**Variabilidade e mudanças climáticas (P e T) na Bacia do rio Descoberto (DF), no período entre 1986 e 2080.**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal

Camila Corrêa da Silva – Universidade de Brasília

Brasília, 14 de outubro de 2021

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

# VARIABILIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS (P E T) NA BACIA DO RIO DESCOBERTO (DF), NO PERÍODO ENTRE 1986 E 2080.

Camila Corrêa Da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso

Apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal,

Como parte dos requisitos à obtenção do título

De bacharel em Engenharia Florestal

**Orientador:** Henrique Marinho Leite Chaves, Mestre e PhD

Brasília-DF

14 de outubro de 2021

Universidade de Brasília

Universidade de Brasília

**ANEXO FOLHA DE MENÇÃO TCC - CAMILA CORREA DA SILVA**

**Universidade de Brasília - UnB**
**Faculdade de Tecnologia - FT**
**Departamento de Engenharia Florestal – EFL**

**VARIABILIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS (P E T) NO RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO, NO PERÍODO ENTRE 1986 E 2080.**

Estudante: **Camila Correa da Silva**
Matrícula: **16/0115281**
Orientador: **Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves**

Menção: SS

Aprovada por:

**Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves**
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Orientador (EFL)

**Prof. Dr. Rafael Rodrigues da Franca**
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Geografia - GEA
Membro da Banca

**Prof. Dr. Antônio de Almeida Nobre Júnior**
FUP-Planaltina
Membro da Banca

Brasília, 26 de outubro de 2021.

Documento assinado eletronicamente por **Henrique Marinho Leite Chaves**, **Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Tecnologia**, em 26/10/2021, às 15:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.

Documento assinado eletronicamente por **Rafael Rodrigues da Franca**, **Coordenador(a) de Graduação Presencial Curso de Geografia**, em 03/11/2021, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.

Documento assinado eletronicamente por **Antonio de Almeida Nobre Junior**, **Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Planaltina**, em 04/11/2021, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.unb.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7293827** e o código CRC **321214F7**.

**Referência:** Processo nº 23106.091154/2021-52

SEI nº 7293827

**Ficha Catalográfica**

SILVA, CAMILA CORRÊA DA

Variabilidade e mudanças climáticas (P e T) na Bacia do rio Descoberto (DF), no período entre 1986 e 2080.

36p., 210 x 297 mm (EFL/FT/UnB, Engenharia Florestal, 2021)

Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal

| | | |
|---|---|---|
| 1. Mudanças Climáticas | 4. RCM | 7. Bacia do Descoberto |
| 2. Variabilidade Climática | 5. Precipitação | |
| 3. GCM | 6. Temperatura | |
| I. EFL/FT/UnB | II. Título (série) | |

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

SILVA, C. C. (2021). VARIABILIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS (P E T) NA BACIA DO RIO DESCOBERTO (DF), NO PERÍODO ENTRE 1986 E 2080. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 35 p.

**CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Camila Corrêa da Silva

TÍTULO: Variabilidade e mudanças climáticas (P e T) na Bacia do rio Descoberto (DF), no período entre 1986 e 2080.

GRAU: Engenheiro Florestal ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

_____

Camila Corrêa da Silva

camilacsilva@live.com

# AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer por todo o aprendizado que esses cinco anos na Universidade de Brasília me proporcionaram. Muitos obstáculos foram superados, e com certeza sem as pessoas que amo e acreditam em mim eu não teria conseguido. Os primeiros agradecimentos vão para a minha família, em especial aos meus pais, que amo infinitamente, e sempre me apoiaram e me incentivaram a buscar a educação como o alicerce para o meu futuro. Muito obrigada, mãe e pai, Mozarina Socorro Corrêa da Silva e Alvaro Alves da Silva Júnior, por todo o esforço que dispuseram na minha educação e suporte que me dão para conquistar os meus sonhos. Todas as minhas realizações são consequência da minha criação e dos da sorte de ter pais maravilhosos

Agradeço ao meu orientador, Henrique Chaves, que me guiou nesse projeto e espero que seja de muita ajuda no futuro. Muito obrigada pela paciência, pelas reuniões, disponibilidade e orientações de estudo. Sem a sua ajuda esse trabalho não seria possível, e o seu incentivo me fez sempre procurar entregar o meu melhor.

Aos meus amigos de curso, sou muito grata a todos os momentos de dificuldade, que nos uniram e com eles conseguimos superar muitas dificuldades. Agradeço à Mayeri Calazans, minha grande amiga que a Engenharia Florestal me deu e foi minha companheira trabalhos e estudos durante todos esses anos. Sua ajuda foi fundamental nos momentos difíceis e sua amizade estará guardada no peito eternamente.

Muito obrigada Kesya Rodrigues por sempre ter esse humor que me faz cair na gargalhada quando estou em dias ruins e por ser minha parceira e amiga na UnB e fora dela, espero que nossa amizade perdure por muitos anos.

Muito obrigada ao meu amigo Flávio Tarraf, que me ajudou a revisar esse trabalho e foi um grande amigo durante o curso.

Aos meus amigos de curso e jornada: Camila Alencar, Breno Luiz e Camille Pinheiro, muito obrigada por esses cinco anos de amizade, companheirismo, risadas. Vocês foram os meus primeiros amigos que fiz ao entrar e me lembro com muito carinho de todos os momentos que passamos juntos e espero que ainda possamos passar.

# RESUMO

O aquecimento global consiste no aquecimento da Terra por ação antrópica. As emissões de gases do efeito estufa, em especial o $CO_2$, é uma das causas da variabilidade e das mudanças climáticas. Com o aumento da temperatura, existem novos padrões de precipitação, seca e a segurança hídrica de muitas bacias abastecedoras de água poderá ser afetada. Sendo assim, são necessários estudos de previsão climática para detectar novos padrões de temperatura e precipitação, e como eles afetam as vazões das bacias. Este estudo utilizou dados de temperatura e precipitação anual prognosticados por um *ensemble* de quatro modelos GCM (BESM, CanESM2, HadGEM2 e MIROC5), regionalizados em grade de 20km pelo modelo Eta para a Bacia do Descoberto – DF, nos cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5 do IPCC, nos entre 1986 e 2080. Depois de corrigidos os vieses nos dados de precipitação, as médias de P e T anuais dos períodos 2031-2050, e 2061-2080 foram comparadas com aquelas do período 1986-2005, tomado como a linha de base. Observou-se que houve um aumento significativo na temperatura e de diminuição da precipitação em todos os períodos e cenários de emissões, em relação ao período histórico. No cenário RCP 4.5, haveria um aumento na temperatura média de 1,9 ºC e 2,7 ºC nos períodos 2031-2050 e 2061-2080 em relação a série histórica, respectivamente. No cenário RCP 8.5, o aumento em T seria de 2,21 ºC e 4,4 ºC, respectivamente. As previsões de precipitação para a bacia é diminuíram ao passar do tempo. No caso da precipitação no cenário RCP 4.5, haveria uma redução de 26,62% e 26,59%, para os períodos 2031-2050 e 2061-2080, respectivamente. No cenário RCP 8.5, a redução esperada seria de 30,08% e 51,22%, para os períodos 2031-2050 e 2061-2080, respectivamente. Os aumentos de T e as reduções de P prognosticadas para a bacia deverão afetar as vazões afluentes ao reservatório do Descoberto, podendo impactar de forma significativa sua segurança hídrica.

Palavras-Chave: Mudanças Climáticas, Variabilidade Climática, GCM, RCM, Precipitação, Temperatura, Bacia do Descoberto.

# ABSTRACT

Global warming is the warming of the Earth by human action. Emissions of greenhouse gases, especially $CO_2$, are one of the causes of climate variability and change. As the temperature increases, there are new patterns of precipitation, drought and the water security of many water supply basins could be affected. Therefore, climate forecasting studies are needed to detect new patterns of temperature and precipitation, and how they affect watershed flows. This study used temperature and annual precipitation data predicted by an ensemble of four GCM models (BESM, CanESM2, HadGEM2 and MIROC5), regionalized in a 20km grid by the Eta model for the Descoberto Basin - DF, in the RCP emission scenarios4.5 and 8.5 from IPCC, between 1986 and 2080. After correcting the biases in the precipitation data, the annual averages of P and T for the periods 2031-2050, and 2061-2080 were compared with the ones from the period 1986-2005, taken as the baseline. It was observed that there was a significant increase in temperature and a decrease in precipitation in all periods and emission scenarios, in relation to the historical period. In the RCP 4.5 scenario, there would be an increase in the average temperature of 1.9 ºC and 2.7 ºC in the periods 2031-2050 and 2061-2080 in comparison to the historical series, respectively. In scenario RCP 8.5, the increase in T would be 2.21 °C and 4.4 °C, respectively. Precipitation forecasts for the basin are diminished over time. In the case of precipitation in the RCP 4.5 scenario, there would be a reduction of 26.62% and 26.59%, for the periods 2031-2050 and 2061-2080, respectively. In the RCP 8.5 scenario, the expected reduction would be 30.08% and 51.22%, for the periods 2031-2050 and 2061-2080, respectively. The predicted increases in T and decreases in P for the basin will affect the inflows affluent to the Descoberto reservoir, which could significantly impact its water security.

