

Análise dos Impactos de Mudanças Climáticas nos Regimes de Precipitação e Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí

Katiúcia Nascimento Adam^{*}; Walter Collischonn^{*}
katiuciapinto@yahoo.com.br; collischonn@iph.ufrgs.br

Recebido: 24/08/11 - revisado: 23/08/12 - aceito: 20/05/13

RESUMO

Mudanças climáticas podem gerar significativos impactos sobre o regime hidrológico. No âmbito dos recursos hídricos, o principal efeito de tais mudanças se faz sentir no escoamento de bacias hidrográficas. Neste trabalho avaliou-se o impacto de possíveis cenários de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, afluente da margem esquerda do rio Uruguai. Análises de sensibilidade da vazão em função de mudanças hipotéticas na precipitação média anual mostraram que as vazões médias e altas são mais sensíveis a mudanças na precipitação. Para simulação hidrológica da bacia foi utilizado o modelo hidrológico MGB-IPH. O período simulado é de 1960 a 2005. Cenários de mudanças climáticas para 2050 (janela de 30 anos centrada em 2050) foram obtidos através do gerador de cenários MAGICC/SCENGEN, considerando resultados de vinte Modelos Climáticos Globais - GCM's e três cenários de emissão de gases de efeito estufa. Os resultados apontam, quanto à totalidade dos modelos, para acréscimo de temperatura, porém quanto à variável precipitação ocorrem maiores incertezas, principalmente em relação à magnitude destas variações. Também foram observadas variações destas predições entre os três cenários de mudanças climáticas analisados. As maiores incertezas encontradas estão relacionadas à precipitação. A discrepância entre a magnitude das modificações para precipitação é muito grande, além do que não há concordância, entre os GCM's, se esta variável irá aumentar ou diminuir no futuro. As incertezas relacionadas às projeções de anomalias de precipitação e temperatura, previstas pelo conjunto de 20 GCM's, foram amplificadas ao avaliar o impacto de mudanças climáticas no regime de vazões.

Palavras-chave: *Mudanças climática. Simulação de cenários de mudanças climáticas.*

INTRODUÇÃO

As alterações climáticas podem gerar significativos impactos sobre o regime hidrológico, entre eles aumento de cheias, secas, erosão, deterioração da qualidade das águas e diversidade dos ecossistemas. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2007) define Mudança Climática como as mudanças de clima no tempo devido à variabilidade natural e/ou resultado das atividades humanas (ações antrópicas, dentre elas a emissão de gases relacionados ao efeito estufa).

Um dos principais efeitos das mudanças e variabilidade do clima se faz sentir nos escoamentos gerados nas bacias hidrográficas. Portanto é imprescindível o estudo destes impactos para o adequado gerenciamento dos recursos hídricos.

Atualmente buscam-se relações que permitam entender os processos de mudanças climáticas a fim avaliar os impactos e mitigá-los. Isto envolve estudos de processos climáticos, utilização de Modelos Climáticos Globais - GCM's, simulação de cenários futuros, dentre outros.

Diversos GCM's tem sido desenvolvidos para simular o clima atual e usados para estimar futuras mudanças. Esses modelos são considerados pela maioria da comunidade científica como a melhor ferramenta, pois levam em conta de forma quantitativa (numérica) o comportamento dos compartimentos climáticos (atmosfera, oceanos, vegetação, solos, etc.) e suas interações, permitindo que se simulem prováveis cenários de evolução do clima para vários cenários de emissões dos gases de efeito estufa.

O IPCC tem adotado um conjunto de cenários climáticos, conhecidos como cenários SRES ("Special Report on Emissions Scenarios") que são baseados em quatro projeções diferentes de emissões de gases de efeito estufa para o futuro, relacionados com aspectos de desenvolvimento

^{*}Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS

social, econômico e tecnológico, crescimento populacional, preocupação com o meio ambiente e diferenças regionais. Os modelos climáticos são usados como ferramentas para projeções de futuras mudanças do clima, como consequência de futuros cenários de forçantes climáticas (gases de efeito estufa e aerossóis). Logo, um cenário de mudança climática pode ser definido como uma descrição de como o futuro se desenrolará, baseando-se num conjunto de suposições base, acerca de relações chave e mecanismos geradores que devem ser coerentes e consistentes.

No âmbito de bacia hidrográfica a abordagem mais comum para estimar impactos de mudanças climáticas é avaliar como as anomalias de precipitação e de temperatura, ou seja, o aumento/diminuição destas variáveis, devido a variações de clima, pode afetar o regime de vazão dos rios, uma vez que a precipitação esta diretamente relacionada ao escoamento de uma bacia hidrográfica e a temperatura relaciona-se a evapotranspiração e ao balanço hídrico (e.g. JIANG et al, 2004).

O resultado da variação de temperatura e precipitação nos regimes de vazão é avaliada através de uso de modelos hidrológicos capazes de representar grande parte dos processos hidrológicos e também as características físicas da bacia hidrográfica. O conceito de elasticidade da vazão em função de mudanças na precipitação média também é uma alternativa para mensurar a vulnerabilidade da bacia a mudanças climáticas (e.g. FU et al, 2007; CHIEW, 2006).

Neste trabalho apresenta-se uma análise do impacto de possíveis cenários de mudanças climáticas sobre o regime precipitação e vazão na bacia do Ibicuí e das incertezas associadas a estas previsões. Para tanto a utilização do modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH e do gerador de cenários MAGICC/SCENGEN.

ÁREA DE ESTUDO

A área em estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Ibicuí, principal afluente da margem esquerda do rio Uruguai em território brasileiro, com área aproximada de 53.000 Km². (Figura 1).

O clima da bacia do rio Ibicuí é caracterizado pela sua homogeneidade, no que se refere à pluviometria e ao ritmo estacional do seu regime. Quanto ao regime térmico, a temperatura

igualmente apresenta certa homogeneidade, com média entre 16°e 20°C. Os tipos de solo da região são classificados em Alissolo, Argissolo, Afloramento Rochoso, Chernossolo, Gleissolo, Litossolo, Luvisolo, Neossolo, Nitossolo, Planossolo e Vertissolo (EMATER/RS-Ascar, 2008).

