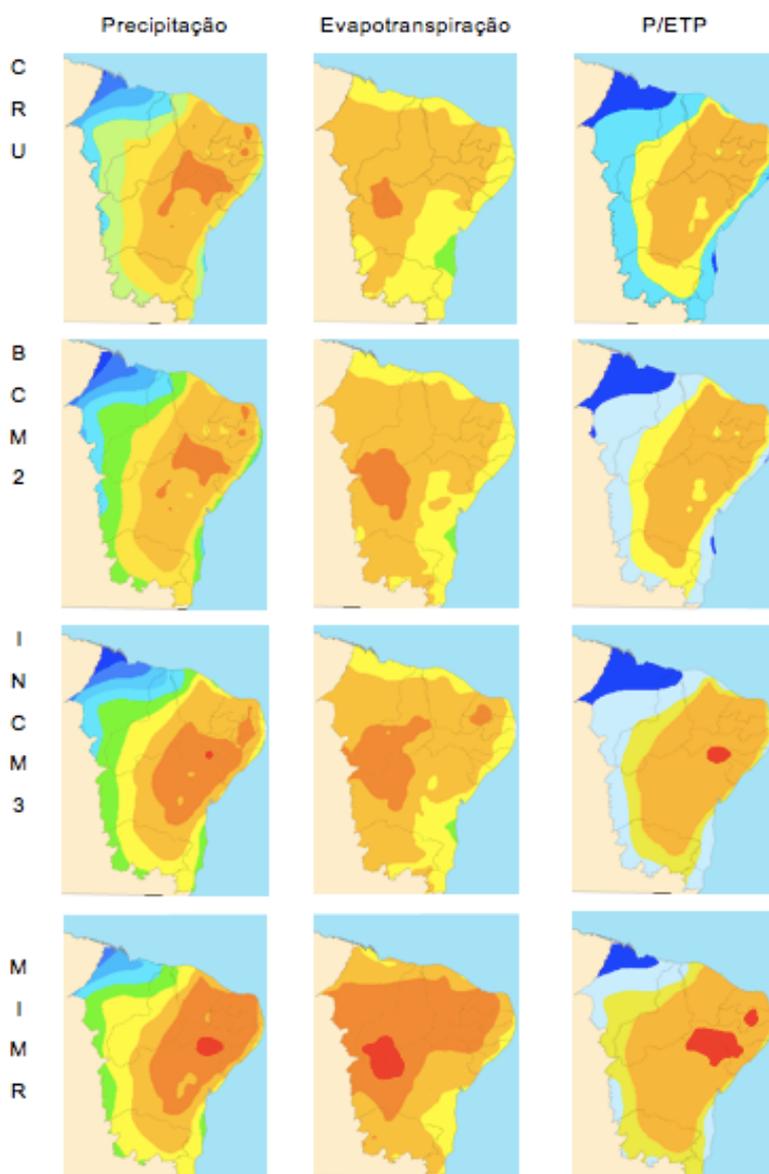
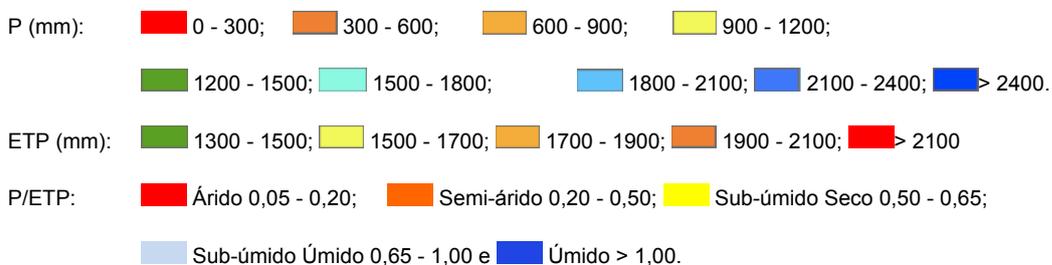
que revela uma leve a moderada tendência para atenuação destas condições para o noroeste da Região Nordeste do Brasil. Este quadro é ainda mais expressivo para os resultados do modelo MIMR. De outro lado, a análise dos resultados para o modelo BCM2 revela uma atenuação das condições de aridez para toda a região, isto devido à tendência do modelo em aumentar, de maneira geral, as precipitações na região. A Figura 2 apresenta os resultados correspondentes ao cenário B1. A análise das Figuras 1 e 2 revelam uma discordância maior entre os modelos apenas para o noroeste da Região Nordeste. Outro fator a considerar é que estes são valores médios anuais e não refletem os efeitos de uma possível mudança no regime intra-anual de precipitações, como por exemplo, o aumento no período seco.

Figura 1. Precipitação Média Anual (P), Evapotranspiração Potencial Média Anual (ETP) e Índice de Aridez (P/ETP- razão entre a precipitação mensal média e a evapotranspiração potencial mensal em mm, aqui calculada por Hargreaves, 1974) para os dados CRU (período: 1971-2000) e modelos climáticos globais BCM2, INCM3 e MIMR (Cenário A2, período: 2041-2070). Legenda:



Fonte: FUNCEME 2013

Figura 2. Precipitação Média Anual (P), Evapotranspiração Potencial Média Anual (ETP) e Índice de Aridez (P/ETP - P/ETP- razão entre a precipitação mensal média e a evapotranspiração potencial mensal em mm, aqui calculada por Hargreaves, 1974) para os dados CRU (período: 1971-2000) e modelos climáticos globais BCM2, INCM3 e MIMR (Cenário B1, período: 2041-2070). Legenda:



Fonte: FUNCEME 2013

### 1.2.2 O presente e os cenários futuros utilizados

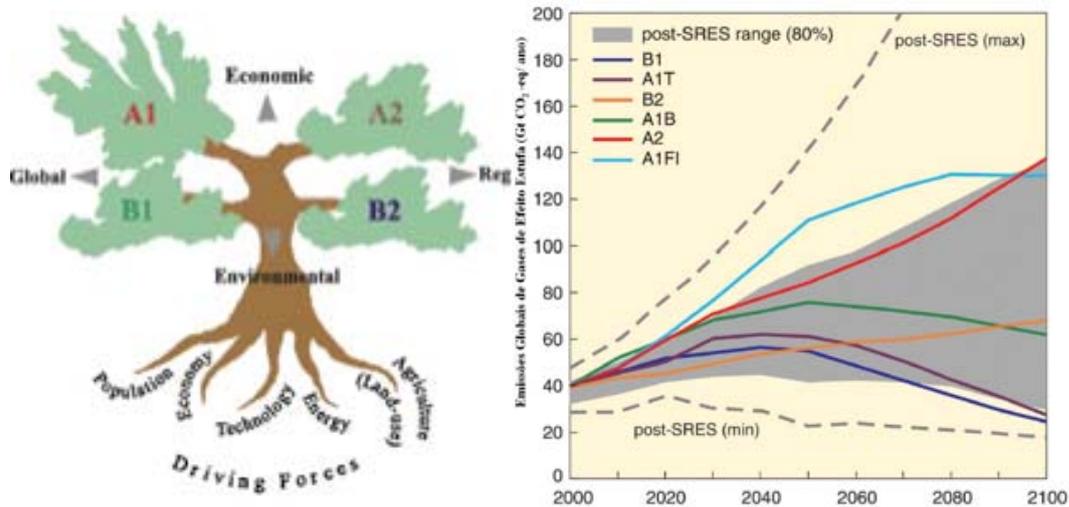
Como cenário presente foi utilizado o período de 1971-2000, para o qual rodadas dos MCGs estavam disponíveis. Estas rodadas no período histórico foram nomeadas no AR4/IPCC como período 20C3M. No que se refere ao futuro utilizou-se um Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (SRES), lançado em 2000 com base tanto em emissões idealizadas como também em hipóteses concentração de CO<sub>2</sub>, e utilizado no AR4 do IPCC. Estes cenários caracterizam a forçante relacionada a gases estufa das emissões e da sensibilidade, capacidade adaptativa e vulnerabilidade dos sistemas sociais e econômicos. Neste estudo foram utilizados os cenários A2 e B1, os quais representam:

A2 - A família de cenários A2 são coerentes com um mundo mais dividido economicamente, com economias não auto-suficientes, populações crescentes continuamente e mais orientadas para o desenvolvimento econômico regional.