Key Words: Climate Change, Climate Variability, GCM, RCM, Precipitation, Temperature, The Descoberto Basin.

# SUMÁRIO

**1. INTRODUÇÃO.....12**

1.1 Variabilidade e Mudanças Climáticas.....12

1.2 Efeitos das Mudanças Climáticas no ciclo hidrológico e implicações para a Segurança Hídrica.....14

1.3 Global Climate Models (GCMs) e Regional Climate Models (RCMs).....16

1.4 Bacia do Descoberto – Distrito Federal. .....18

**2. MATERIAL E MÉTODOS.....19**

2.1 Área de Estudo.....19

2.2 Aquisição de Dados.....21

2.2.1 Dados Históricos Observados... .....21

2.2.2 Dados dos modelos RCM: Histórico, 2031-2050 e 2061-2080.....21

2.3 Verificação e Correção de Viés das projeções P e T dos Modelos.....23

2.4 Teste Estatístico das Médias de P e T (Históricas e Futuras) .....23

**3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....24**

3.1 TEMPERATURA.....24

3.2 PRECIPITAÇÃO... .....26

3.3. Prováveis impactos hidrológicos das variações de P e T na Bacia.....28

**4. CONCLUSÃO.....29**

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....29**

**APÊNDICE.....35**

**LISTA DE FUGURAS**

Figura 1 - Bacia do Descoberto – DF.....20

Figura 2 - Modelos RCM EtaBESM, EtaCanESM2, EtaHadGEM2 e EtaMIROC5 recortados para a Bacia do Descoberto, Distrito Federal.....22

Figura 3 – Plotagem de temperatura (ºC) nos períodos de 1986 – 2080, nos cenários RCP 4.5 e 8.5.....25

4 - Plotagem de precipitação (mm/ano) nos períodos de 1986 – 2080, nos cenários RCP 4.5 e 8.5.....28

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Resultados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para temperatura, onde: * = $p \leq 0,05$, **= $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$.....24

Tabela 2 - Resultados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para precipitação, onde: * = $p \leq 0,05$, **= $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$.....27

**LISTA DE SIGLAS**

| | |
|---|---|
| AR5 | Fifth Assessment Report |
| AR6 | Sixth Assessment Report |
| BESM | Brazilian Earth System Model |
| CanESM2 | Canadian Earth System Model |
| CMIP5 | The fifth Coupled Model Intercomparison Project |
| EE | Efeito Estufa |
| GCM | Global Climate Models |
| GEE | Gases do Efeito Estufa |
| HADGEM2-ES | Hadley Centre Environmental Model |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| MIROC5 | Model for Interdisciplinary Reserch on Climate, versão 5 |
| NPP | Natural Primary Prodution |
| RA | Região Administrativa |
| RCM | Regional Climate Models |
| RCP | Representative Concentration Pathways |
| SRES | Special Report on Emissions Scenarios |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Variabilidade e Mudanças Climáticas

O Clima é extremamente sensível a diversos fatores internos e externos, o que pode levar a oscilações no decorrer do tempo. A variabilidade climática são as variações no clima que duram mais que eventos isolados, mudando algumas características do clima. Já as mudanças climáticas, que são muitas vezes associadas ao aquecimento global causado pelo homem, consistem em mudanças no clima na escala de tempo maior que 10 anos (IPCC, 2018).

Variabilidades internas do clima incluem ciclos e oscilações como o El Niño e La Niña, que afetam o clima de todo o mundo, em função das oscilações da temperatura do Oceano Pacífico Equatorial e de mudanças nas correntes marítimas (Liu,2012). Variabilidades externas são a entrada de energia do Sol, decaimento de compostos radioativos, vulcanismo e as emissões de gases do efeito estufa (Thenberth et Al, 2009; Miles et |Al., 2004; Houghton, 2005).

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera se enquadram como o principal causador das mudanças climáticas da atualidade, sendo um consenso de pelo menos 97% da comunidade científica que se dedica a estudar o clima (Cook et Al., 2018). Está sendo notado uma tendência de aumento de temperatura e precipitação (IPCCb, 2014). Estudos feitos apontam uma tendência de aumento de temperatura e diminuição da precipitação no Brasil (Campos e Chaves, 2020; Pinto et al., 2003).

O aquecimento global consiste no aquecimento da Terra por conta principalmente da queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão, gás natural) e da conversão de florestas em pastagens e monoculturas, o que tem levado a uma maior concentração de gás carbônico e outros GEE (Houghton, 2005). A consequência desse aumento de GEE é o aquecimento global, traduzindo-se por aumento de temperatura e variação nos padrões de precipitação, gerando uma maior frequência e intensidade de eventos extremos de clima (IPCCa, 2014).

O efeito estufa (EE) se dá pela absorção de parte da emissão solar na terra na forma de infravermelho de onda longa, sendo que a outra parte é refletida para fora da atmosfera (Raval & Ramanathan, 1989). O EE é extremamente importante para a

manutenção da vida na Terra, até porque, sem ele a Terra seria tão gelada que não teria como existir a biosfera como conhecemos, podendo chegar -6ºC de temperatura média (Houghton, 2005).

Entretanto, esse efeito está sendo intensificado pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), incluindo o gás carbônico, gás metano, óxido nitroso e CFCs (Raval & Ramanathan, 1989; Houghton, 2005). Os CFFs apesar de não terem muito potencial de aquecimento, les são nocivos a camada de ozônio.

A industrialização que começou com a Revolução Industrial e continua até os dias de hoje causou o aumento de emissão de GEE na atmosfera. Estima-se que desde a revolução industrial até o início dos anos 2000, a queima de combustíveis fósseis foi de 600 Gt na forma de gás carbônico ($CO_2$) (Houghton, 2005).

Ceaser et al. (2013) utilizaram o HadGEM 2 para prever as emissões de gases de efeito estufa até o ano de 2300, utilizando diferentes projeções de emissão do RCP 2.6 (mitigação da emissão dos GEEs), 4.5, 6.0 (cenários tendenciais) e 8.5 (cenário pessimista). Neste estudo, a concentração de CO2 se estabilizaria no ano de 2250 abaixo de 2000 ppm no cenário RCP 8.5, enquanto o cenário mais otimista RCP 2.6 há uma queda de CO2 atmosférico e se estabiliza em 2050.

Segundo o relatório AR-6 IPCC (IPCC, 2021), no ano de 2019 a concentração atmosférica de CO2 é a maior em 2 milhões de anos, e o aumento percentual em relação ao ano de 1750 é de 47%. O gás Metano (CH4) e Óxido Nitroso (N2O) também aumentaram 156% e 23%, respectivamente, em relação ao ano de 1750 (IPCC, 2021).

Além das emissões de GEE combustíveis fósseis, a agricultura também apresenta um papel importante nas mudanças climáticas. É estimado que a agricultura sozinha representa 20% das emissões de gases de efeito estufa no planeta (Aydinalp & Cresser, 2008). No Brasil, a agricultura e a pecuária são as causas principais do desmatamento do Cerrado, sendo que de 2001 a 2017, estima-se que tenham sido desmatados 272.200 km² (Maurano et Al., 2019). Como consequência do desmatamento, há aumento de cerca de 1ºC na temperatura média anual (Hoffmann & Jackson, 2000), e 9% na redução da precipitação (Campos & Chaves, 2020).

A preocupação com gases nocivos ao meio ambiente começou a ter uma atenção maior nos anos 1970, quando ambientalistas declararam uma preocupação com o industrialismo e o crescimento econômico. Os protocolos de Montreal (1987) e de Kyoto

(1997) foram feitos para incentivar a queda de emissão de CFCs e gases do efeito estufa, respectivamente. O Brasil como país signatário do Protocolo de Montreal, recebeu assistência técnico-financeira e criou leis, portarias e resoluções para diminuir e extinguir a produção e comercialização de produtos com CFCs. Já o Protocolo de Kyoto compromete o Brasil de o manter atualizado em relação às emissões de GEE, através de um Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases do Efeito Estufa (Silva, 2009).

No Acordo de Paris, em 2015, que foi definido na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, visou diminuir os efeitos das mudanças climáticas e diminuição dos GEEs, tendo como meta a manutenção do aumento da temperatura em até 2ºC.

Apesar de fortes evidências dos efeitos climáticos relativos ao aumento dos GEE (IPCC, 2021), ainda existem incertezas em relação a magnitude do aquecimento global e todas as áreas que serão afetadas, por conta da complexidade do sistema climático e das várias variáveis que o fazem parte dele (Heal & Kristrom, 2002).

Uma das ferramentas mais úteis nesse momento para avaliar as mudanças climáticas globais são os *global climate models*-GCM (IPCC, 2014a). Os modelos GCM ainda apresentam viés importantes em relação a dados históricos observados, em função da simplificação de processos atmosféricos, incerteza da magnitude das retroalimentações (*feedbacks)* e de representação da superfície terrestre (Deser, et al., 2010; IPCC, 2014a).

Além disso, os GCMs apresentam uma grande dimensão de suas células (250-600 km) que dificulta a utilização de suas projeções em estudos regionais e locais, como bacias hidrográficas (Kundzewicz, 2018). Para tanto, os dados dos GCMs podem ser regionalizados para escalas maiores (5-50 km) através de *regional climate models*-RCMs, de forma determinística ou estatística (Chou et Al., 2014a).