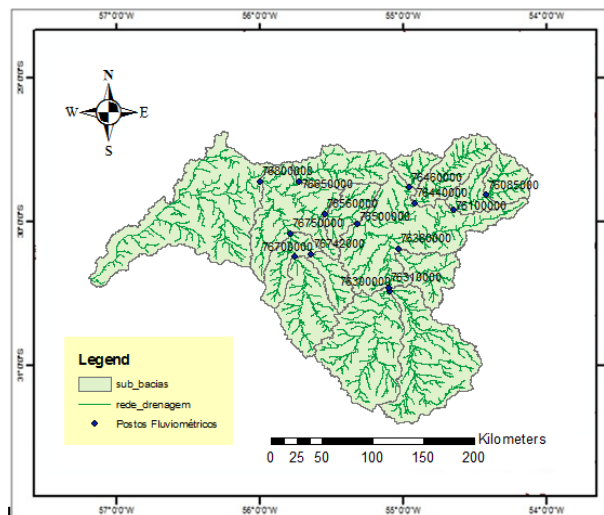


Figura 1- Bacia hidrográfica do Rio Ibicuí (sub-bacias e postos fluviométricos).

A população total da bacia do Ibicuí é de aproximadamente 392.976 habitantes, tendo como base econômica a agricultura, destacando-se o cultivo de arroz irrigado, que constitui o principal uso da água. Segundo informações do banco de dados de licenciamento da FEPAM (2008), a área destinada à irrigação na bacia em estudo é de 183.099 ha sendo a maior parte destinada a cultivo de arroz, seguida de milho/soja, com demandas de água, respectivamente, de 11.500 m³/ha e 4.000 m³/ha. Cerca de 50% das áreas irrigadas de arroz são atendidas por açudes (111.362 ha). O rio Uruguai atende diretamente cerca de 10% da área destinada a esta atividade, aliviando o consumo interno da bacia.

METODOLOGIA

No presente estudo o impacto de cenários de mudanças climáticas foi avaliado com base em quatro principais etapas descritas a seguir:

1. Coleta de dados e simulação hidrológica da bacia do Rio Ibicuí: Inicialmente foi

- realizada a modelagem hidrológica da bacia do Rio Ibicuí utilizando dados observados de climatologia e vazão. Através desta etapa foi possível simular o comportamento hidrológico da bacia bem como calibrar parâmetros do modelo hidrológico utilizado, neste caso o MGB-IPH. Dados diários de vazão, chuva e clima foram obtidos através da Agência Nacional de Águas (ANA) no seu sistema Hidroweb (<http://hidroweb.ana.gov.br/>) para o período de 1960 a 2005.
2. Estimativa das anomalias de temperatura do ar e precipitação em cenários de mudanças climáticas: Para a geração de cenários de mudanças climáticas, obtenção das variações de temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$) e precipitação (%) foi utilizado o modelo MAGICC/SCENGEN. Os dados obtidos por este software representam as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 (janela de 30 anos centrada em 2050). Os valores de mudanças previstas nas variáveis analisadas (temperatura e precipitação) representam o aumento ou a redução que as mesmas terão no futuro, ou seja, uma anomalia, que neste trabalho foi utilizada como um incremento, um delta (Δ) perturbador das séries observadas (séries de dados atuais). Com a adição destas anomalias nas séries de dados observados das variáveis temperatura e precipitação, novas séries são obtidas: as séries futuras de temperatura e precipitação;
 3. Simulação dos cenários de Mudanças Climáticas: a partir da estimativa de anomalias de temperatura (ΔT) e precipitação (ΔP) obtidas pelo gerador de cenários MAGICC/SCENGEN foram obtidas as séries futuras de temperatura e precipitação. Tais séries foram usadas como dados de entrada do MGB-IPH, gerando assim as séries futuras de vazão, ou seja, as vazões que poderão ocorrer no futuro de 2050 (janela de 30 anos centrada em 2050) na Bacia do Rio Ibicuí; 4) Avaliação dos impactos de mudanças climáticas: a partir das séries de dados obtidas na etapa (3) foram comparadas as séries de vazão atual e futura a fim de mensurar a variação desta variável devido ao impacto de mudanças climáticas na região. Também foi realizada a análise de sensibilidade da vazão em função de mudanças hipotéticas na precipitação

média anual. Em ambos os casos, utilizou-se o modelo hidrológico MGB-IPH. O período simulado é de 1960 a 2005.

A seguir apresenta-se uma breve descrição do modelo hidrológico MGB-IPH, dos cenários de mudança climática utilizados neste estudo e do gerador de cenários MAGICC/SCENGEN.

Modelo Hidrológico MGB-IPH

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB-IPH, descrito em Collischonn (2001) ou Collischonn et al (2007), é um modelo distribuído desenvolvido para aplicações em grandes bacias .

O modelo é composto dos seguintes módulos: balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; e escoamento na rede de drenagem. O modelo é distribuído no espaço, o que significa que a bacia hidrográfica é subdividida em unidades menores, definidas geomorfologicamente, denominadas mini-bacias.

O tipo de vegetação e uso da terra dentro de cada mini-bacia é categorizada dentro de uma ou mais classes de acordo com a escolha do usuário, utilizando a abordagem de Unidade de Resposta Hidrológica (URH). Uma URH é uma combinação única de tipo de solo e de uso da terra.

A interceptação é computada através de um reservatório de volume determinado a partir do índice a área foliar da vegetação do bloco. A infiltração no solo e o escoamento superficial são determinados a partir de modelo baseado em uma relação probabilística entre umidade do solo e fração de área saturada conforme utilizado por Todini (1996) e Moore e Clarke (1981). Os volumes de escoamento sub-superficial e subterrâneo são funções da umidade do solo. A evapotranspiração é determinada pelo método de Penman Monteith (SHUTTLEWORTH, 1993). Os escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo são propagados em nível de célula através de reservatórios lineares. Os volumes gerados nas células são propagados pela rede de drenagem pelo modelo Muskingun Cunge linear (TUCCI, 2005).