B1 - A família de cenários B1 são coerentes com um mundo convergente e mais atento às questões ambientais. Esta família é caracterizada por um rápido crescimento econômico como na família A1, mas com mudanças rápidas no sentido de um serviço e economia da informação; um aumento da população de 9 bilhões em 2050 e depois declinando; reduções da intensidade material e a introdução de tecnologias limpas e de recursos de tecnologias eficientes; e ênfase em soluções globais para a estabilidade econômica, social e ambiental.

Os cenários SRES foram empregados pelos Modelos Climáticos Globais Acoplados Oceano-Atmosfera (MCGAOAs) utilizados no Relatório de Avaliação 4 (IPCC, 2007). A Figura 3 apresenta os cenários SRES e representações diferentes de modelos de desenvolvimento.

Figura 3. Cenários SRES e diferentes representações de modelos de desenvolvimento.



Fonte: IPCC, 2007.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

- Regionalizar para as regiões de estudo as variáveis Precipitação e Temperatura obtidas a partir de três modelos climáticos globais (MCGs) utilizando-se modelos de regressão linear.

### **2.2 Específicos**

- Avaliar as mudanças em precipitação, temperatura e evapotranspiração potencial para o período 2041-2070 relativo ao período presente 1971-2000;
  
- Avaliar os impactos das mudanças em precipitação, temperatura e evapotranspiração sobre os deflúvios superficiais;
  
- Avaliar os possíveis impactos no processo de alocação de água.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo compreende as Bacias do Rio Jaguaribe e Piranhas-Açu no estado do Ceará e Rio Grande do Norte, localizadas na Região Nordeste do Brasil, onde havia uma melhor distribuição espacial dos pluviômetros e estações meteorológicas disponíveis (Figura 4).

Figura 4 – Localização da área de estudo.



Fonte: FUNCEME 2013.

#### 3.2 A escolha dos modelos climáticos globais a serem utilizados

Foram avaliados um total de 18 modelos de circulação global (MCGs) do AR4 do IPCC/2007, sendo adotados para este estudo os modelos BCM2, INCM3 e MIMR, uma vez que estes três modelos eram os únicos que forneciam resultados de simulação, tanto para o presente como para os cenários futuros A2 e B1, de temperatura mínima, média e máxima, as quais eram necessárias para o cálculo da evapotranspiração.

Dentre os 18 modelos avaliados, o INCM3 apresentou o melhor desempenho na representação da variabilidade intra-anual de precipitação das regiões estudadas. O BCM2 apresentou performance ruim e o MIMR uma performance similar a do INCM3 para as sub-bacias do Rio Jaguaribe e inferior a do INCM3 para as sub-bacias do Piranhas-Açu. Apesar de apresentar a pior performance em termos de representar o regime de precipitação do clima do presente, os resultados do modelo BCM2 foram mantidos, pois isto não necessariamente significa que este modelo não consegue capturar as mudanças desta variável. Aliado a isto, incluir o modelo BCM2 permite-nos representar situações não representadas pelos outros dois modelos. Como o objetivo é avaliar os impactos das mudanças de clima no processo de alocação, a inclusão do BCM2 permitiu avaliar estes impactos em um cenário futuro (B1 e A2) com ligeira alteração de precipitação, mas com aumento de temperatura e evapotranspiração potencial.

### 3.3 Os dados observados disponíveis

Dados hidrometeorológicos - As informações correspondentes à localização das estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas foram geradas a partir do cadastro das mesmas obtido junto aos estados, Agência Nacional de Águas (ANA) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Meteorologia - Os dados climáticos utilizados neste estudo para avaliação da performance dos modelos climáticos e hidrológicos foram obtidos em centros estaduais e nacionais. Ao nível nacional, a SUDENE possui uma rede de 2110 pluviômetros no Nordeste com registros históricos no período de 01/10/1910 a 06/05/1988 (CE: 390 postos; PB: 105 postos; RN: 123 postos). Também a este nível, dados de estações meteorológicas completas do INMET foram disponibilizadas para o estudo das duas bacias, sendo 7 estações localizadas na Bacia do Rio Jaguaribe e 5 na Bacia do Piranhas-Açu.

Ao nível estadual, centros meteorológicos estaduais disponibilizaram dados de pluviômetros para os Estados do Ceará (FUNCEME: 681 postos), da Paraíba (AESAs: 286 postos) e do Rio Grande do Norte (EMPARN: 253 postos). Um detalhamento do número de pluviômetros disponíveis para cada bacia está

relacionado na Tabela 2. As estações meteorológicas disponíveis nas bacias apresentam poucas falhas no período de 1961 a 1990, mas existem poucas estações nas bacias estudadas. A análise de disponibilidade dos dados pluviométricos para a Bacia do Rio Piranhas-Açu revelou a presença de longos períodos com falhas no período de referência (1971-2000). Por isso mesmo, para esta bacia a alternativa foi utilizar os dados CRU (TS 2.1), o qual é composto por 1224 pontos de grade mensais do clima observado (precipitação e temperatura) para o período de 1901-2002. Estes dados estão disponíveis em [http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU\\_TS\\_2\\_1.html](http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU_TS_2_1.html).

Os dados CRU TS 2.1 cobrem a superfície terrestre global a uma resolução de 0,5 graus. Nove variáveis climáticas estão disponíveis: temperaturas média, mínima e máxima diária, amplitude diária de temperatura, precipitação, frequência de dias úmidos, frequência de dias frios, pressão de vapor e cobertura de nuvens. New *et al.* (2000) foi responsável pela base de dados original de grades de clima de alta resolução (0,5 graus; CRU TS 1,0; New *et al.*, 2000) e uma atualização para o ano de 1998 (CRU TS 1.1), que foram posteriormente revistos e atualizados até 2002 por Mitchell (2004), o CRU TS 2.1. A Figura 5 apresenta os pontos de grade do CRU TS 2.1 que englobam as duas bacias. Na mesma figura são apresentados os hidrossistemas estudados, Banabuiú, Castanhão e Orós para a Bacia do Rio Jaguaribe, e Armando Ribeiro Gonçalves e Coremas-Mãe-D'água.

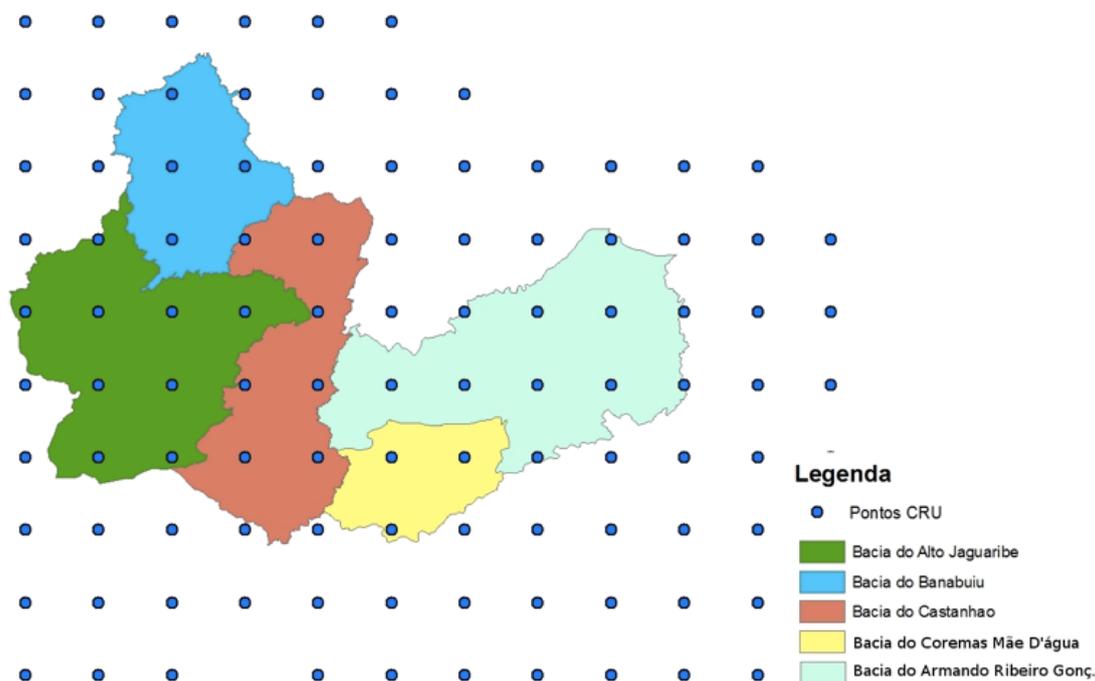
Comparação entre as séries de precipitação média calculadas por THIESSEN a partir da rede de pluviômetros e as séries de precipitação média calculada com a base CRU TS 2.1 revelou uma grande dispersão para a Bacia do Alto Jaguaribe. Assim, diante da boa disponibilidade de dados para a Bacia do Rio Jaguaribe, foram utilizadas as séries dos postos pluviométricos da SUDENE e FUNCEME para esta bacia. No entanto, devido à carência de dados pluviométricos para a Bacia do Rio Piranhas-Açu, foi utilizado o CRU TS 2.1.