## 1.2 Efeitos das Mudanças Climáticas no ciclo hidrológico e implicações para a Segurança Hídrica

O Ciclo Hidrológico consiste em um sistema fechado em que há trocas de estados físicos da água (líquido, sólido e gasoso) entre a superfície e a atmosfera terrestre. Toda

a água que se encontra na Terra em suas mais variáveis formas está sujeita a esse ciclo, influenciado pela temperatura, tipo de solo, altitude, topografia, geologia etc (Shiklomanov, 2009).

A temperatura é uma variável extremamente importante para esse fenômeno, e o aquecimento global faz com que o ciclo hidrológico se intensifique e traga novos padrões, como: a diminuição de fluxos de massa convectivas, aumento de transporte horizontal de humidade, associado com o aumento de precipitação e evapotranspiração. Essas alterações serão sentidas de formas diferentes ao redor do globo (Held & Soden, 2006).

O aumento da temperatura aumenta a evapotranspiração, e consequentemente, contribuindo para um incremento da precipitação. A partir de 1977, houve um aumento observado em precipitação nas altitudes ao norte (30ºN), e uma queda observada entre as latitudes 30ºN e 10ºS (Kundzewicz, 2008).

Além dos efeitos danosos do aumento da temperatura, a variação nos padrões de precipitação também trará riscos e incertezas para os países. Em baixas latitudes, como os trópicos, as secas serão mais intensas, resultando numa diminuição na segurança hídrica das bacias (Kundzewicz, 2008; Djebou & Singh, 2016).

O AR-6 do IPCC (IPCC, 2021) dedica o capítulo 8 às mudanças nos ciclos hídricos. Segundo os autores, é evidente que a partir da metade do século 20, e com o aquecimento global, houve um aumento da evapotranspiração e umidade atmosférica, e intensidade de precipitação, influenciou também padrões de aridez no globo. Em baixas latitudes é previsto uma queda de precipitação, enquanto em altas latitudes haverá um aumento (IPCC, 2021).

A qualidade da água também irá ser prejudicada por conta do aquecimento global. O derretimento das calotas polares está aumentando o nível dos mares que se misturam com as águas dos rios, salinizando a água. Outro problema é que altas temperaturas podem aumentar a ocorrência de bactérias, cianobactérias e algas nos corpos d'água, diminuição da concentração de oxigênio e pode haver uma eutrofização de bacias que tiverem uma diminuição de vazão e que continuam recebendo grande quantidade de esgoto e nutrientes de culturas agrícolas próximas (Whitehead et Al., 2009; Michalak, 2016).

A agricultura será afetada de forma negativa pelas mudanças climáticas, principalmente por países em desenvolvimento, como o Brasil. Populações mais

vulneráveis e que se sustentam da agricultura familiar, podem ser as mais afetadas (Aydinalp & Cresser, 2008). A Embrapa ao fazer simulações de aumento de progressivo de temperatura (1 ºC, 3º e 5,8ºC) e acréscimo de 15% de precipitação para todo o Brasil percebeu uma perda de até 1,2 milhões km² de área adequada para a produção de soja (Pellegrino et Al., 2007).

As mudanças climáticas e as ofertas de água também afetarão de forma desigual países em situações socioeconômicas distintas. Arnell (2004) usou dados do SRES (Special Report on Emissions Scenarios) para prever a quantidade de pessoas em estresse hídrico nos anos de 2025 e 2050. A previsão é de que na América do Sul possa chegar a 14 a 33 milhões de pessoas em estresse hídrico em 2025, e em 2055 esse número pode chegar a 70 milhões.

As mudanças climáticas não são a única preocupação em relação ao abastecimento de água, como também o uso da água. A irrigação das culturas agrícolas é o principal uso da água e é uma variável importante e que traz incerteza nos modelos hidrológicos (Liu et Al., 2017). Portanto, o assunto deve ser tratado de forma multidisciplinar para que todas as vertentes que afetam e são afetadas pelas mudanças climáticas sejam estudas e trabalhadas de maneira a mitigar os seus efeitos.

## 1.3 Global Climate Models (GCMs) e Regional Climate Models (RCMs)

Para prognosticar as mudanças climáticas em diferentes regiões do globo, sobretudo as alterações na temperatura e precipitação, a curto e longo prazos, são utilizados Global Climate Models (GCMs). Esses modelos possuem vários compartimentos, tais como atmosfera, oceanos, cobertura do solo, gelo oceânico e biosfera.

As escalas dos GCM podem chegar a células muito grandes (250 a 600 km), o que é uma desvantagem por ter uma baixa representação de uso do solo, topografia e relação terra-oceano, por exemplo. Para aumentar a resolução espacial e acessar áreas menores, é feito uma “regionalização” ou *downscalling*, através Regional Climate Models (RCMs). Desta forma, é possível regionalizar os dados climáticos em células de 20km x 20km e

avaliar os efeitos do aumento de GEE de diferentes cenários de emissões de GEE nas variáveis climáticas em nível regional (Chou et Al., 2014a; Chou et Al., 2011).

O modelo Eta foi o utilizado nesse estudo para se fazer o downscaling/regionalização a partir das projeções geradas pelos modelos BESM, CanESM2, HADGEM2 E MIROC5. O modelo Eta é utilizado pelo INPE-CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) desde 1996 para se fazer previsões de clima para a América do Sul e foi adaptado para estudos de mudanças climáticas com cenários de diferentes níveos de concentração de CO2 (Chou et Al., 2011; Mesinger et Al., 2012).

Esse modelo utiliza a coordenada vertical Eta, que por ser horizontal nas montanhas, se torna apropriada para regiões com topografias acidentadas. O último melhoramento do modelo fluxos inclinados em montanhas íngremes, os processos sazonais de cobertura da terra são feitos pelo NOAH e distinção de 12 tipos de vegetação e 9 de solo (Mesinger et Al., 2012).

O IPCC propôs distintos cenários de emissões de gases estufa, denominados de RCP (Representative Concentration Pathways). São 4 cenários previstos: o 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, sendo o primeiro o cenário mais otimista de emissão de CO2 e o último, o mais danoso e de maior emissão de CO2 (IPCCb, 2014). Essas previsões concentração de CO2 são as utilizadas nos modelos utilizados nesse trabalho (BESM, CanESM-2, HADGEM-ES e MIROC5) para predição de temperatura e precipitação.

O modelo BESM (Brazilian Earth System Model) é o modelo brasileiro desenvolvido pelo INPE-CPTEC. Ele utiliza o modelo Simplified Biosphere Model (SSiB) para a superfície terrestre (que reconhece 12 tipos de vegetação), códigos de radiação de ondas curtas e longas e interação da radiação com as nuvens. O modelo de Oceano utilizado é o MOM4p1. A resolução é feita em 1º na direção longitudinal e a na direção latitudinal é ¼º na região tropical (10ºS-10ºN) (Nobre et Al., 2013).

O modelo CanESM2 (Canadian Earth System Model) é um GCM que participa do CMIP5 (The fifth Coupled Model Intercomparison Project), tendo uma resolução espacial de2.8º. O componente de superfície terrestre usado é o Canadian Terrestrial Ecosystem Model (CTEM), que possui um dinamismo na vegetação, incluindo fotossíntese, respiração autotrófica e heterotrófica, mudanças no uso de terra e resposta das plantas a concentração de CO2 na atmosfera (Arora & Boer, 2005).

O modelo HADGEM2-ES (Hadley Centre Environmental Model), por sua vez, apresenta componentes de ciclo de carbono (terrestres e oceânicos), química atmosférica e de aerossol. A vegetação é simulada pelo NPP, que reconhece os 5 tipos de plantas: folhosa, coníferas, C3, C4, grama e arbusto. O modelo possui a resolução horizontal é de 1,25 graus de latitude e 1,875 graus de longitude, o que equivale a uma célula de 208km x 139km no Equador. (Martin et Al., 2011).

O modelo MIROC5 (Model for Interdisciplinary Reserch on Climate, versão 5) é um modelo de GCM japonês, desenvolvido na Universidade de Tóquio que utiliza o modelo SPRINTARS para previsão de aerossóis, sulfato, poeira etc., sendo o modelo superfície terrestre o MATSIRO. A resolução atmosférica é a T85, o que compreende 159 km na horizontal e 40 níveis atmosféricos na vertical. (Watanabe, 2010).

Apesar desses modelos apresentarem diversos componentes para a previsão das alterações no clima, eles apresentam incertezas quanto a magnitudes das mudanças climáticas, apresentando alguns vieses em relação aos dados observados em estações meteorológicas (Costa & Mendes, 2019).

Chou et Al. (2014a) observou que o RCM EtaMIROC5 tende a subestimar temperaturas e superestimar precipitações na América do Sul em relação aos dados observados de 1961-1990. Por outro lado, o modelo EtaBESM superestima temperaturas e subestima a precipitação. Segundo aqueles autores, o melhor ajuste entre os dados de modelos GCM regionalizados e os observados foi obtido com *ensemble* de modelos, isto é, utilizando as médias dos modelos.