Devido a uma forte base física o modelo MGB-IPH é apropriado para ser utilizado em estudos de avaliação de impactos de mudanças no uso do solo ou mudanças climáticas. Desde seu desenvolvimento, foram realizadas diversas aplicações do modelo MGB-IPH em várias regiões do país, inclusive em estudos de mudanças climáticas na região hidrográfica em estudo.

Cenários de Mudança Climática e Gerador de Cenários MAGICC/SCENGEN

Todo o processo de obtenção de futuras mudanças das variáveis climáticas inicia-se com a construção de cenários. Estes podem ser definidos como uma descrição possível do futuro, tendo como base um conjunto de suposições, acerca de relações chave e mecanismos geradores, tais como: desenvolvimento tecnológico, flutuações monetárias, crescimento econômico e populacional, desenvolvimento de técnicas para redução de impactos ambientais e, principalmente, o grau de emissão dos gases de efeito estufa.

Cenários de mudança climática para bacia do Ibicuí foram obtidos a partir do gerador de cenários de mudanças climáticas MAGICC/SCENGEN (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induce Climate Change/SCENario GENerator) versão 5.3 que considera as principais diretrizes estabelecidas pelo Quarto Relatório de Avaliação do Grupo de Trabalho 1 (Fourth Assessment Report, Working Group 1, AR4) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (International Panel on Climate Change - IPCC).

O MAGICC/SCENGEN consiste na combinação do modelo climático MAGICC e a base de dados sobre cenários climáticos SCENGEN. Segundo Wigley (2003a), o MAGICC/SCENGEN é baseado em um modelo acoplado de ciclo de gases e clima (MAGICC) que gera dados de modificação na temperatura média global utilizados pelo SCENGEN para gerar cenários de mudanças climáticas espacializados. MAGICC tem sido o principal modelo utilizado pelo IPCC para gerar projeções futuras de temperatura média global e nível médio do mar. Baseado em cenários de emissões de gases do efeito estufa e modelos simplificados que emulam o comportamento de modelos de circulação geral (GCM's), o MAGICC calcula projeções de concentração de gases de efeito estufa, temperatura média global e nível médio do mar. Os resultados de temperatura média global são utilizados pelo SCENGEN para produzir padrões espaciais de mudanças climáticas (resultados em uma grade de 2,5 x 2,5°) a partir de um banco de dados de resultados de GCM's e utilizando o método "pattern scaling" descrito em Santer et al (1990) e Mitchell (2003). Neste estudo foram utilizadas previsões de mudanças climáticas relativas a três cenários de emissões de gases de efeito estufa (A1B, A2 e B2) simulados por vinte modelos de circulação geral, sendo estes os modelos utilizados nas simulações de mudanças climáticas do IPCC (AR4).

Os Cenários de Mudanças Climáticas Utilizados

Cenário A1B - este pertence à família de cenários A1 que descreve um mundo futuro onde a globalização é dominante, existindo um crescimento econômico rápido e um crescimento populacional pequeno, com um desenvolvimento rápido de tecnologias mais eficientes; Cenário A2 - descreve um mundo futuro muito heterogêneo onde a regionalização é dominante. Existiria um fortalecimento de identidades culturais regionais, auto-suficiência em termos de recursos e menos ênfase nas interações econômicas, sociais e culturais entre as regiões são característicos para esse futuro; e Cenário B2 - descreve um mundo no qual a ênfase está em soluções locais, na sustentabilidade econômica, social e ambiental. As políticas públicas e as estratégias empresariais, a nível nacional e local, são influenciadas por conceitos ambientalistas, com uma tendência para a auto-suficiência local.

Os Modelos de Circulação Geral Utilizados

Os modelos acoplados oceano-atmosfera utilizados neste trabalho, são previamente descritos a seguir, de acordo com o esquema: Sigla. Instituição pertencente. Características de componentes atmosféricas e oceânicas, e suas respectivas resoluções.

CCCMA-31. Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada. Componente atmosférica com 31 níveis verticais e grades de resolução de 2.8° x 2.8° (latitude x longitude), componente oceânica com 29 níveis verticais e grades com resolução de 1.85 x 1.85° (SCINOCCA et al., 2008); **BCCRBCM2.** Instituto Bjerknes Centro de Pesquisas Climáticas (BCCR), Bergen University, Noruega. Componente atmosférica com 31 níveis verticais, componente oceânica com 35 níveis verticais e grades de resolução de 0,5° x 1,5° (RAMIREZ e JARVIS, 2010). **CNRM-CM3.** Centre National de Recherches Meteorologiques, Meteo France, France. Componente atmosférica com 45 níveis verticais e grades com resolução de 2.8° x 2.8°, componente oceânica com 31 níveis verticais e grades com resolução de (0.5°-2°) x 1.875° (SALAS-MÉLIA et al., 2005); **CSIRO-30.** CSIRO, Austrália. Componente atmosférica com 18 níveis verticais e sua resolução horizontal espectral é R21 (aproximadamente 5.6 até 3.2 graus), componente oceânica com 31 verticais e grades com resolução de 0.84° x 875° (GORDON et al., 2002); **MPIECH-5.** Max Planck Institute for Meteorology, Germany. Componente atmosférica com 32 níveis verticais,