Tabela 2. Número de pluviômetros e pontos da base CRU disponíveis para cada sub-bacia das Bacias dos Rios Jaguaribe e Piranhas-Açu.

Bacias	Sub-Bacia	Nro Pontos do CRU	Número de Pluviômetros	
<b>Jaguaribe</b>	Baixo – Jaguaribe	3	SUDENE :	15
			FUNCEME :	33
			TOTAL :	48
	Médio – Jaguaribe	4	SUDENE :	23
			FUNCEME :	43
			TOTAL :	66
	Alto – Jaguaribe	9	SUDENE :	55
			FUNCEME :	90
			TOTAL :	145
	Banabuiu	5	SUDENE :	61
FUNCEME :			68	
TOTAL :			129	
Salgado	4	SUDENE :	45	
		FUNCEME :	72	
		TOTAL :	117	
<b>Piranhas-Açu</b>	Baixo	1	SUDENE :	5
			+EMPARN :	5
			EMPARN :	6
			TOTAL :	16
	Médio	9	SUDENE :	29
			+AESAs/EMPARN :	13
			EMPARN :	25
			AESA :	68
			TOTAL :	122
			TOTAL :	122
Alto	2	SUDENE :	18	
		AESA :	24	
		TOTAL :	42	

Fonte: FUNCEME 2013.

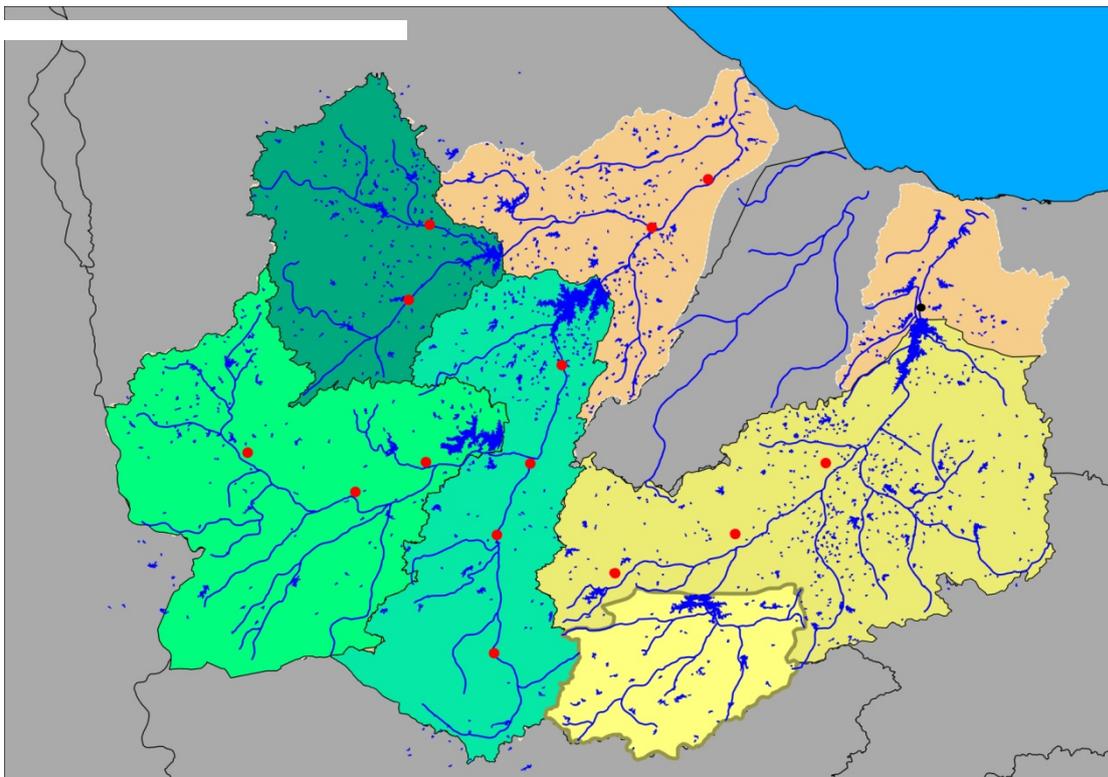
Figura 5. Pontos de grade da base de dados CRU TS 2.1 que englobam as Bacias do Rio Jaguaribe e Piranhas-Açu.



Fonte: FUNCEME 2013.

Hidrologia - Séries fluviométricas diárias dos rios em 7 estações na Bacia do Rio Jaguaribe e 5 na Bacia do Rio Piranhas-Açu foram obtidas no sítio da ANA (<http://www.ana.gov.br>). O modelo hidrológico utilizado no estudo foi o Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) mensal, (no qual será detalhado na próxima seção deste trabalho) sendo esta escala temporal utilizada devido o foco do estudo ser a alocação de água. Para a calibração deste modelo hidrológico (na qual será detalhada na próxima seção deste trabalho) foram utilizadas 3 estações fluviométricas para a Bacia do Rio Jaguaribe e 2 para a Bacia do Rio Piranhas-Açu. A Figura 6 mostra a localização das estações fluviométricas utilizadas neste estudo.

Figura 6. Estações fluviométricas das Bacias do Rio Jaguaribe e do Rio Piranhas-Açu utilizadas neste estudo.



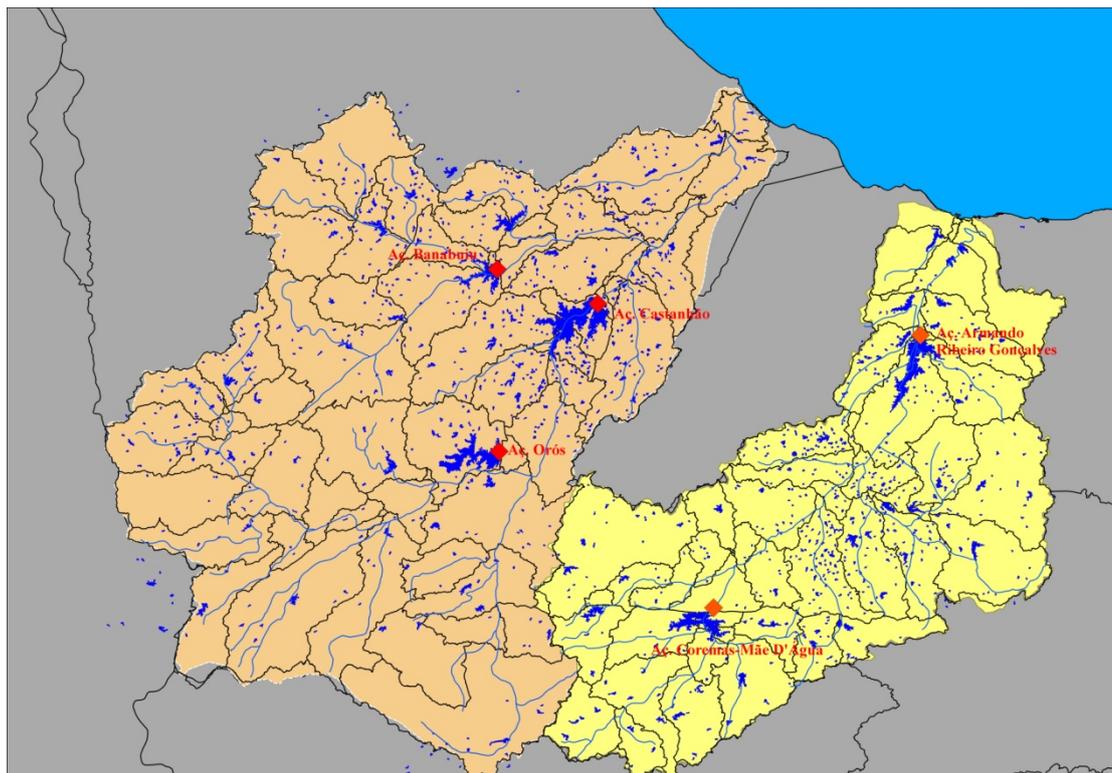
Fonte: FUNCEME 2013.