## 1.4 Bacia do Descoberto – Distrito Federal

A Barragem do Descoberto foi inaugurada em 1974, dando origem a um lago de 17 km², às margens da BR-070. Seu uso dominante é o abastecimento da população do Distrito Federal (65% da população).

Em um estudo da ADASA-UNESCO (2012) em relação a disponibilidade dos recursos hídricos na Bacia do Descoberto foi possível observar uma tendência de queda significativa nas vazões de base de todas as sub-bacias. Entretanto, a demanda de água continua crescendo a partir de 1986 (Chaves & Lorena, 2019).

Até o ano de 2016, a o reservatório do Descoberto tinha 100% de confiabilidade e 0% de falha observada. Mas no ano seguinte, 2017, a bacia sofreu uma falha operacional, em função de uma série de anos com precipitação abaixo da média, que obrigou aos gestores hídricos a instalar um racionamento de água. Após esse evento, a confiabilidade da Bacia caiu para 96,87% e a probabilidade de falha subiu para 3,13%.

A causa da falha do reservatório foi a persistência de baixas vazões por 6 anos, conhecida como fenômeno de Hurst (Chaves & Lorena, 2019).

As estratégias de mitigação/adaptação para fazer frente às ameaças de novos racionamentos na bacia devem levar em conta as séries históricas hidrológicas, e também, as projeções climáticas futuras. Chaves e Santos (2020) utilizaram projeções de temperatura e precipitação para prever a vazão na sub-bacia do Rodeador, que pertence a bacia Hidrográfica do Descoberto, nos anos de 2040 e 2070. Nesse estudo, foi observado que existe uma queda na vazão, acompanhando a diminuição da precipitação e aumento da temperatura.

Considerando o exposto, o objetivo desse trabalho foi o de avaliar o impacto das mudanças climáticas na temperatura e precipitação na bacia do rio Descoberto entre 2031 e 2080, considerando distintos cenários de emissões de GEE.

# 2. MATERIAL E MÉTODOS

## 2.1 Área de Estudo

A área de estudo é a Bacia do Rio Descoberto (Figura 1), que tem como exultório a Barragem do Descoberto. A bacia tem uma área de drenagem de 452 km², estando 30 % no Estado do Goiás, nos municípios de Águas Lindas e Padre Bernardo, e os outros 70% se encontram no Distrito Federal, abrangendo as Regiões Administrativas (RA) de Taguatinga (RA III), Brazlândia (RA IV), Ceilândia (RA IX). A Barragem do Descoberto está localizada nas proximidades da BR-070.

O uso e a ocupação do solo na região incluem áreas urbanas, com diferentes densidades de ocupação, solos expostos, chácaras de hortifrutigranjeiros e cobertura vegetal nativa. Grande parte da ocupação do solo são de áreas preservadas e Cerrado, Agricultura e Oleicultura e Campo Limpo.

Áreas Urbanas de alta e média densidade representam 1.645,5 ha e 316,9 ha, respectivamente (ADASA-UNESCO, 2018). O alto percentual de área preservada e agricultura se deve a criação da APA Bacia do Rio Descoberto (Decreto 88.940 de 07 de novembro de 1983) e ao Projeto Integrado de Colonização Alexandre Gusmão (PIGAG), implantado pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária.

A classificação climática segundo Koppen-Geiger para o Centro-Oeste brasileiro é a clima tropical úmido (Aw). Ele é caracterizado por uma estação chuvosa no verão e estação seca no inverno, com uma média anual de chuva de 1.400 mm e a média anual de temperatura de 20,8ºC. O período chuvoso na região Centro-Oeste decorre do transporte de umidade da região norte do país, de frentes frias da região sul e sudeste e processos convectivos locais (ADASA-ECOPLEN, 2012).

As normais climatológicas de 1961-1990 disponibilizadas pela ADASA-UNESCO (2018) mostram que para a Bacia do Rio Descoberto, os meses de Maio a Agosto possuem uma precipitação menor que 50 mm ao mês, caracterizando a estação seca. E em relação a temperatura do ar, os meses de temperatura média mais baixas são junho e julho e os meses de temperatura mais altas são setembro e outubro.

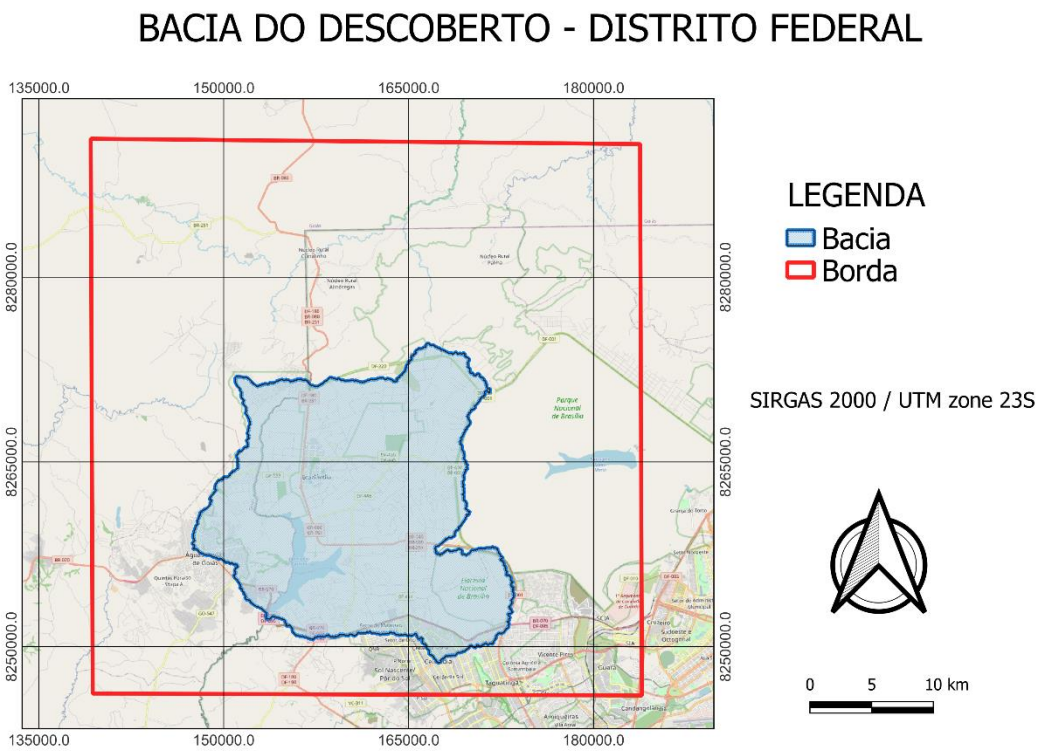



Figura 1 – Bacia do Descoberto – DF

## 2.2 Aquisição de Dados

### 2.2.1 Dados Históricos Observados

Os dados históricos observados de precipitação e temperatura média anual no da bacia, no período 1986-2005 foram obtidos de estações climatológicas situadas na Bacia do Descoberto, e foram os mesmos utilizados no estudo de Chaves & Lorena (2020). Esses dados foram utilizados como Linha de Base do estudo, e para fazer uma correção do viés dos dados históricos de precipitação média anual do *ensemble* dos modelos RCMs EtaBESM, EtaCanESM2, EtaHadGEM2, e EtaMIROC5, no período histórico.

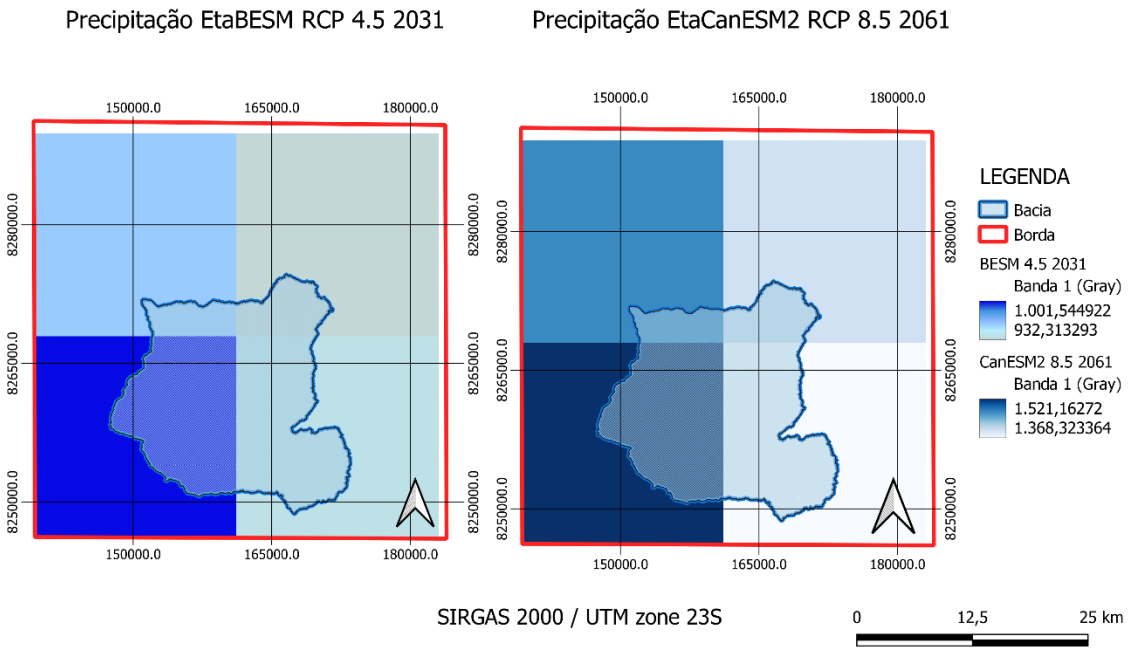
### 2.2.2 Dados dos modelos RCM: Histórico, 2031-2050 e 2061-2080

Os dados de precipitação P e temperatura T média anual, dos quatro modelos EtaBESM, EtaCanESM2, EtaHadGEM2 e EtaMIROC5 nos períodos de 2005-1986, 2031-2050 (RCP 4.5 e 8.5) e 2061-2080 (RCP 4.5 e 8.5) foram obtidos de uma base de dados da SEMA-DF (2020), os quais foram gerados pelo CPTEC-INPE.