componente oceânica com 41 níveis verticais e grades com resolução de 1° x 1° (JUNGCLAUS et al., 2005); **ECHO-G**. Meteorological Institute of the University of Bonn, Institute of KMA and Model and Data Group, Germany/Korea. Componente atmosférica com 19 níveis verticais e 20 níveis verticais em sua componente oceânica. (GRÖTZNER et al., 1996); **FGOALS1G**. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, China. Componente atmosférica com 26 níveis verticais e grades com resolução de 2.8° x 2.8°, componente oceânica com 16 níveis verticais e grades com resolução de 1° x 1° (YU et al., 2004); **GFDLCM20** e **GFDLCM21**. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory – NOAA (USA). Componente atmosférica com 24 níveis verticais e grades com resolução de 2.5° x 2°, componente oceânica apresenta uma resolução de 1° em latitude-longitude, e passando a ter uma resolução maior ao norte de 30°. Esta componente apresenta 50 níveis verticais no oceano e não tem ajuste de fluxos (DELWORTH et al., 2004); **GIS-EH** e **GIS-ER**. Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA, USA. Componente atmosférica com 20 níveis verticais e grades com resolução de 5° x 4°, componente oceânica com 13 níveis verticais e grades com resolução de 4° x 5° (SCHIMIDT et al., 2005); **INMCM-30**. Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science, Russia. Componente atmosférica com 21 níveis verticais e grades com resolução de 4° x 5°, componente oceânica com 33 níveis verticais e grades com resolução de 2° x 2.5° (DIANSKY et al., 2002); **IPSL_CM4**. Institute Pierre Simon Laplace (IPSL), France. Componente atmosférica com 19 níveis verticais e grades com resolução de 3.75° x 2.5°, componente oceânica com 30 níveis verticais e grades com resolução de 2° x 2° (MARTI et al., 2005); **MIROC-HI**. CCSR/NIES/FRCGC, Japan. Componente atmosférica com 56 níveis verticais, componente oceânica com 47 níveis verticais e grades com resolução de 0.19° x 0.28° (HASUMI e EMORI, 2004); **CCSM-30**. National Center for Atmospheric Research – NCAR, USA. Componente atmosférica com 26 níveis verticais, componente oceânica com 40 níveis verticais e grades com resolução de 1° x 1.125° (COLLINS et al., 2005); **MIROMED**. CCSR/NIES/FRCGC, Japan. Componente atmosférica com 20 níveis verticais, componente oceânica com 43 níveis verticais e grades com resolução de 1.4° x 1.4° (HASUMI e EMORI, 2004); **MRI-232**. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency. Componente atmosférica com 30 níveis verticais; componente oceânica com

grades com resolução de 0.5°- 2.0° x 2.5° (YUKIMOTO et al., 2001); **NCARPCM1**. National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA. Componente atmosférica com 18 níveis verticais e grades com resolução de 2.8° x 2.8°, componente oceânica com 40 níveis verticais e grades com resolução de (0.27° - 1°) x 1° (Washington et al., 2000); **UKHADCM3**. Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, United Kingdom. Componente atmosférica com 19 níveis verticais e grades com resolução de 2.75° x 3.75° que produz uma grade global de 96 x 73 células, componente oceânica com 20 níveis verticais e grades com resolução de 1.25° x 1.25° (GORDON et al., 2002); **UKHADGEM**. Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, United Kingdom. Componente atmosférica com 38 níveis verticais e grades com resolução de 1.25° x 1.875°, componente oceânica com 20 níveis verticais e grades com resolução de 1.25° x 1.25° (JOHNS et al., 2006).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sensibilidade de Vazões na Bacia do Rio Ibicuí

A análise de elasticidade de vazão em relação a mudanças de precipitação foi realizada, considerando o cenário natural, para a Bacia do Rio Ibicuí em quatro diferentes pontos da bacia, todos representando sub-bacias de cabeceira. Estes correspondem às sub-bacias do Rio Jaguari, Rio Itú, Rio Ibirapuitã e Rio Santa Maria, como apresentado na Figura 2.

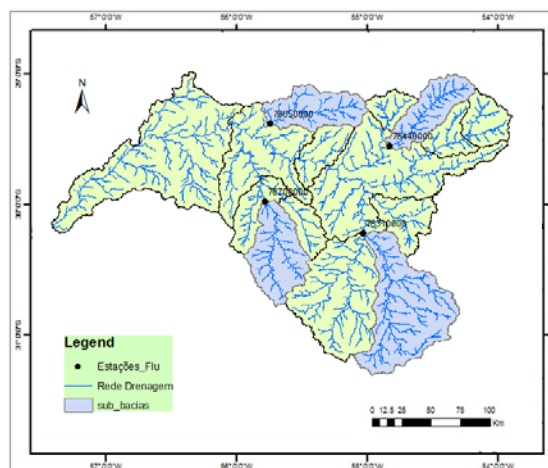


Figura 2 - Localização das sub-bacias utilizadas para análise de sensibilidade na bacia do Ibicuí

Na sub-bacia do Rio Santa Maria o efeito de uma mudança na precipitação média é amplificado na vazão, em uma razão $\Delta Q/\Delta P=2$ para a vazão média. A cada acréscimo/decrécimo de 1% na precipitação média tem-se um acréscimo/decrécimo de 2% na vazão média da bacia. Para a sub-bacia do Rio Jaguari esta relação é $\Delta Q/\Delta P=1.87$, para a sub-bacia do Rio Itu $\Delta Q/\Delta P= 1.6$ e para sub-bacia do Rio Ibirapuitã $\Delta Q/\Delta P=1.77$.

O comportamento hidrológico de uma região depende dos tipos de solo, rochas, usos do solo, dentre outros. A sub-bacia do rio Ibirapuitã, por exemplo, possui predominância de solos rasos. Um evento de precipitação de pequena magnitude é capaz de saturar os solos da bacia. Logo um pequeno aumento ou diminuição na magnitude da precipitação implicará em um aumento ou diminuição principalmente no escoamento superficial gerado e pequena alteração na recarga do aquífero. A sub-bacia do Rio Itu apresenta em quase sua totalidade solos profundos, e as demais sub-bacias ambos os tipos de solo.

Outro aspecto importante refere-se à litologia da região. Predomina-se na bacia do Rio Ibicuí (considerando também a do Santa Maria) dois domínios morfoestruturais: sedimentar clástica e ígnea vulcânica (LEPSCH, 2002). As rochas existentes na bacia hidrográfica exercem um controle importante sobre a recarga dos aquíferos e sobre a conexão rio-aquífero.