Reservatórios, bacias dos hidrossistemas e elementares e rede de drenagem - Mapa com a localização dos espelhos d'água para as duas bacias foram gerados pela FUNCEME a partir da interpretação de imagens satelitais do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS) oriundos de um estudo realizado para o Ministério da Integração Nacional em 2006. Este estudo visava o levantamento dos espelhos d'água acima de 20 ha para todo o território nacional e acima de 5 ha para o Nordeste brasileiro. O mapa para as duas bacias está disponível no sítio [http://www.funceme.br/NLTA\\_](http://www.funceme.br/NLTA_)

Os dados de Cota-Área-Volume, características do vertedouro e da tomada d'água dos cinco reservatórios principais foram obtidos juntos aos órgãos de recursos hídricos dos respectivos estados. A Figura 7 mostra a localização dos espelhos d'água acima de 5 ha, as bacias elementares e as bacias dos 5 hidrossistemas modelados das Bacias dos Rios Jaguaribe e

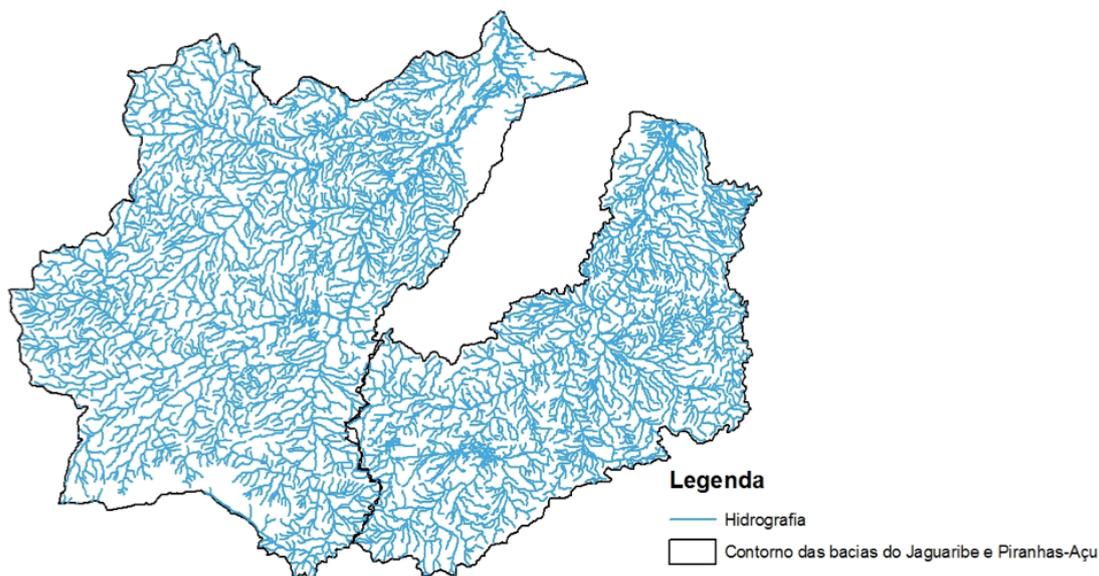
Piranhas-Açu. A Rede de drenagem das Bacias do Rio Jaguaribe e Piranhas-Açu podem ser encontradas na Figura 8.

Figura 7 - Localização dos espelhos d'água, bacias elementares e as bacias dos hidrossistemas das Bacias do Rio Jaguaribe e do Rio Piranhas-Açu. Reservatórios principais dos hidrossistemas modelados indicados com losângulo vermelho.



Fonte: FUNCEME 2013.

Figura 8. Rede de drenagem das Bacias do Rio Jaguaribe (a esquerda) e Piranhas-Açu (a direita).



Fonte: FUNCEME 2013.

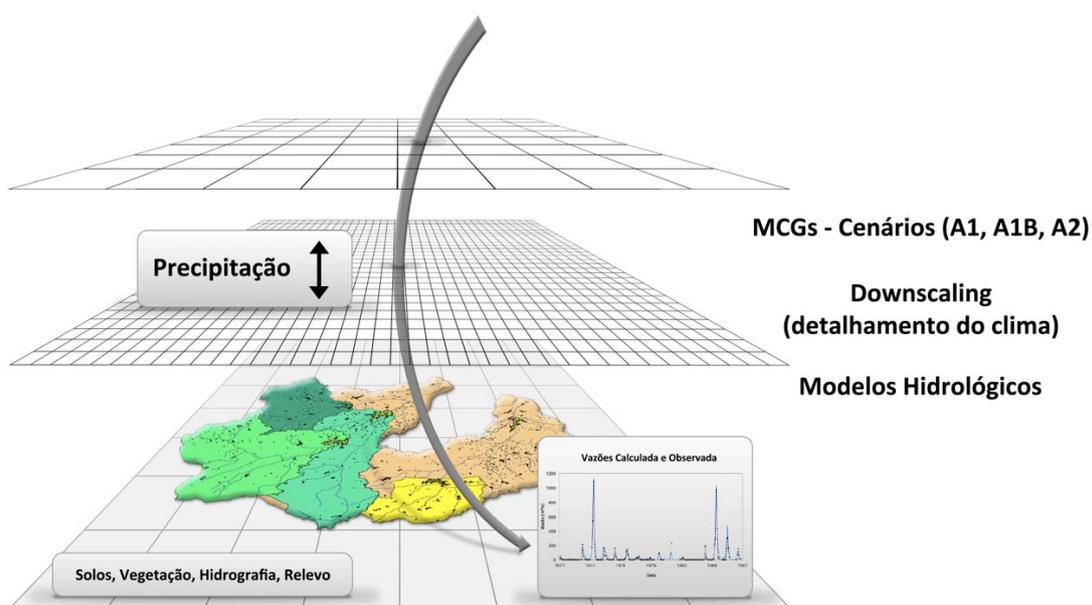
### 3.4 A componente clima e hidrologia do estudo

Estudos de avaliação de impactos das mudanças de clima em geral, e em particular na hidrologia e recursos hídricos, requerem uma escala espacial muito mais fina que aquelas fornecidas por modelos climáticos globais (MCGs), ou até mesmo, modelos climáticos regionais (MCRs). Neste contexto, o presente estudo faz uso de modelos de regressão para detalhar as projeções climáticas dos MCGs ao nível das bacias dos hidrossistemas estudados. Este processo de detalhamento das projeções de MCGs baseado em métodos estatísticos é referido na literatura como *downscaling* estatístico, ou em português, regionalização estatística dos cenários de clima. Os hidrossistemas aqui estudados foram o Banabuiú, Castanhão e Orós para a Bacia do Rio Jaguaribe, e Armando Ribeiro Gonçalves e Sistema Coremas-Mãe D'água para a Bacia do Rio Piranhas-Açu.

A partir dos resultados do *downscaling* estatístico, cenários climáticos (P, T e ETP) foram obtidos e posteriormente utilizados por um modelo hidrológico concentrado (SMAP), previamente calibrado para as bacias de

interesse, visando à geração de séries de vazões afluentes aos hidrossistemas anteriormente mencionados. O processo encontra-se ilustrado na Figura 9. A análise das mudanças nestas variáveis detectadas nos cenários futuros (A2 e B1) com relação ao período histórico (20C3M) permitirá avaliar os impactos das mudanças de clima na hidrologia das bacias estudadas.

Figura 9. Componente Clima e Hidrologia.



Fonte: FUNCEME 2013.

Existem alternativas para transformar projeções menos detalhadas obtidas a partir de MCGs em cenários de resolução mais fina, como: técnicas de *downscaling* dinâmico e estatístico.