A resolução espacial dos quatro modelos RCM acima é de 20 x 20 km, sendo que quatro células foram usadas para cobrir toda a bacia do rio Descoberto (Figura 2).

Cada arquivo raster de P e T relativo a cada ano, modelo, e cenário de emissões foi recortado no ambiente SIG numa janela de 2 x 2 (abaixo), resultando em 800 projeções de P e T. Em cada ano, modelo e cenário RCP foram obtidos valores médios, mínimo, máximo e desvio-padrão foram obtidos para cada um.

Depois de recortados os dados de P e T médios anuais para os quatro modelos RCM utilizados nos diferentes períodos e cenários de emissões, um *ensemble* (média) foi feito, utilizando-se a média aritmética dos valores médios de P e T dos quatro modelos, em cada ano e cenário de emissões, de forma a se reduzir o viés de apenas um modelo (Chou et Al., 2014a).



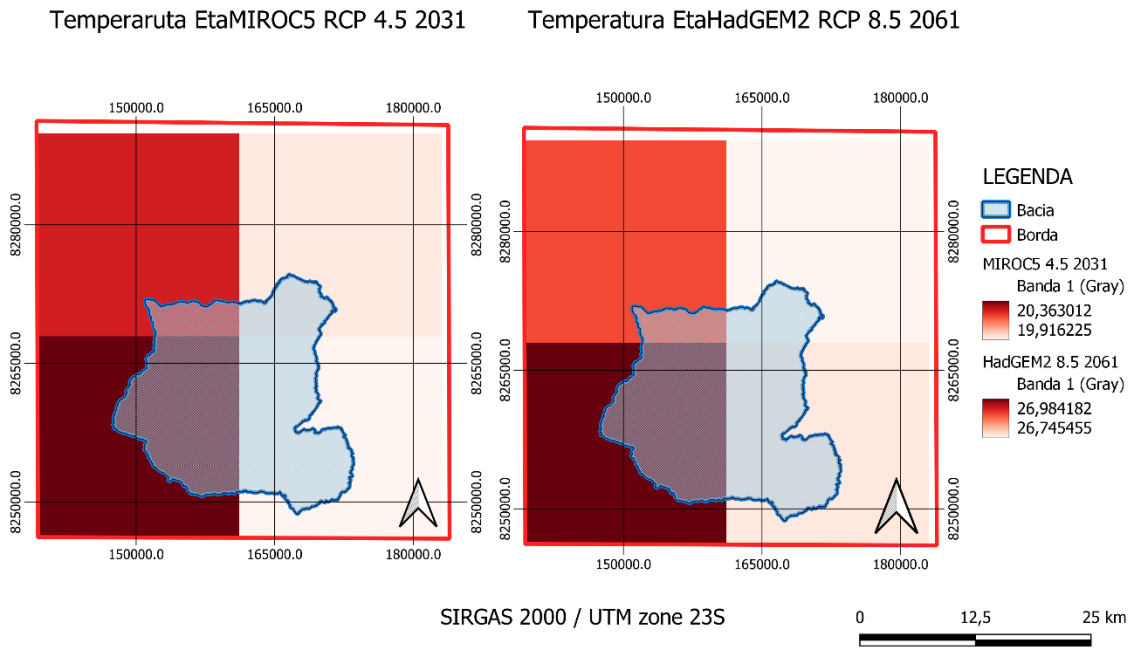




Figura 2 - Modelos RCM EtaBESM, EtaCanESM2, EtaHadGEM2 e EtaMIROC5 recortados para a Bacia do Descoberto, Distrito Federal

## 2.3 Verificação e Correção de Viés das projeções P e T dos Modelos

Por conta das incertezas associadas aos modelos RCM/GCM, os valores das projeções de P e T anuais dos seus *ensembles*, no período 1986-2005 foram comparados com dados observados da bacia, e ajustes paramétricos foram feitos nos dados de P anuais (Gudmundsson et al. 2012):

$$\hat{P} = a + b\ Pm$$

Equação 1

Onde: $\hat{P}$ é a estimativa corrigida, a e b são constantes de calibração e Pm é o *ensemble* dos quatro modelos para cada ano.

Os valores de P corrigidos com a equação 1 foram então aplicados aos valores de P históricos e futuros do *ensemble* dos quatro modelos, de forma as se corrigir o viés em P (média e variância), supondo que os valores futuros seguiriam as tendências dos valores históricos. No caso de T, como as projeções históricas foram muito próximas, em termos de média e desvio padrão, aos valores observados, não foi necessária a correção de viés.

## 2.4 Teste Estatístico das Médias de P e T (Históricas e Futuras)

O teste de Mann-Whitney-Wilcoxon (Teste U) foi utilizado para indicar se existe ou não diferença significativa entre as séries de dados de precipitação e temperatura históricos (linha de base) e os futuros, para os dois períodos (2031-2050 e 2061-2080), e os dois cenários de emissão (RCP 4.5 e 8.5). O teste de Mann-Whitney-Wilcoxon (Mann & Whitney, 1947) é um método não-paramétrico, que compara um par de amostras independentes, não requerendo normalidade nas distribuições. O teste parte do pressuposto de que não há diferença significativa entre as amostras (H0), O teste de Mann-Whitney-Wilcoxon foi realizado com o pacote estatístico ActionStat (V 3.2).

# 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 3.1 TEMPERATURA

A Figura 3 apresenta os valores de T média anual dos diferentes períodos e cenários das projeções dos *ensembles* dos quatro modelos. A Tabela 1, por sua vez, mostra o resultado do teste de WMW (teste U) entre as médias das projeções futuras de T e os valores históricos.

| Cenário | Período | T (ºC) | Aumento em relação ao Histórico | CV (T) |
|---|---|---|---|---|
| **HISTÓRICO** | 1986-2005 | 20,9 | - | 0,01 |
| **4.5** | 2031-2050 | 22,8 *** | 1,9 ºC | 0,01 |
| | 2061-2080 | 23,6 *** | 2,7 ºC | 0,01 |
| **8.5** | 2031-2050 | 23,2*** | 2,3 ºC | 0,02 |
| | 2061-2080 | 25,3*** | 4,4 ºC | 0,02 |

Tabela 1 – Resultados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para temperatura, onde: * =$p \leq 0,05$, **= $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$.

De acordo com a Tabela 1 houve um aumento significativo ($p < 0,01$) entre a temperatura média histórica e aquelas nas projeções nos cenários futuros nos dois períodos estudados. As diferenças entre os dados históricos variaram de 2,7 ºC para o cenário RCP 4.5 e de 4,4 ºC para o cenário RCP 8.5 até 2080.