Estimativas das Projeções de Anomalias de Precipitação e Temperatura para a Bacia do Rio Ibicuí

As Figuras 3, 4 e 5 mostram as mudanças na temperatura (eixo das ordenadas) e precipitação (eixo das abscissas) médias anuais na região da bacia do rio Ibicuí previstas para 2050, (resultados obtidos do gerador de cenários MAGICC/SCENGEN). Cada ponto do gráfico é um resultado relacionado a um dos 20 GCM's para cada um dos cenários de mudanças climáticas. Os resultados se referem a uma janela de 30 anos centrada no ano de referência. Percebe-se que para todos os cenários a totalidade dos GCM's mostra acréscimo de temperatura, porém os resultados já são mais discrepantes quanto à precipitação. Nos três cenários analisados sete dos 20 modelos mostram redução enquanto o restante um aumento chuvas na bacia do Ibicuí.

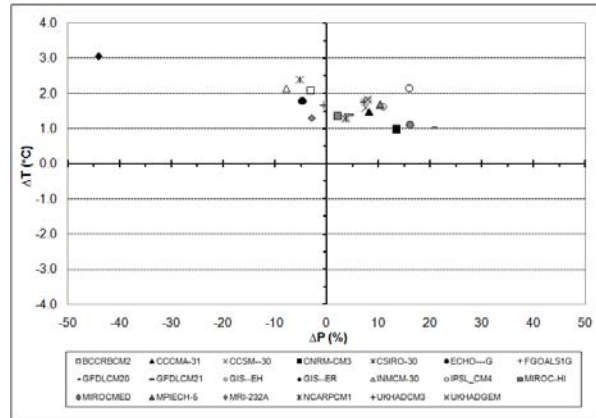


Figura 3 - Mudanças na temperatura e precipitação médias anuais na região da bacia do Rio Ibicuí previstas para 2050 – Cenário A1B-AIM

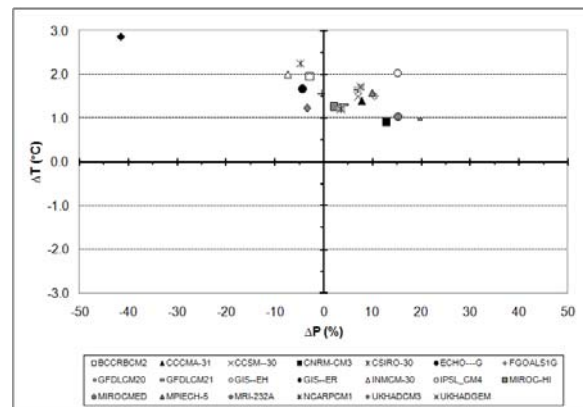


Figura 4 - Mudanças na temperatura e precipitação médias anuais na região da bacia do Rio Ibicuí previstas para 2050 – Cenário A2-ASF

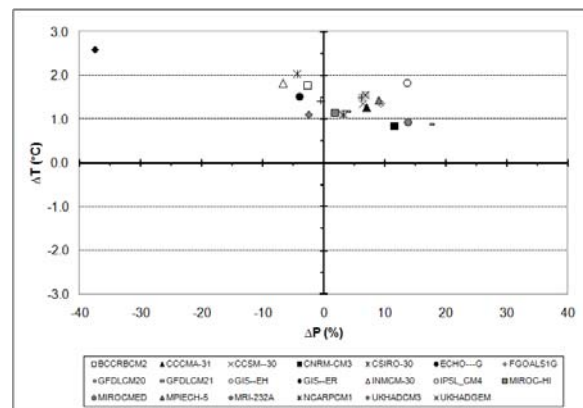


Figura 5 - Mudanças na temperatura e precipitação médias anuais na região da bacia do Rio Ibicuí previstas para 2050 – Cenário B2-MES

Uma comparação das estatísticas das projeções de anomalias de precipitação (%) média mensal para a bacia do rio Ibicuí (janela de 30 anos centrada no ano 2050), em função de 20 modelos de circulação geral (MAGICC/SCENGEN) e para três cenários de emissão de gases (A1B-AIM, A2-ASF e B2-MES) é apresentada na Figura 6.

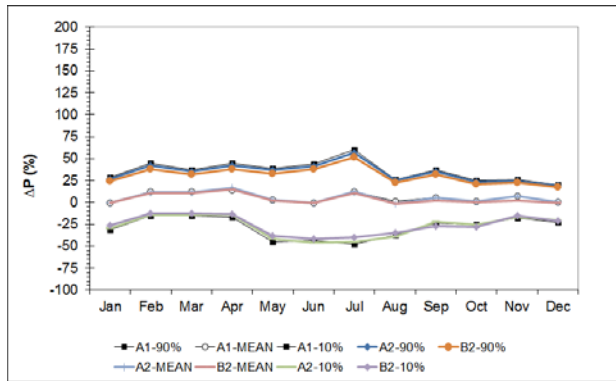


Figura 6- Comparação das estatísticas das projeções de anomalias de precipitação (%) média mensal (Cenários A1B-AIM, A2-ASF e B2-MES)

Observa-se na figura acima que poucas diferenças são observadas nos valores médios e na estimativa das incertezas entre os diferentes cenários de emissão de gases no futuro analisado. Observa-se ainda que nas estatísticas de projeções de anomalias de precipitação, os meses de maio, junho e julho são os que apresentam maiores incertezas nas projeções e os meses de outubro, novembro e dezembro as menores incertezas. No entanto ao analisar os resultados de cada um dos vinte GCM's separadamente, nota-se que há grande incerteza quanto à magnitude das alterações de precipitação previstas por estes modelos.

Simulação dos Cenários de Mudanças Climáticas na Bacia do Rio Ibicuí

As anomalias previstas para a área da bacia do Ibicuí, em cada grade do mapa gerado pelo MAGGIC/SCENGEN, foram interpoladas e agregadas às séries observadas, resultando em um novo arquivo de entrada (das variáveis temperatura e precipitação) utilizado pelo modelo hidrológico. Mantendo as séries observadas das demais variáveis climáticas (umidade relativa, insolação, velocidade do vento e pressão), parâmetros e usos da bacia, o modelo MGB-IPH foi novamente processado, só que agora tendo como resultado uma série de vazões futuras na Bacia do Rio Ibicuí.