*Downscaling* Estatístico vs Dinâmico - Comparação das vantagens relativas de ambas as técnicas de *downscaling*, estatística e dinâmica, foi resumida por Wilby & Wigley (1997) e, posteriormente, reorganizada por Fowler *et al.* (2007), como pode-se observar na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3. Comparação entre o *downscaling* Estatístico e o Dinâmico.

<b><i>Downscaling</i></b>	<b>Estatístico</b>	<b>Dinâmico</b>
<b>Vantagens</b>	Barato e eficiente computacionalmente	Respostas baseadas em processos consistentes fisicamente
	Respostas em resolução mais fina que os MCGs	
	Pode derivar variáveis climáticas não disponíveis em MCRs	
	Facilmente transferíveis a outras regiões	
	Baseados em procedimentos estatísticos padrões e amplamente aceitos	
	Incorpora observação no método	
<b>Desvantagens</b>	Requer séries de dados históricas longas e confiáveis para calibração	Intensivo computacionalmente
	Dependente da escolha dos preditores	Número limitado de conjunto de cenários disponíveis
	Dependente das forçantes de contorno dos MCGs e afetados por viés no MCG utilizado	Dependência forte das forçantes de contorno dos MCGs
	Não estacionariedade na relação preditor-preditando	
	Retroalimentação do sistema climático não incluído	
	Tamanho do domínio, região climática e estação afetam a performance do <i>downscaling</i>	

Fonte: Adaptado de Fowler *et al.* (2007).

*Downscaling* Estatístico - O uso do *downscaling* estatístico assume que o clima regional está condicionado pelo estado do clima de grande escala e

características fisiográficas regionais/locais (von Storch, 1999; Wilby *et al.*, 2004). Neste contexto, um modelo estatístico, relacionando as variáveis de grande escala (preditores) à variáveis regionais ou locais (preeditandos), é empregado para determinar o clima regional. O *downscaling* estatístico assume que:

1. As variáveis preditoras são reproduzidas bem pelos MCGs em uma amplitude de escalas temporais;
2. A relação preditores-preeditando é assumida ser estacionária, ou seja, válidas tanto para o presente como para os cenários futuros. Hewitson & Crane (2006) encontrou que o grau de não estacionariedade em mudanças climáticas projetadas é relativamente pequeno.

Os resultados do *downscaling* são também dependentes do domínio do preditor, assim como no número de pontos de grade utilizados. Existem basicamente três técnicas de *downscaling* utilizadas: modelos de regressão, esquemas de tipificação de tempo e geradores de tempo. Cada grupo destes cobre uma grande variedade de métodos, mas a hipótese do *downscaling* estatístico é a mesma, a saber: o clima regional é uma função do clima de grande escala. Assim, variáveis atmosféricas de grande escala são utilizadas como preditores e variáveis climáticas regionais são utilizadas como preeditandos. O método aqui utilizado foi o de modelos de regressão.

### 3.5 Hidrologia

Modelos hidrológicos concentrados têm sido utilizados frequentemente pelo setor de recursos hídricos no Nordeste do Brasil, muito em função da pobre disponibilidade de dados espaciais de qualidade necessários para os modelos hidrológicos distribuídos. A calibração destes modelos concentrados tem sido abordada utilizando técnicas uni e multiobjetivo destes (Barros *et al.*, 2009ab, 2007, 2008; Nascimento *et al.*, 2006, 2007ab, 2009; Barros, 2007). Para locais com poucos dados, a regionalização dos parâmetros destes modelos em função das características hidrográficas das bacias pode ser uma alternativa, mas tem sido pouco explorada na Região Nordeste do Brasil

(Alexandre *et al.*, 2005; Alexandre, 2005). Nesse trabalho utilizou-se o modelo concentrado *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) na escala mensal, esta escala temporal sendo escolhida uma vez que o foco do estudo é a alocação de água.

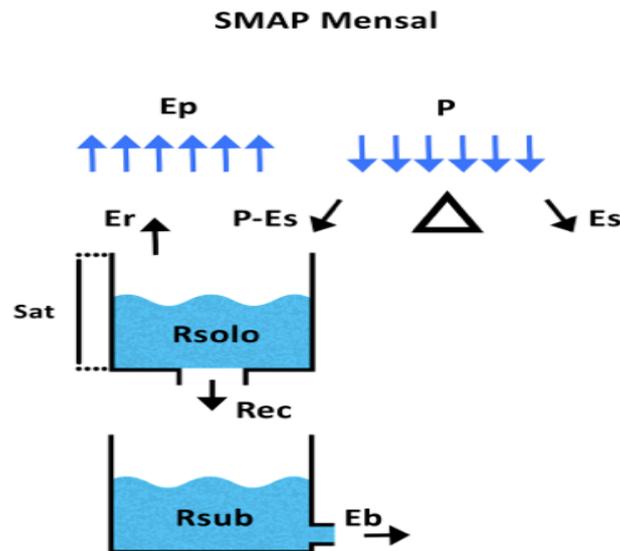
Modelo Hidrológico SMAP - O modelo hidrológico concentrado utilizado foi o SMAP mensal, proposto por Lopes *et al.* (1981), um modelo hidrológico conceitual baseado em um procedimento de cálculo da umidade do solo (Dawdy & O'Donnell, 1965). O armazenamento da água e fluxos na bacia é representado através de dois reservatórios lineares fictícios (camadas superiores e aquíferos), cujos parâmetros podem ser relacionados com características físicas da bacia (Figura 10). Neste modelo, o número de parâmetros que dependem de calibração é reduzido ao máximo, o que permite a determinação dos valores ótimos globais com maior facilidade. O SMAP utiliza como dados de entrada a precipitação mensal (P) em mm; a evapotranspiração potencial (ETP) mensal em mm (aqui calculada por Hargreaves, 1974); a área da bacia hidrográfica em km<sup>2</sup> e a taxa inicial de umidade do solo (TU<sub>in</sub>).

Já os parâmetros do modelo a serem calibrados são: K<sub>es</sub> – coeficiente ligado à geração de escoamento superficial, variando entre 0,1 e 10; SAT – capacidade de saturação do solo, variando entre 400 e 5000;

CREC – coeficiente de recarga, parâmetro relacionado à permeabilidade na zona não saturada do solo, variando de 0 a 70; e um coeficiente (K) relacionado com a taxa de deplecionamento do reservatório subterrâneo, responsável pelo escoamento de base. Os parâmetros CREC e K foram apenas identificados por calibração na Bacia Incremental do Armando Ribeiro Gonçalves, uma vez que para as outras bacias o modelo era insensível às mudanças destes parâmetros. As séries de evapotranspiração potencial foram calculadas pelo método de Hargreaves a partir das séries de temperatura mínima, média e máxima das estações do INMET com dados no período de registros históricos entre 1961-1990. Estas séries foram utilizadas para corrigir o viés dos MCGs em representar esta variável ao longo do mesmo período,

1961-1990. Posteriormente, foram geradas séries de evapotranspiração para o período histórico de referência, 1971-2000.

Figura 10 – Representação esquemática do modelo SMAP.



Fonte: Lopes et al. (1981).

Para cada registro de precipitação ( $P$ ), um balanço de massa é realizado na bacia. Uma parcela de  $P$  contribui para o armazenamento superficial ( $Q_s$ ) como uma função exponencial de  $P$  e da umidade do solo, sendo esta última avaliada como uma razão entre o armazenamento na camada superior do solo ( $Sol$ ) e a capacidade de armazenamento do solo ( $SAT$ ).

A quantidade remanescente de água ( $P - Q_s$ ) é então sujeita à evaporação (ETP: evapotranspiração potencial). O montante resultante, ( $P - Q_s - ETP$ ) ou 0 se  $(P - Q_s) < ETP$ , contribui para a camada superior do solo representada por um reservatório linear ( $Sol$ ). A umidade do solo é atualizada ao longo do tempo neste reservatório de acordo com a evaporação real, que depende tanto do nível de armazenamento do reservatório, como da capacidade de armazenamento superior do solo. Este reservatório ( $Sol$ ) tem outra saída correspondente à recarga ( $R$ ) do reservatório de águas subterrâneas ( $Sub$ ), a qual é estimada usando o conceito de capacidade de

campo. O seu nível de reservatório (Sub) é diminuído a uma taxa que depende da taxa de deplecionamento K e do próprio nível do reservatório (Sub), resultando no escoamento de base (Qb). A vazão total na saída da bacia é calculada como a soma dos escoamentos superficial e de base.