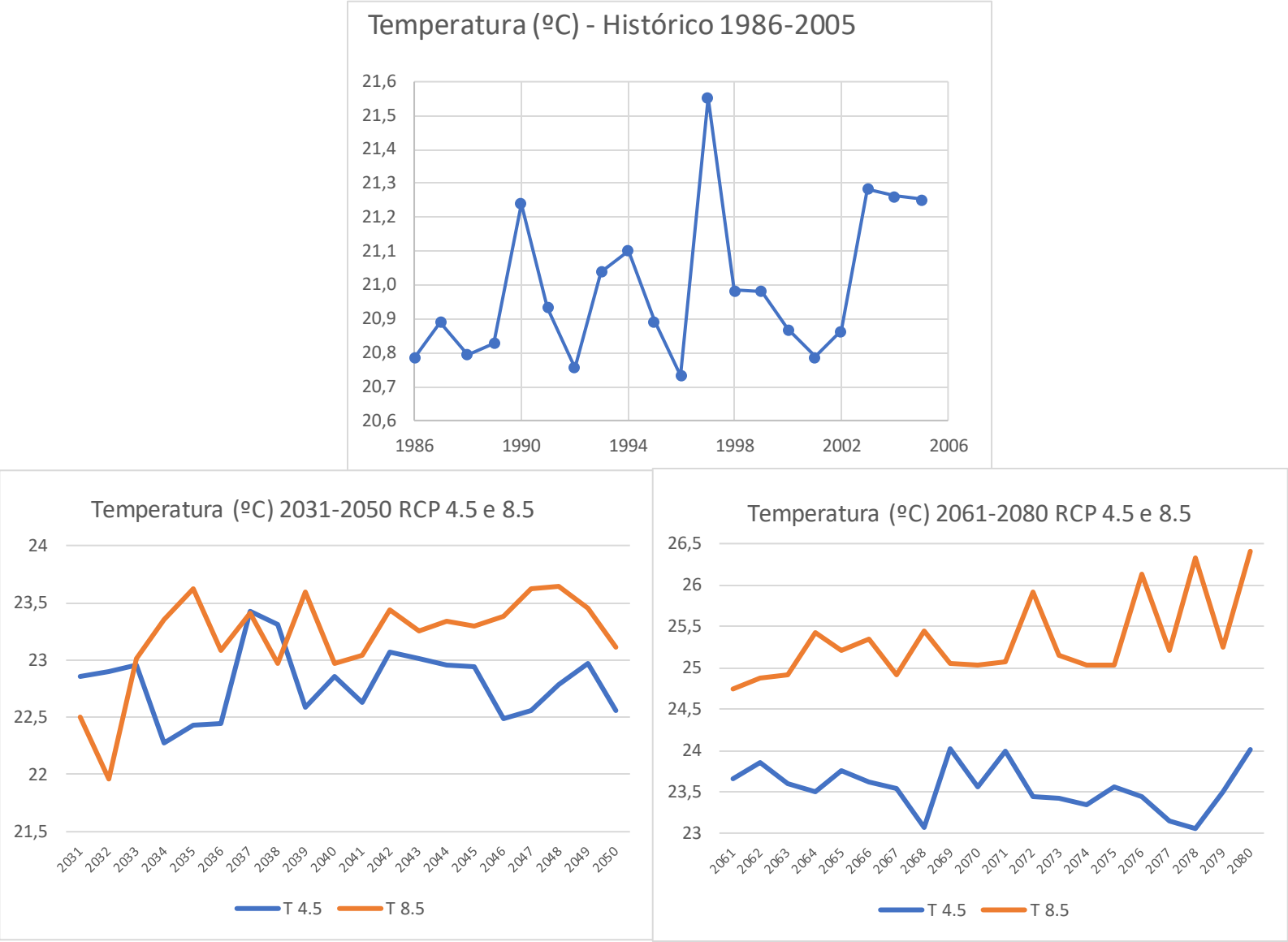



Figura 3 – Plotagem de temperatura (ºC) nos períodos de 1986 – 2080, nos cenários RCP 4.5 e 8.5.

Os gráficos (Figura 3) mostram as temperaturas médias anuais coletadas pelo *ensemble* dos quatro modelos nos períodos Histórico, 2031-2050 e 2061-2080 nos dois cenários RCP 4.5 e 8.5. É possível perceber que, nos dois períodos, o cenário RCP 8.5 apresenta mais altas temperaturas que o cenário RCP 4.5. De 2061-2080, o cenário RCP 8.5 é um 1ºC acima do RCP 4.5 no mesmo período.

O aumento de temperatura está sendo observado em outros estudos. No Centro-oeste, existe uma tendência significativa positiva de aumento das temperaturas mínimas e máximas, sendo que em Brasília a Tmín aumentou em 2,3ºC e a Tmáx em 0,85ºC em

relação a série histórica de dados (Almeida, 2012). Um estudo feito no Maranhão, observou que todas as estações do Bioma Cerrado apresentaram tendência de aumento de até 1,98 ºC de 1977 até 2014 (Silva et Al., 2016).

As projeções futuras seguem a tendência de aumento para a região. Em Tocantins, projeções de temperatura média até o ano 2070 mostram um aumento de pelo menos 5,1 ºC no cenário RCP 8.5 (Sousa et Al., 2019). Hofmann et al. (2021) projetou um aumento de 6 ºC para todo o Bioma Cerrado até 2050 comparado com a temperatura média em 1961.

Esse aumento de temperatura esperado é decorrente dos diferentes níveis dos forçantes atmosféricos (GEEs) sobre a região, levando em conta o uso atual do solo, mas não os usos futuros. É possível que, com o paulatino desmatamento do Cerrado e da Amazônia oriental, esses valores sejam ainda maiores (Hoffmann & Jackson, 2000).

O aumento da temperatura é danoso para as bacias hidrográficas por serem aumentarem a evapotranspiração e terem o poder de reduzir as vazões afluentes dessa forma (Gardner, 2009).

## 3.2 PRECIPITAÇÃO

Na Tabela 2 podemos encontras os valores das médias de precipitação e sua significância para o teste de Mann-Whitney-Wilcoxon para cada cenário RCP (4.5 e 8.5) nos três períodos estudados histórico, 2031-2050 e 2061-2080. As médias dos períodos apresentaram significância a 99,9% de probabilidade ($p \leq 0,001$), exceto o período 2031-2050 RCP 8.5 ($p \leq 0,01$). No cenário RCP 4.5, a diminuição na média pode chegar a 391,9mm no ano de 2080, enquanto no RCP 8.5 chegaria a 588,2mm, que representa mais que um terço em relação a média histórica. O cenário RCP 4.5 apresenta uma constância na média de P até 2080, enquanto que o RCP 8.5 apresenta uma diminuição evidente.

A Figura 4 apresenta os gráficos das precipitações anuais em cada período estudado, nos dois cenários RCP 4.5 e 8.5. Podemos perceber que o cenário RCP 8.5 é que mostra uma maior diminuição de precipitação nas projeções futuras nos dois períodos.

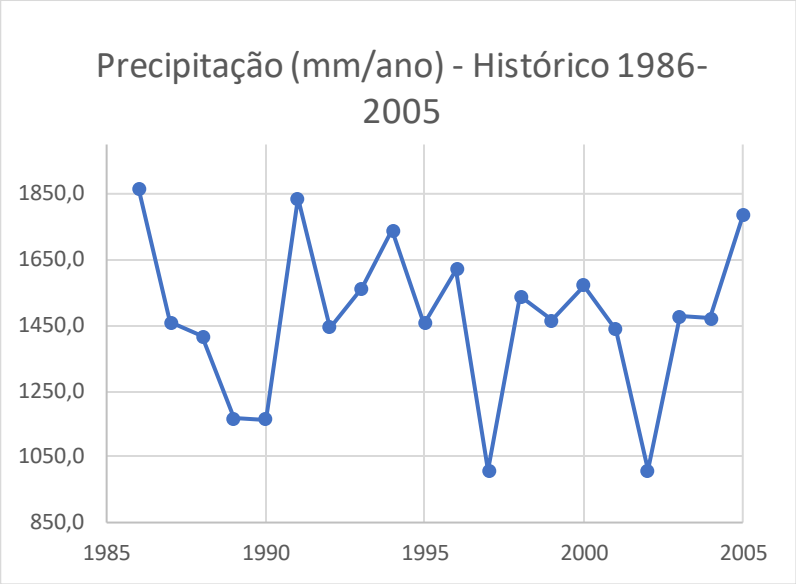
| Cenário | Período | P (mm) | Diminuição em relação ao Histórico | CV (P) |
|---|---|---|---|---|
| **HISTÓRICO** | 1986-2005 | 1474,3 | - | 0,16 |
| **4.5** | 2031-2050 | 1082,0*** | 392,3 mm | 0,40 |
| | 2061-2080 | 1082,4*** | 391,9 mm | 0,54 |
| **8.5** | 2031-2050 | 1178,6** | 295,7 mm | 0,44 |
| | 2061-2080 | 886,1*** | 588,2 mm | 0,55 |

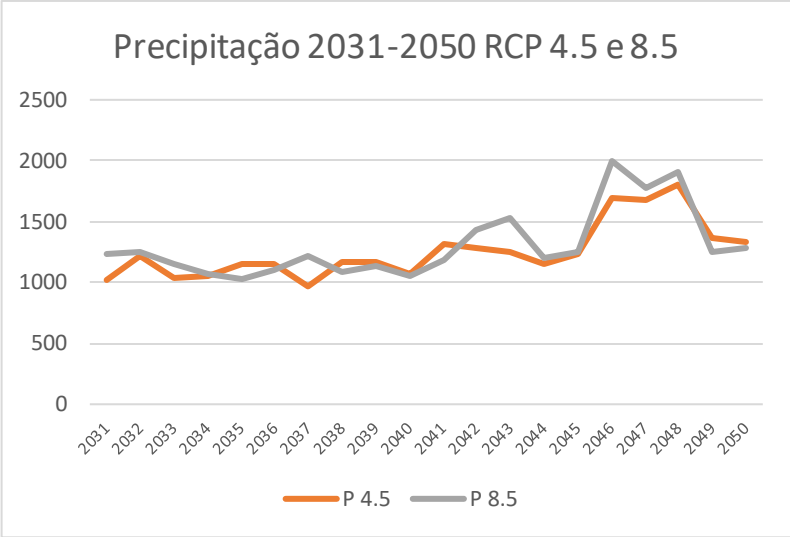
Tabela 2 – Resultados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para precipitação, onde: * = $p \leq 0,05$, **= $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$.