Tais análises foram estimadas em seis diferentes pontos da bacia do Ibicuí, a saber: Foz do Rio Itu, Foz do Rio Jaguarí, Foz do Rio Ibirapuitã, Foz do Rio Santa Maria, Foz do Rio Ibicuí e Foz do Rio Ibicuí Mirim.

Para cada um dos 20 modelos climáticos, mês do ano e cenário de mudanças climáticas foi estimada a média das vazões Q90, Q95 (representando as vazões mínimas) e a vazão média de longo período QMLP, tanto para as séries atuais (dados observados) quanto para as séries de vazões futuras (séries obtidas através das anomalias de temperatura e precipitação) em cada um dos seis pontos em análise da bacia a fim de se obter uma comparação entre as séries de vazões atuais e futuras. Estatísticas do conjunto de resultados dos 20 modelos climáticos globais nos diferentes cenários, como a mediana, o desvio padrão, a mínima e a máxima e os percentis 10% e 90% foram analisadas. As Figuras 7, 8 e 9 mostram os resultados obtidos para a Foz do Rio Ibicuí, onde culmina a vazão das demais sub-bacias.

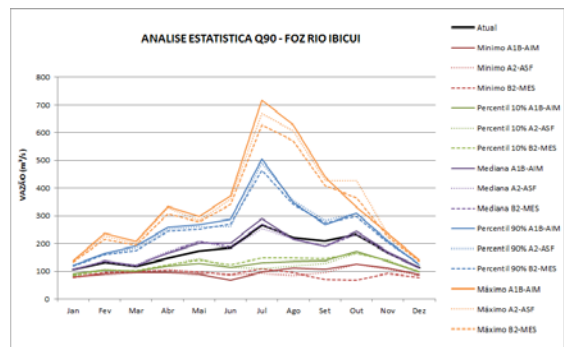


Figura 7- Análise estatística Q90 – Foz do Rio Ibicuí – Cenários AIB-AIM, A2-ASF e B2-MES: mínimo, máximo, mediana e 10º e 90º percentis.

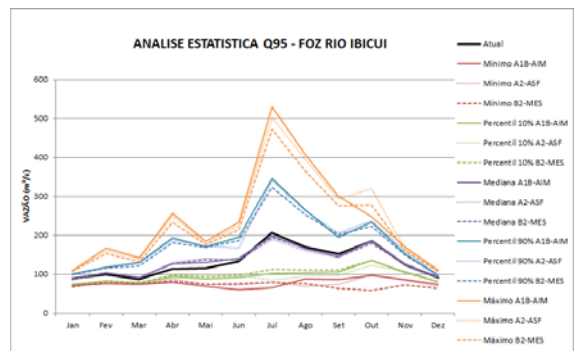


Figura 8 - Análise estatística Q95 – Foz do Rio Ibicuí – Cenários AIB-AIM, A2-ASF e B2-MES: mínimo, máximo, mediana e 10º e 90º percentis.

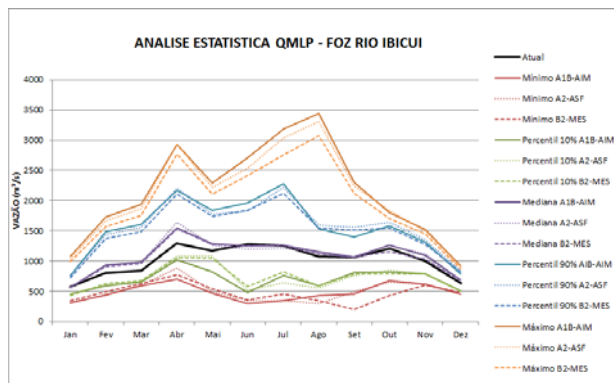


Figura 9 - Análise estatística QMLP – Foz do Rio Ibicuí – Cenários A1B-AIM, A2-ASF e B2-MES: mínimo, máximo, mediana e 10º e 90º percentis.

Do resultado da análise estatística (Figura 7 e 8) feita na foz do Rio Ibicuí observa-se que o comportamento, para Q90 e Q95, entre as séries de mediana e série atual são bastante similares para todos os meses do ano. Para as demais séries maiores incertezas são observadas nos meses de inverno, como já previsto na estimativa de anomalias de precipitação e temperatura. Maiores disparidades são encontradas para os valores das séries de máximo e mínimo em relação à série atual.

Quanto à vazão média de longo período (QMLP) as incertezas são maiores em todos os cenários analisados. Neste caso há maior disparidade entre a mediana e a série atual nos meses de fevereiro a maio e setembro a outubro para o cenário A1B-AIM. Para os cenários A2-ASF e B2-MES, tais disparidades entre séries são maiores nos meses de fevereiro a junho, setembro e outubro. Para esses meses o resultado indica aumento de vazão.

Nas Figuras 7 a 9, também se observa que as séries de mediana para o clima atual e as séries de mediana prevista pelo conjunto dos 20 modelos climáticos são bastante semelhantes.

No geral decréscimos nas vazões aumentariam os conflitos quanto ao uso da água, visto que a agricultura, com ênfase ao cultivo de arroz seguido de soja e milho, destaca-se como a principal atividade econômica da região, sendo, portanto, a irrigação o principal uso consuntivo de água na bacia. Já acréscimos desta variável aumentariam os transtornos decorrentes de inundações nas áreas ribeirinhas. Em épocas de cheia, a população dos municípios ribeirinhos acaba sendo afetada, tanto de forma direta, pela inundação das suas residências, como indiretamente, através dos reflexos provocados na economia (GRIDI, 2001). No entan-

to, com base na metodologia abordada neste trabalho, não se pode afirmar que a vazão na bacia do Rio Ibicuí irá aumentar ou diminuir, e esta incerteza é devida a discordância entre os resultados previstos pelo conjunto dos 20 CGM's analisados.