Calibração dos Parâmetros do SMAP - A calibração dos parâmetros do modelo SMAP foi realizada a partir do uso de séries de precipitação e evapotranspiração potencial médias para as bacias de contribuição dos postos fluviométricos de referência a cada hidrossistema assim como séries de vazões das mesmas estações. Uma vez identificados os parâmetros do modelo SMAP para cada hidrossistema, estes foram utilizados para a geração de séries de vazões afluentes aos hidrossistemas para o período de referência do presente estudo (1971-2000), assim como para os cenários futuros (A2/B1 - 2041-2070). Como função objetivo na calibração dos parâmetros do SMAP foi utilizado o coeficiente Nash-Sutcliffe de eficiência do modelo. Este coeficiente é definido como:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_t^e - Q_m^e)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_t^e - \bar{Q}_o)^2}$$

Em que  $Q_t^e$  e  $Q_m^e$  são, respectivamente, as vazões observadas e modeladas no tempo t, e  $\bar{Q}_o$  a vazão média observada durante o período T. As eficiências Nash-Sutcliffe podem variar de  $-\infty$  a 1. Uma eficiência 1 (NS=1) corresponde a um ajuste perfeito do modelo aos dados, enquanto que uma eficiência 0 (NS=0) indica que as previsões do modelo são tão precisas quanto à média dos dados observados. Uma eficiência menor do que zero (NS < 0) ocorre quando a média observada é um melhor preditor do que o modelo.

A Tabela 4 abaixo apresenta um sumário da calibração do modelo SMAP mensal para as estações utilizadas como referência de cada hidrossistema, assim como os parâmetros identificados e o coeficiente Nash-Sutcliffe de eficiência do modelo identificado durante a calibração. A calibração do modelo para os cinco hidrossistemas foi excelente face aos dados disponíveis, principalmente para a Bacia do Rio Piranhas-Açu, obtendo-se os

seguintes índice de performance de ajuste (Nash-Sutcliffe) para séries mensais de precipitação e vazão: Armando Ribeiro Gonçalves = 82%, Coremas-Mãe D'Água = 74%, Banabuiú = 84%, Castanhão = 89% e Orós = 80%.

Tabela 4. Calibração dos parâmetros identificados do modelo SMAP para cada hidrossistema.

Hidrossistema	SAT	Kes	Crec	K	NS (%)
Banabuiú	715,2	3,00	---	---	84
Castanhão	1605	4,12	---	---	89
Orós	1098	3,38	---	---	80
Coremas-Mãe D'água	1138	4,10	---	---	74
Armando Ribeiro Gonçalves	1192	3,62	0,8	20	82

Fonte: FUNCEME 2013.

Evapotranspiração Potencial - Foi utilizado o método de Hargreaves para cálculo da evapotranspiração potencial (Hargreaves, 1974), uma vez que dados de temperatura média, mínima e máxima estavam disponíveis para os modelos BCM2, INCM3 e MIMR. A evapotranspiração potencial pelo método de Hargreaves é expressa como:

$$ETP = 0,0023.S_0.DT.(T + 17,8) \text{ mm/dia.}$$

Em que  $S_0$  é a radiação extraterrestre incidente para o local de interesse; DT é a média mensal da diferença entre as temperaturas máxima e mínima diárias; e T é a temperatura média diária. Para detalhes de como calcular  $S_0$  consultar Shuttleworth(1992).

#### 4 Resultados e discussão

Em termos de precipitação média anual, de modo geral, para ambos os cenários futuros, a regionalização desta variável a partir dos três MCGs adotados (BCM2, INCM3 e MIMR) para todas as sub-bacias não representou mudanças significativas. Na grande maioria dos casos, com relação ao presente, foram identificadas reduções menores que 10% e os aumentos inferiores a 5%. Contudo, as mudanças identificadas na variabilidade interanual da precipitação foram significativas para todos os MCGs utilizados, mas de forma diferenciada dependendo do modelo utilizado e bacia analisada. Estas variações interanuais podem apresentar fortes implicações sobre o processo de alocação de água, resultando, por exemplo, em redução na vazão de referência utilizada na alocação de água:  $Q_{90}$  (vazão que, em média, 90% do tempo um dado sistema pode fornecer aos múltiplos usos). As Tabelas 3 e 4 apresentam em detalhes os aumentos e reduções percentuais em precipitação, evapotranspiração potencial e deflúvio superficial médios anuais para as duas bacias estudadas e cenários B1 e A2.

Tabela 5. Aumentos e reduções em precipitação, evapotranspiração potencial e deflúvio superficial médio anual para os reservatórios das Bacias do Rio Jaguaribe e Piranhas-Açu no cenário B1 e modelos BCM2, INCM3 e MIMR.

Reservatório	P (mm)				ETP (mm)				Q (mm)			
	BCM2	P <sub>méd.</sub>	INCM3	MIMR	BCM2	ETP <sub>méd.</sub>	INCM3	MIMR	BCM2	Q <sub>méd.</sub>	INCM3	MIMR
<b>Banabuiú</b>	0,01	806	-0,04	-0,24	0,02	1702	0,02	0,12	-0,05	30	-0,20	-0,73
<b>Castanhão</b>	0,01	904	0,01	0,00	0,02	1791	0,03	0,13	0,01	49	-0,07	-0,26
<b>Orós</b>	0,02	788	0,01	0,00	0,02	1761	0,03	0,13	0,00	41	-0,05	-0,21
<b>A.R.G.</b>	0,00	878	-0,05	-0,06	0,03	1872	0,04	0,11	-0,15	38	0,06	-0,13
<b>C.-M.</b>	0,00	788	-0,13	-0,07	0,03	1638	0,04	0,12	-0,14	19	-0,44	-0,47

Fonte: FUNCEME 2013.

Tabela 6. Aumentos e reduções em precipitação, evapotranspiração potencial e deflúvio superficial médio anual para os reservatórios das Bacias do Rio Jaguaribe e Piranhas-Açu no cenário A2 e modelos BCM2, INCM3 e MIMR.

Reservatório	P (mm)				ETP (mm)				Q (mm)			
	BCM2	P <sub>méd.</sub>	INCM3	MIMR	BCM2	ETP <sub>méd.</sub>	INCM3	MIMR	BCM2	Q <sub>méd.</sub>	INCM3	MIMR
<b>Banabuiú</b>	0,06	806	0,02	-0,05	0,02	1702	0,03	0,14	0,04	30	0,02	0,00
<b>Castanhão</b>	0,00	904	0,01	-0,02	0,02	1791	0,05	0,15	0,02	49	-0,01	0,02
<b>Orós</b>	0,01	788	0,05	-0,02	0,02	1761	0,05	0,15	0,03	41	0,06	-0,09
<b>A.R.G.</b>	0,03	878	-0,03	-0,05	0,03	1872	0,06	0,13	0,06	38	-0,01	-0,04
<b>C.-M.</b>	-0,01	788	0,00	-0,11	0,03	1638	0,05	0,14	0,00	19	-0,02	-0,08

Fonte: FUNCEME 2013.

No que concerne à evapotranspiração potencial média anual, para ambos os cenários futuros, todas as sub-bacias apresentaram aumentos entre 2% e 15%, ficando os aumentos projetados pelos modelos BCM2, INCM3 e MIMR na ordem de 2%, 5% e 15%, respectivamente. O aumento na evapotranspiração, aliado a uma maior variabilidade interanual da precipitação, resultou em mudanças significativas no regime de escoamento superficial das sub-bacias dos hidrossistemas, implicando, em geral, em redução do deflúvio médio anual.

As reduções em escoamento superficial foram maiores para o modelo MIMR, quando comparadas com aquelas projetadas pelos modelos BCM2 e INCM3, sendo as diferenças maiores para o cenário B1 do que para o cenário A2. De qualquer forma, para ambos os cenários futuros de clima A2 e B1 e modelos INCM3 e MIMR, durante o período de 2041-2070, fica evidenciada uma redução no escoamento médio anual. Isto pode implicar em mudanças relevantes nas vazões garantidas por cada hidrossistema, com importantes reflexos para a disponibilidade hídrica e mecanismos de alocação da água.