Essa significativa redução em P projetada para a bacia segue uma tendência média verificada no Cerrado, onde uma média de 9% de diminuição foi observada em 125 estações na região, entre 1970 e 2010 (Campos & Chaves, 2020), principalmente em função do significativo desmatamento do bioma. Na região de Cerrado do Maranhão no período de 1977-2014 apenas uma estação das 12 estudadas apresentou uma tendência significativa de queda na precipitação (Silva et Al., 2016).

Mas as projeções de chuva para o Cerrado mostram que futuramente a chuva irá diminuir. No Estado do Tocantins, a maior redução projetada foi de 524,8 mm/6meses no RCP 8.5 (Sousa et Al., 2019). Rodrigues et Al. (2019) ao utilizarem os modelos EtaHadGEM2-ES e EtaMIROC5 para projeções futuras no Bioma Cerrado, encontraram diminuição na precipitação para os cenários RCP 4.5 e 8.5, tendo uma diminuição de até 683,2 mm/ano na pior projeção.

Considerando o exposto, é perceptível que o Cerrado irá sofrer com as mudanças climáticas, e a falta de chuva pode afetar o abastecimento de água em todo o país, já que muitas nascentes de bacias se encontram no Planalto Central (Assad et Al., 2020).



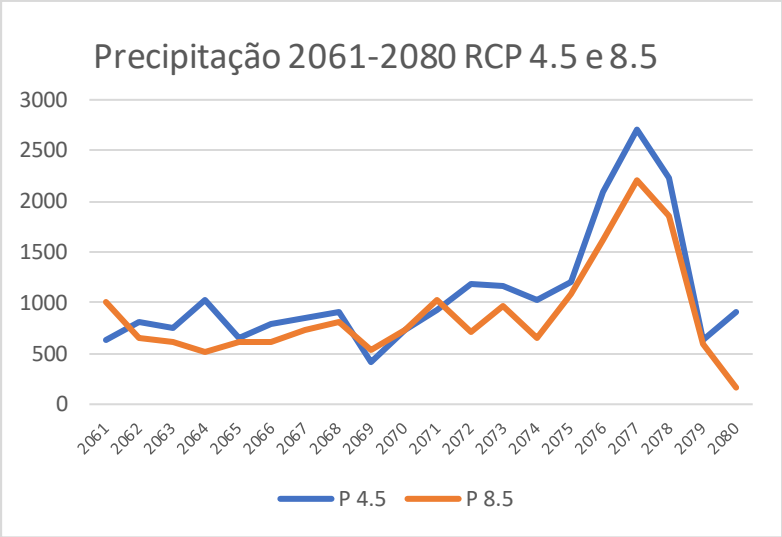




Figura 4 - Plotagem de precipitação (mm/ano) nos períodos de 1986 – 2080, nos cenários RCP 4.5 e 8.5.

### 3.3. Prováveis impactos hidrológicos das variações de P e T na Bacia

O significativo aumento de T e redução em P na bacia do Descoberto tenderão a reduzir as vazões afluentes ao seu reservatório (Gardner, 2009), uma vez que a primeira tende a aumentar a evapotranspiração e a segunda a reduzir a recarga da água subterrânea.

Os dados obtidos no presente estudo, cuja área se situa no centro do Cerrado, são corroborados por outros autores. Estudos feitos em estações meteorológicas já estão mostrando uma tendência de aumento de temperatura (Silva et Al., 2016). A precipitação nas estações meteorológicas não tem consenso em relação a tendência de queda (Silva et

Al., 2016; Campos & Chaves, 2020), entretanto, as projeções futuras apresentam que haverá uma queda tendencial até o final do século em todos os cenários RCP (Sousa et Al., 2019; Rodrigues et Al., 2019).

Projeções futuras para as bacias do Cerrado rio do Sono, Rio Manuel Alves da natividade e rio Palma mostraram uma queda de até 38,5 a 77,2% até 2099, sendo que o cenário RCP 8.5 possui uma queda 20% maior que o cenário 4.5 (Rodrigues et Al., 2019). Para a bacia do Paranaíba, localizada no Cerrado, apresentou uma redução de 27,8 a 84,3% até o final do século (Oliveira et Al., 2019).

Considerando que as mudanças climáticas esperadas podem afetar de forma significativa a hidrologia futura da bacia, é importante que gestores e usuários de água busquem avaliar esse impacto futuro nas suas vazões afluentes e, no caso de ele ser significativo, estabelecer uma estratégia de adaptação às mudanças climáticas, para que o abastecimento de água da bacia seja mantido em níveis satisfatórios.

## 4. CONCLUSÃO

Uma análise das projeções de temperatura e precipitação, usando um *ensemble* de RCMs na bacia do rio Descoberto indicou um significativo aumento nas médias anuais de T e uma redução nas médias de P, considerando o período atual.

O aumento em Temperatura no RCP 4.5 foi de 1,9 ºC e 2,7 ºC nos respectivos períodos de 2031-2050 e 2061-2080. Enquanto o de temperatura no cenário RCP 8.5 foi de 2,21 ºC e 4,4 ºC. A redução em Precipitação foi equivalente a 26,62% e 26,59% no cenário RCP 4.5 nos períodos de 2031-2050 e 2061-2080, respectivamente. E o cenário RCP 8.5 apresentou a maior queda, sendo de 20,1% e 51,22%, para os respectivos períodos. Essa variação sigficativa nas projeções futuras poderão impactar a hidrologia da bacia, principalmente no que diz respeito à suas vazões afluentes, requerendo atenção de gestores e usuários de água em termos de medidas de adaptação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADASA-ECOPLAN. (2012). Revisão e Atualização do Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal-PGIRH. Relatório Final - Volume I - DIAGNÓSTICO. Brasília-DF.

ADASA-UNESCO, Produto 2 – Estudo Técnico Sobre as Disponibilidades do Recurso Hídrico na Bacia do Alto do Descoberto (2018). ED05/17

ALMEIDA, J. M. V. de. Índices de monitoramento e detecção de mudanças climáticas na região Centro-Oeste do Brasil. 2012. 178f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2012.

ARNELL, N. W. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios (2004), Global Environmental Change, Volume 14, Issue 1, Pages 31-52, ISSN 0959-3780, https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.10.006.

ARORA, V., BOER, G. (2005). A parameterization of leaf phenology for the terrestrial ecosystem component of climate models. Global Change Biology. 11. 39 - 59. doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00890.x

ASSAD, E. D., VICTORIA, D. D. C., Cuadra, S. V., Pugliero, V. S., & Zanetti, M. R. (2020). Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado. Embrapa Informática Agropecuária-Capítulo em livro científico (ALICE).

AYDINALP, C., & CRESSER, M. S. (2008). The effects of global climate change on agriculture. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 3(5), 672-676.

CAESAR, J., PALIN, E., LIDDICOAT, S., LOWE, J., BURKE, E., PARDAENS, A., ... & KAHANA, R. (2013). Response of the HadGEM2 Earth System Model to future greenhouse gas emissions pathways to the year 2300. Journal of Climate, 26(10), 3275-3284.

CHAVES, H. M., & LORENA, D. R. (2019). Assessing reservoir reliability using classical and long-memory statistics. Journal of Hydrology: Regional Studies, 26, 100641. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100641

CHOU, S. C., MARENGO, J. A., LYRA, A. A., SUEIRO, G., PESQUERO, J. F., ALVES, L. M., … TAVARES, P. (2011). Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. Climate Dynamics, 38(3-4), 635–653. doi:10.1007/s00382-011-1002-8

CHOU, S., LYRA, A. , MOURÃO, C. , DERECZYNSKI, C. , PILOTTO, I. , GOMES, J. , BUSTAMANTE, J. , TAVARES, P. , SILVA, A. , RODRIGUES, D. , CAMPOS, D.

, CHAGAS, D. , SUEIRO, G. , SIQUEIRA, G. , NOBRE, P. AND MARENGO, J. (2014a) Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. American Journal of Climate Change, 3, 438-454. doi: 10.4236/ajcc.2014.35039.

CHOU, S., LYRA, A. , MOURÃO, C. , DERECZYNSKI, C. , PILOTTO, I. , GOMES, J. , BUSTAMANTE, J. , TAVARES, P. , SILVA, A. , RODRIGUES, D. , CAMPOS, D. , CHAGAS, D. , SUEIRO, G. , SIQUEIRA, G. AND MARENGO, J. (2014b) Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. American Journal of Climate Change, 3, 512-527. doi: 10.4236/ajcc.2014.35043.

COOK, J., VAN DER LINDEN, S., MAIBACH, E., & LEWANDOWSKY, S. (2018). The Consensus Handbook. DOI:10.13021/G8MM6P. Available at http://www.climatechangecommunication.org/all/consensus-handbook/

COSTA, R.; MENDES, C. L. Exploring Opportunities for Performance Improvement in a Global Climate Model. In: SIMPÓSIO EM SISTEMAS COMPUTACIONAIS DE ALTO DESEMPENHO (WSCAD), 20. , 2019, Campo Grande. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2019. p. 97-108. DOI: https://doi.org/10.5753/wscad.2019.8660.