Paiva e Collischonn (2010), utilizando metodologia semelhante à descrita neste trabalho, avaliaram os impactos de mudanças climáticas para a bacia do Rio Quaraí, região hidrográfica vizinha à bacia do Ibicuí. O resultado obtido, utilizando seis modelos climáticos globais e o gerador de cenários MAGICC/SCENGEN versão 4.1, também apontou grande incerteza quanto à discrepância dos dados gerados pelos GCM's. A inclusão de um maior número de GCM's poderia diminuir tais diferenças de predições. Esta hipótese foi avaliada para a bacia do Ibicuí e o resultado mostrou que as incertezas continuam, mesmo com um conjunto de 20 GCM's. As maiores incertezas encontradas estão relacionadas à precipitação, o que conseqüentemente afeta os resultados obtidos para as vazões em ordem ainda maior. A discrepância entre a magnitude das modificações para precipitação é muito grande, além do que não há concordância, entre os GCM's, se esta variável irá aumentar ou diminuir no futuro.

As incertezas relacionadas às projeções de anomalias de precipitação e temperatura foram amplificadas ao avaliar o impacto de mudanças climáticas no regime de vazões. Logo surge a dúvida se realmente podemos confiar nos resultados obtidos e como usá-los para o gerenciamento dos recursos hídricos.

CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se o impacto de possíveis mudanças climáticas sobre o regime de vazão na Bacia do Rio Ibicuí.

Análises de sensibilidade de vazão a mudanças de precipitação mostraram que as vazões médias e altas são mais sensíveis a mudanças na precipitação. As análises de sensibilidade de vazão foram realizadas em quatro distintos pontos da bacia e mostraram que o efeito de uma mudança na precipitação média é amplificado na vazão, em uma razão $\Delta Q/\Delta P=1,83$ para a vazão média.

A estimativa de anomalias previstas pelo conjunto de GCM's analisados para o ano de 2050 aponta, quanto à totalidade dos modelos, para acréscimo de temperatura. Porém quanto às predições de anomalias da variável precipitação há maiores incertezas, principalmente quanto à

magnitude destas variações. Há também, como de se esperar, variações entre os cenários de mudanças climáticas. As maiores anomalias de precipitação são previstas pelo cenário A1B-AIM, já as menores pelo cenário de melhores condições ambientais B2-MES.

As incertezas relacionadas às projeções de anomalias de precipitação e temperatura, previstas pelo conjunto de 20 GCM's, foram amplificadas ao avaliar o impacto de mudanças climáticas no regime de vazões. Cabe ressaltar que existem grandes incertezas quanto à magnitude das variações de precipitação prescritas pelos 20 GCM's utilizados, o que confere pouca confiabilidade aos dados obtidos. Portanto é necessário cautela ao utilizar os dados de variações de precipitação e temperatura preditas por este conjunto de modelos.

REFERÊNCIAS

- CHIEW, F.H.S. Estimation of Rainfall Elasticity of Streamflow in Australia. *Hydrological Sciences Journal*, v.51, n.4, p. 613 – 625, 2006.
- COLLINS, C.M.; BLACKMON, M.L.; BONAN, G.B. The Community Climate System Model (CCSM). *Journal of Climate*, Special Issue, 2005.
- COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. 2001. Tese (Doutorado), IPH-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.G.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. The MGB-IPH model for Large-scale Rainfall-runoff Modeling”. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, p. 878-895, 2007.
- DELWORTH, T.L., et al. GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models – Part 1 Formulation and Simulation Characteristics. *Journal of Climate*, 2004.
- DIANSKY, N.A.; V.B. ZALENSKY. Simulation of Present-Day Climate With Acoupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model. *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics*, v.38, n. 6, p. 732-747, 2002.
- EMATER/RS-Ascar. Solos do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008, 222 p.
- FEPAM. Banco de Dados: Arquivos Digitais para Uso em SIG. Unidade de Paisagem Natural. 2008.
- Disponível em: http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp. Acesso em: 20 set. 2010.
- FU, G.; CHARLES, S.P.; CHIEW, F.H.S. A Two-parameter Climate Elasticity of Streamflow Index to Assess Climate Change Effects on Annual Streamflow. *Water Resources Research*, v.43, n.11, 2007. DOI: 10.1029/2007WR005890.
- GRID - Grupo de Gestão de Riscos de Desastres . *Relatório parcial das atividades do projeto Mapeamento de riscos e mitigação das consequências de desastres naturais com uso da engenharia*. Porto Alegre, 2001.
- GORDON, H. B.; ROTSTAYN, L. D.; MCGREGOR, J. L.; DIX, M. R., KOWALCZYK, E. A.; O'FARRELL, S. P.; WATERMAN, L. J.; HIRST, A. C.; WILSON, S. G.; COLLIER, M. A.; WATTERSON, I. G.; ELLIOTT, T.I. *The CSIRO Mk3 Climate System Model [Electronic publication]. Aspendale*: CSIRO Atmospheric Research. (CSIRO Atmospheric Research Technical Paper; no. 60), 2002, 130 p.
- GROETZNER, A.; SAUSEN, R.; CLAUSEN M. The Impact of Sub-Grid Scale Sea-Ice inhomogenities on The Performance of the Atmospheric General Circulation Model ECHAM3. *Climate Dynamics*, v. 12, p.447-496, 1996.
- HASUMI, H.; EMORI S. K-1 Coupled GCM (MIROC) Description. K-1 Technical Report No. 1, CCSR, NIES and FRCGC, September 2004.
- IPCC. *Climate Change 2007: The Scientific Basis- Contribution of Working Group 1 to the IPCC Fourth Assessment Report*. 2007.
- JIANG, T.; CHEN, Y.D.; XU, C.Y.; CHEN, X.; CHEN, X.; XU, C.-Y.; SINGH, V.P. Review on Regional Water Resources Assessment Models under Stationary and Changing Climate. *Water Resources Management*, v.18, n. 6, p. 591-612, 2004.
- JOHNS, T.C.; DURMAN, C.F.; BANKS, H.T.; ROBERTS, M.J.; MCLAREN, A.J. The new Hadley Centre Climate Model HadGEM1: Evaluation of Coupled Simulations. *Journal of Climate*, v.19, n.7, p. 1327-1353, 2006.
- JUGNCLAUS, J.H.; BOTZET, M.; HAAK, H.; KEENLYSIDE, N.; LUO, J.J.; LATIF, M.; MAROTZKE, J.; MIKOLAJEWICS, U.; ROECKNER, E. Ocean Circulation and Tropical Variability in the