Em termos de mudanças em escoamento superficial, para ambos cenários futuros B1 e A2, os modelos BCM2, INCM3 e MIMR indicam, em geral, uma redução no fluxo, sendo as reduções mais fortes no cenário B1. Isto é principalmente devido ao aumento na evapotranspiração potencial, na qual se refere à quantidade de água que será utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, com altura entre 8 cm 15 cm em crescimento ativo, sem restrição hídrica e cobrindo totalmente o solo, e a evapotranspiração real, que é a quantidade de água transferida para a atmosfera nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do sol, durante a estação chuvosa. Além disto, os resultados evidenciaram que o aumento na evapotranspiração real pode exceder pequenos aumentos na precipitação acarretando reduções no escoamento superficial.

Deve-se ressaltar que a alta sensibilidade do escoamento à chuva faz tal número altamente incerto. Contudo, de maneira geral, para o cenário B1 e A2 as mudanças em precipitação não foram significativas, exceto para: 1. modelo MIMR e reservatórios Banabuiú e Coremas-Mãe D'água nos cenários B1 e A2, respectivamente; 2. modelo INCM3 e reservatório Coremas-Mãe D'água nos cenários B1. Estas reduções significativas em precipitação podem ser acompanhadas por aumentos na evapotranspiração potencial (ETP), o que pode reforçar ainda mais os efeitos da redução de precipitação sobre o escoamento superficial levando a reduções muito altas para alguns reservatórios no cenário B1 (73% para MIMR/Banabuiú e 47% para MIMR/Coremas-Mãe D'água). Embora não frequentes, os aumentos em escoamento superficial projetados ficaram abaixo de 6% para os dois cenários.

Visando identificar o impacto possível sobre o processo de alocação, determinou-se a vazão com garantia de 90% ( $Q_{90}$ ) para o reservatório correspondente a cada hidrossistema, assim como o  $Q_{90}$  para os Sistemas Jaguaribe e Piranhas-Açu como um todo, nos cenários presente (20C3M) e futuros (B1 e A2). Os resultados estão apresentados na Tabela 5, na qual aparecem as variações para o sistema como um todo, assim como os menores e maiores valores identificados para os reservatórios que compõem o respectivo sistema.

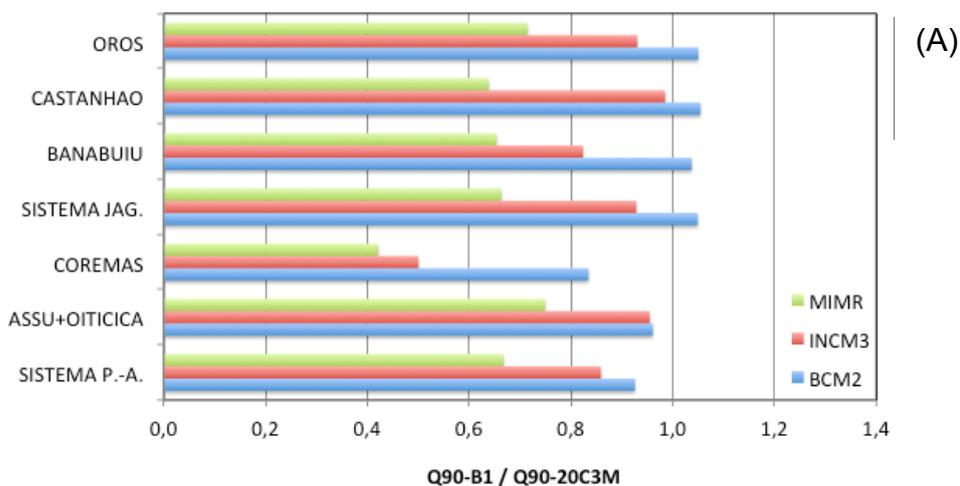
A Figura 9 apresenta a razão entre a vazão com 90% de garantia correspondente ao cenário futuro B1 e a correspondente ao cenário de referência ( $Q_{90-B1}/Q_{90-20C3M}$ ), assim como a razão entre a vazão com 90% de garantia correspondente ao cenário futuro A2 e a correspondente ao cenário de referência ( $Q_{90-A2}/Q_{90-20C3M}$ ). Verificou-se que para o Sistema Piranhas-Açu e cenário futuro B1, os modelos BCM2, INCM3 e MIMR projetaram reduções no  $Q_{90}$  com relação ao cenário de referência entre 4 a 17%, 5 a 50% e 25 a 58%, respectivamente. As maiores reduções para este cenário ocorreram para o sistema Coremas-Mãe-D'água, independente da escolha do modelo. Para o Sistema Piranhas-Açu como um todo, as reduções no  $Q_{90}$  no cenário B1 ficaram entre 7% e 33%.

Tabela 7. Variações no  $Q_{90}$  do futuro com relação ao presente para os Sistemas Piranhas-Açu e Jaguaribe.

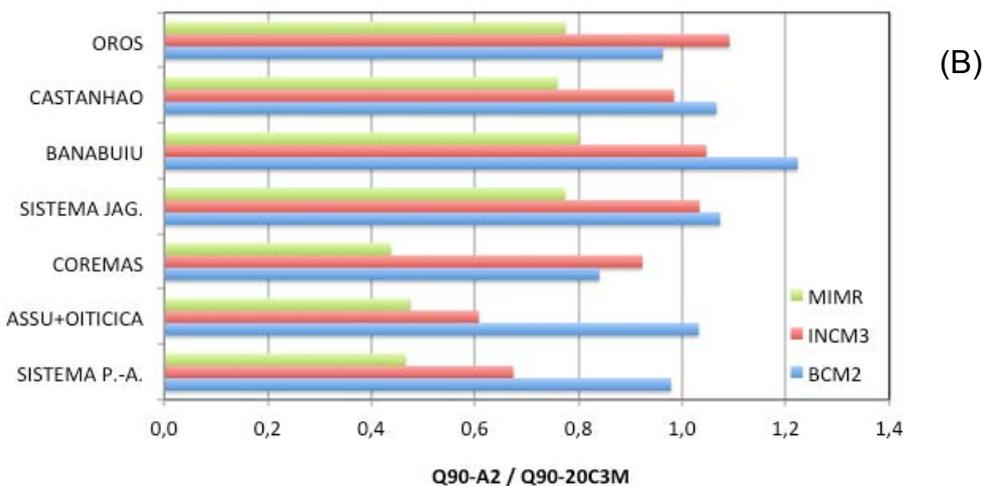
CENÁRIO	Variação	MODELOS		
		BCM2	INCM3	MIMR
<b>PIRANHAS - AÇU</b>				
B1	SISTEMA	-0,07	-0,14	-0,33
	MIN	-0,17	-0,50	-0,58
	MAX	-0,04	-0,05	-0,25
A2	SISTEMA	-0,02	-0,33	-0,53
	MIN	-0,16	-0,39	-0,56
	MAX	0,03	-0,08	-0,53
<b>JAGUARIBE</b>				
B1	SISTEMA	0,05	-0,07	-0,34
	MIN	0,04	-0,18	-0,36
	MAX	0,05	-0,02	-0,29
A2	SIS	0,07	0,03	-0,23
	MIN	-0,04	-0,02	-0,24
	MAX	0,22	0,09	-0,20

Fonte: FUNCEME 2013

Figura 11. Razão entre a vazão com 90% de garantia dos cenários (a) B1 ( $Q_{90-B1}$ ) e (b) A2 ( $Q_{90-A2}$ ) e a vazão com 90% de garantia do período de referência de cada modelo ( $Q_{90-20C3M}$ ).



Fonte: FUNCEME 2013.



Fonte: FUNCEME 2013.

Análise similar com os mesmos modelos foi realizada para o sistema Jaguaribe, identificando-se reduções no  $Q_{90}$  no cenário B1 com relação ao cenário de referência para os modelos INCM3 e MIMR entre 2 a 18% e 29 a 36%, respectivamente, e aumentos da ordem de 5% para o modelo BCM2. Para o Sistema Jaguaribe como um todo, as variações no  $Q_{90}$  no cenário B1 com relação ao cenário de referência ficaram entre -34 a +5%.