- AOGCM ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate*, v.19, special section, 2005.
- LEPSCH, I.F. Formação e Conservação dos Solos. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2002.
- MARTI, O.; BRACONNOT, P.; BELLIER, J.; BENSHILA, R.; BONY, S. The New IPSL Climate System Model: IPSL-CM4. Institute Pierre Simon Laplace, Technical Report, 2005.
- MITCHELL, T.D. Pattern Scaling: Technique for Describing Future Climates. *Climate Change*, v. 60, p.217-242, 2003.
- MOORE, R.J.; CLARKE, R.T. A Distribution Function Approach to Rainfall-runoff Modeling. *Water Resources Research*, v. 17, n. 5, p. 1367-1382, 1981.
- PAIVA R.C.D.; COLLISCHONN W. Climate Change Impacts On River Quarai □ow. In: *Climate and Water Resources Modelling*, edited by: FUNG, C. F.; LOPEZ, A., and New, M., John Wiley&Sons. 2010, 200 pp
- RAMIREZ, J.; JARVIS, A. Disaggregation of Global Circulation Model Outputs Decision and Policy Analysis Working. *Paper Report* n. 2, Colombia, 2010, 13 p.
- SALAS-MÉLIA, D.F.; CHAUVIN, M.; DÉQUÉ, H.; DOUVILLE, J.F. GUEREMY, P.; MARQUET, S.; PLANTON, J.F.; ROYER; TYTECA, S. *Description and Validation of the CNRM-CM3 Global Coupled Model*, CNRM working note 103. 2005.
- SANTER, B.D.; WIGLEY, T.M.L.; SCHLESINGER, M.E.; MITCHELL, J.F.B. Developing Climate Scenarios from Equilibrium GCM Results. Max-Planck-Institut für Meteorologie *Report n. 47*, Hamburg, Germany, 1990, 29p.
- SCHMIDT, G.A., et al. Present Day Atmospheric Simulations Using GISS Model: Comparison to in-situ, Satellite And Reanalysis Data. *Journal of Climate*, v.19, p.153-192, 2005.
- SCINOCCA, J.F.; MCFARLANE, N.A.; LAZARE, M.; LI, J.; PLUMMER, D. The CCCMA Third Generation AGCM and its Extension into the Middle Atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v.8, p.7055-7074, 2008.
- SHUTTLEWORTH, W. J. *Evaporation In: Maidment, D. R. Handbook of hydrology* .New York : McGraw-Hill, 1993.
- TODINI, E. The ARNO rainfall runoff Model. *Journal of Hydrology*, v.175, p. 293-338, 1996.
- TUCCI, C.E.M. *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, 2005.
- WASHINGTON, W.M.; WEATHERLY, J.W.; MEEHL, G.A.; SEMTNER, A.J.JR.; BETTGE, T.W.; CRAIG, A.P.; STRAND, W.G.JR.; ARBLASTER, J.M.; WAYLAND, V.B.; JAMES, R.; ZHANG, Y. Parallel Climate Model (PCM) Control and Transient Simulations. *Climate Dynamics*, v. 16, p. 755-774, 2000.
- WIGLEY, T.M.L. *MAGICC/SCENGEN 4.1*: Technical Manual. National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, 2003a, 14pp.
- WIGLEY T.M.L. *MAGICC/SCENGEN 5.3*: User Manual (version 2). National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, 2008, 81 p.
- YU, Y.; ZHANG, X.; GUO, Y. Global Coupled Ocean-atmospheregeneral Circulation Models in LASG/IAP. *Advances in Atmospheric Sciences*, v. 21, p. 444-455, 2004.
- YUKIMOTO, S.; NODA, A.; KITO, A.; SUGI, M.; KITAMURA, Y.; HOSAKA, M.; SHIBATA, K.; MAEDA, S.; UCHIYAMA, T. The New Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2), - Model Climate and Variability. *Papers in Meteorology and Geophysics*, v. 51, p. 47-88, 2001.

Analysis Of The Impacts Of Climate Changes On The Rainfall And Streamflow Regimes In The Ibicuí River Basin

ABSTRACT

Climate changes may have a significant impact on the hydrological regime. In water resources, the main effect of such changes is seen in river streamflow. In this study, the impact of possible climate change scenarios on the water resources in the Basin of Ibicuí River, a left bank tributary of Uruguay River is evaluated. Flow sensitivity analyses

based on hypothetical changes in annual mean precipitation showed that the mean and high flows are more sensitive to changes in rainfall. The hydrologic model MGB-IPH was used to perform a hydrologic simulation of the basin. The simulated period is 1960 to 2005. Climate change scenarios for 2050 (a 30-year window focusing on 2050) were obtained by a MAGICC/SCENGEN scenario generator, considering the results of twenty Global Climate Models (GCMs) and three scenarios of greenhouse gas emissions. The results for all the models indicate increased temperature, however there are greater uncertainties about the rainfall variable, mainly concerning the magnitude of these variations. Variations of these predictions were also observed among the three climate change scenarios analyzed. The greatest uncertainties found involved precipitation. There is a great discrepancy between the magnitude of the modifications for precipitation, and, moreover, there is no concordance between the GCMs, as to whether this variable is going to increase or diminish in the future. The uncertainties related to projections of precipitation and temperature anomalies foreseen by the set of 20 GCMs were amplified when the impact of the climate changes on the streamflow regime was evaluated.

Keywords: climate changes, simulation of climate change scenarios