No que se refere ao cenário A2, relativo ao cenário de referência, foi identificada, para os modelos INCM3 e MIMR, uma intensificação nas reduções do  $Q_{90}$  correspondente ao sistema dos reservatórios da Bacia do Rio Piranhas-Açu, enquanto que para o modelo BCM2 tivemos uma atenuação destas reduções no  $Q_{90}$ . Para os reservatórios do Sistema Jaguaribe foi observado de maneira geral, para todos os modelos, ou uma atenuação destas reduções ou um aumento no  $Q_{90}$  de cada reservatório pertencente a este sistema.

Para os modelos INCM3 e MIMR, os impactos negativos projetados sobre o  $Q_{90}$  dos hidrossistemas da Bacia do Rio Jaguaribe no cenário B1 foram maiores do que aqueles correspondentes ao cenário A2. De modo contrário, os respectivos impactos sobre os hidrossistemas da Bacia do Rio Piranhas-Açu no cenário B1 foram menores do que os correspondentes identificados no cenário A2.

Comparando-se os resultados para os sistemas Piranhas-Açu e Jaguaribe em ambos cenários B1 e A2, fica evidente que, em geral, as mudanças de clima projetadas para o período 2041-2070 terão maior impacto sobre a garantia dos hidrossistemas da Bacia do Piranhas-Açu do que da Bacia do Jaguaribe. Isto impõe um desafio ainda maior para o setor de recursos hídricos daquela bacia, quando comparado com a do Jaguaribe, em vista de tratar-se de um rio transfronteiriço e diante do quadro de organização e fragilidades dos sistemas de recursos hídricos dos estados que compõem a bacia do Piranhas-Açu.

## 5 Conclusões

Os MCGs mostram uma intensificação das condições de aridez para o centro-leste da Região Nordeste e uma leve a moderada tendência de atenuação destas condições para noroeste da região.

Dos modelos analisados, o que apresentou melhor performance em termos da representação da variabilidade intra-anual do clima para as bacias estudadas foi o INCM3, e em segundo lugar o MIMR. No entanto, os resultados dos três modelos foram aqui analisados visando dar uma idéia da incerteza dos mesmos.

As mudanças de precipitação média anual projetadas pelos três modelos nos dois cenários, em relação ao período de referência, variaram de um ligeiro aumento a reduções significativas. As reduções mais significativas no cenário B1 foram 13 e 24% para os modelos INCM3 e MIMR, respectivamente. Para o cenário A2 a redução mais expressiva foi aquela projetada pelo modelo MIMR para a bacia do Coremas Mãe D'água (11%). Os aumentos em precipitação projetados nos dois cenários foram pequenos, em geral ficando abaixo de 3% e com apenas dois casos no cenário A2 em que os aumentos foram da ordem de 5% (Banabuiú e Orós com os modelos BCM2 e INCM3, respectivamente).

Todos os modelos indicam um aumento de temperatura para o período 2041-2070 e cenários B1 e A2 relativo ao cenário de referência, o que implicou em um aumento na evapotranspiração potencial. O aumento de temperatura e evapotranspiração foram menores para o BCM2 e maiores para o MIMR.

Este aumento de evapotranspiração resultou, de modo geral, em um impacto negativo nos deflúvios superficiais e na vazão garantida de 90% ( $Q_{90}$ ), em particular para a Bacia do Rio Piranhas-Açu. Em geral, os impactos hidrológicos das mudanças de clima serão mais negativos para a Bacia do Piranhas-Açu do que da Bacia do Jaguaribe. Deve-se ainda ressaltar que os impactos negativos do aumento da evapotranspiração potencial não estão ligados somente à redução dos deflúvios superficiais, mas também terão como consequência o aumento da demanda da agricultura irrigada.

Apesar de não terem sido avaliados os impactos sobre estratégias de alocação, as mudanças futuras no  $Q_{90}$  são um bom indicador da necessidade

de um sistema de gestão com estratégias de alocação mais flexíveis, tendo em vista que as mudanças de clima irão impactar de forma particular os diferentes usuários dos hidrossistemas. Não faz sentido, assim, o sistema de gestão das duas bacias ficar preso a regras estáticas sem levar em consideração as variações do clima em suas múltiplas escalas (sazonal, decadal e de mudanças climáticas) e seus impactos no processo de alocação.

## 6 Referências

- Alexandre, A.M.B., 2005. Regionalização de Vazões Máximas, Médias e Parâmetros de Modelos Hidrológicos no Estado do Ceará. 2005. 0 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos)) - Universidade Federal do Ceará, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins.
- Alexandre, A.M.B., Martins, E.S.P.R., Clarke, R.T. e Reis Júnior, D.S. 2005. Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Integrando a Gestão de Águas às Políticas Sociais e de Desenvolvimento Econômico. Porto Alegre : ABRH.
- Barros, F.V.F., Martins, E.S.P.R., Nascimento, L.S. e Reis Júnior, D.S. 2009a. Avaliação do Desempenho de Algoritmos Evolucionários na Calibração Multiobjetivo do Modelo HYMOD no Estado do Ceará. In: Dirceu Silveira REIS JUNIOR, Eduardo Sávio Passos Rodrigues MARTINS. (Org.). Avaliação do Desempenho de Algoritmos Evolucionários na Calibração Multiobjetivo do Modelo HYMOD no Estado do Ceará. Fortaleza: Expressão Gráfica, v. 1, p. 87-114.
- Barros, F.V.F., Martins, E.S.P.R., Reis Júnior, D.S. e Nascimento, L.S. 2009b. Use of Multiobjective Evolutionary Algorithms in Water Resources Engineering. In: Nadia NEDJAH, Leandro dos Santos COELHO, Luiza de Macedo MOURELLE. (Org.). Multi-Objective Swarm Intelligent Systems. 1 ed. Amsterdã: Springer, 2009, v. 1, p. 1-43.
- Barros, F.V.F., Martins, E.S.P.R., Nascimento, L.S. e Reis Júnior, D.S. 2008. Calibration of hydrologic models using multiobjective evolutionary algorithms. In: 13th World Water Congress, 2008, Montpellier. Global Change and Water Resources: confronting the expanding and diversifying pressures. Johannesburg, South Africa : IWRA.
- Barros, F.V.F., Martins, E.S.P.R., Nascimento, L.S. e Reis Júnior, D.S. 2007. Calibração de Modelos Hidrológicos Utilizando Algoritmos Evolucionários

Multiobjetivo. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre : ABRH.

Barros, F.V.F. 2007. Uso de Algoritmos Evolutivos na Calibração de Modelos Hidrológicos e na Operação de Sistemas de Reservatórios. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos)) - Universidade Federal do Ceará, Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins.

Dawdy, DR, O'Donnell, T. 1965. Mathematical Models of Catchment Behaviour. Journal of Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 91(HY4), 123- 127.

Fowler, H J, Blenkinsop, S. and Tebaldib, C. 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling, Int. J. Climatol. 27: 1547–1578, doi: 10.1002/joc1550.

Hargreaves, G. H., 1974: Potencial Evapotranspiration and Irrigation Requirements for Northeast Brazil, Utah State University.

Hewitson, B.C., Crane, R.G. 2006. Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa. International Journal of Climatology 26: 1315–1337.

IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Emission Scenarios. Vienna, Assessment Report 04.

Lopes, J.E.G., Braga, B.P.F. e Conejo, J.G.L. 1981. Hydrological simulation: application of a simplified model (*In Portuguese*), In: Anals of III Brazilian of Water Resources, v.2, 42-62, Fortaleza.

Mitchell, T.D., 2004. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids. About to be submitted, In: [http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU\\_TS\\_2\\_1.html](http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU_TS_2_1.html).

- New M., Hulme, M., Jones P.D. 2000. Representing twentieth century space-time climate variability. Part 2: development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate* 13, 2217-22
- Shuttleworth, W.J., 1992: Chapter 4 - Evaporation, In: *Handbook of Hydrology*, Editor in Chief: D. R. Maidment, McGraw-Hill, New York.
- von Storch, H. 1999. On the Use of “Inflation” in Statistical Downscaling. *Journal of Climate*, 12, 3505–3506.
- Wilby R.L. 1998. Statistical downscaling of daily precipitation using daily airflow and seasonal teleconnection indices. *Climate Research* 10: 163–178.
- Wilby, R.L., Charles S.P., Zorita E., Timbal B., Whetton, P., Mearns, L.O. 2004. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, IPCC Reports.