DAGBEGNON, C., DJEBOU, S., & SINGH, V. P. (2016). Impact of climate change on the hydrologic cycle and implications for society. Environment and Social Psychology, 1(1). DOI:10.18063/ESP.2016.01.002

DE OLIVEIRA, V. A., DE MELLO, C. R., BESKOW, S., VIOLA, M. R., & SRINIVASAN, R. (2019). Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. Ecological Engineering, 133, 20–31. doi:10.1016/j.ecoleng.2019.04.021

DE SOUZA, R. M., VIOLA, M. R., CHOU, S. C., ALVES, M. V. G., & AVANZI, J. C. (2019). Projeções Climáticas Regionalizadas Para O Estado Do Tocantins, Brasil, Nos Cenários RCP 4.5 E RCP 8.5. Revista Brasileira de Climatologia, 24. doi.org/10.5380/abclima.v24i0.57052

DESER, C., PHILLIPS, A., BOURDETTE, V., & TENG, H. (2010). Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. Climate Dynamics, 38(3-4), 527–546. doi:10.1007/s00382-010-0977-x

GHIL, M. (2002). Natural climate variability. Encyclopedia of global environmental change. ISBN 0-471-97796-9, p. 544-549

GUDMUNDSSON, L., BREMNES, J. B., HAUGEN, J. E., AND ENGEN-SKAUGEN, T.: Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods, Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 3383–3390, https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012, 2012.

HEAL, G., KRISTRÖM, B. Uncertainty and Climate Change. Environ Resource Econ 22, 3–39 (2002). https://doi.org/10.1023/A:1015556632097

HELD, I. M., & SODEN, B. J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. Journal of Climate, 19(21), 5686-5699. https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1

HOFFMANN, W. A., & JACKSON, R. B. (2000). Vegetation–Climate Feedbacks in the Conversion of Tropical Savanna to Grassland, Journal of Climate, 13(9), 1593-1602. doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1593:VCFITC>2.0.CO;2

HOFMANN, G. S., CARDOSO, M. F., ALVES, R. J. V., WEBER, E. J., BARBOSA, A. A., TOLEDO, P. M., OLIVEIRA, L. F. B. (2021). The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. Global Change Biology, 27(17), 4060–4073. doi:10.1111/gcb.15712

HOUGHTON, J., GLOBAL WARMING (2005) Rep. Prog. Phys. 68 1343

IPCC, 2014a Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Evaluation of Climate Models. In Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 741-866). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415324.020

IPCC, 2014b Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility Pages 1029 to 1076. In Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1029-1136). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415324.024

IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of

strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

KUNDZEWICZ , Z.W., KRYSANOVA, V., BENESTAD , R.E., HOV , Ø., PINIEWSKI , M., OTTO, I.M. (2018) Uncertainty in climate change impacts on water resources, Environmental Science & Policy, Volume 79, 2018, Pages 1-8, https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008.

KUNDZEWICZ, Z. W. (2008) Climate change impacts on the hydrological cycle, Ecohydrology & Hydrobiology, Volume 8, Issues 2–4, 2008, Pages 195-203, ISSN 1642-3593, https://doi.org/10.2478/v10104-009-0015-y.

LIU X, TANG Q, CUI H, MU M, GERTEN D, GOSLING S, MASAKI Y, SATOH Y, WADA Y. Multimodel uncertainty changes in simulated river flows induced by human impact parameterizations (2017). Environ Res Lett. 2017 Feb;12(2):025009. doi: 10.1088/1748-9326/aa5a3a. Epub 2017 Feb 8. PMID: 32704305; PMCID: PMC7376739.

LIU, Z. " Dynamics of Interdecadal Climate Variability: A Historical Perspective". Journal of Climate 25.6 (2012): 1963-1995. https://doi.org/10.1175/2011JCLI3980.1.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. "On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other." Ann. Math. Statist. 18 (1) 50 - 60, March, 1947. https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491

MARTIN, G.M., BELLOUIN, N., COLLINS, W.J., CULVERWELL, I.D., HALLORAN, P.R., HARDIMAN, S.C., et al. (2011) The Had-GEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. Geoscientific Model Development, 4, 723-757. http://dx.doi.org/10.5194/gmd-4-723-2011

MAURANO L.; ALMEIDA, C. A., MEIRA, M. Monitoramento Do Desmatamento Do Cerrado Brasileiro Por Satélite - Prodes Cerrado. In: Anais Do Xix Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto (2019) Santos. Anais eletrônicos... São José dos Campos, INPE, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/monitoramento-do-desmatamento-do-cerrado-brasileiro-por-sate--lite---prodes-cerrado?lang=pt-br>. Acesso em: 14 out. 2021.

MESINGER, F., CHOU, S.C., GOMES, J.L., JOVIC, D., BASTOS, P., BUSTAMANTE, J.F., et al. (2012) An Upgraded Version of the Eta Model. Meteorology and Atmospheric Physics, 116, 63-79. http://dx.doi.org/10.1007/s00703-012-0182-z

MICHALAK, A. Study role of climate change in extreme threats to water quality. Nature 535, 349–350 (2016). https://doi.org/10.1038/535349a

MILES, G. M., GRAINGER, R. G., & HIGHWOOD, E. J. (2004). The significance of volcanic eruption strength and frequency for climate. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 130(602), 2361–2376. doi:10.1256/qj.03.60

NOBRE, P., SIQUEIRA, L. S. P., DE ALMEIDA, R. A. F., MALAGUTTI, M., GIAROLLA, E., CASTELÃO, G. P., BOTTINO, M. J., KUBOTA, P., FIGUEROA, S. N., COSTA, M. C., BAPTISTA, M., JR., IRBER, L., JR., & MARCONDES, G. G. (2013). Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model, Journal of Climate, 26(17), 6716-6732. Retrieved Sep 20, 2021, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/26/17/jcli-d-12-00580.1.xml

PELLEGRINO, G. Q., ASSAD, E. D., & MARIN, F. R. (2007). Mudanças climáticas globais e a agricultura no Brasil. Revista Multiciência, 8, 139-162.

PINTO, H. S., ASSAD, E. D., ZULLO JÚNIOR, J., & ÁVILA, A. D. (2003). Variabilidade climática. Água, agricultura e meio ambiente no Estado de São Paulo: avanços e desafios. Embrapa Meio Ambiente-Livro científico (ALICE).

RAVAL, A., RAMANATHAN, V. (1989) Observational determination of the greenhouse effect. Nature 342, 758–761 (1989).

RODRIGUES, J. A. M., VIOLA, M. R., ALVARENGA, L. A., MELLO, C. R., CHOU, S. C., OLIVEIRA, V. A., … MORAIS, M. A. V. (2019). Climate change impacts under RCP scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado Biome. International Journal of Climatology. doi:10.1002/joc.6347

SHIKLOMANOV, I. A. (Ed.). (2009). The hydrological cycle. Eolss Publishers Company Limited.

SILVA, D. H. D. (2009). Protocolos de Montreal e Kyoto: pontos em comum e diferenças fundamentais. Revista brasileira de política internacional, 52, 155-172.

SILVA, F. B., SANTOS, J. R. N., FEITOSA, F. E. C. S., SILVA, I. D. C., ARAÚJO, M. L. S. D., GUTERRES, C. E., ... & NERES, R. L. (2016). Evidências de mudanças climáticas na região de transição Amazônia-Cerrado no Estado do Maranhão. Revista Brasileira de Meteorologia, 31, 330-336.

TRENBERTH, KEVIN E., JOHN T. FASULLO, AND JEFFREY KIEHL. " Earth's Global Energy Budget". Bulletin of the American Meteorological Society 90.3 (2009): 311-324. https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1. Web. 14 Oct. 2021.

WATANABE, M., SUZUKI, T., O'ISHI, R., KOMURO, Y., WATANABE, S., EMORI, S., ET AL. (2010) Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. Journal of Climate, 23, 6312-6335. http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1

WHITEHEAD, P. G., WILBY, R. L., BATTARBEE, R. W., KERNAN, M. & WADE, A. J. (2009) A review of the potential impacts of climate change on surface water quality, Hydrological Sciences Journal, 54:1, 101-123, DOI: 10.1623/hysj.54.1.101

## APÊNDICE

APÊNDICE A

Tabela 1 – Temperaturas médias anuais no período Histórico, 2031-2050, 2061-2080 nos cenários RCP 4.5 e 8.5, coletados através do *ensemble* dos modelos EtaBESM, EtaCanESM2, EtaHadGEM2 e EtaMIROC5, para a Bacia do Descoberto-DF.

| HISTÓRICO | | RCP 4.5 | | | | RCP 8.5 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ANO | T (ºC) | ANO | T (ºC) | ANO | T (ºC) | ANO | T (ºC) | ANO | T (ºC) |
| 1986 | 20,79 | 2031 | 22,85 | 2061 | 23,67 | 2031 | 22,51 | 2061 | 24,74 |
| 1987 | 20,89 | 2032 | 22,89 | 2062 | 23,85 | 2032 | 21,96 | 2062 | 24,88 |
| 1988 | 20,80 | 2033 | 22,95 | 2063 | 23,61 | 2033 | 23,01 | 2063 | 24,92 |
| 1989 | 20,83 | 2034 | 22,28 | 2064 | 23,50 | 2034 | 23,35 | 2064 | 25,42 |
| 1990 | 21,24 | 2035 | 22,44 | 2065 | 23,76 | 2035 | 23,62 | 2065 | 25,21 |
| 1991 | 20,94 | 2036 | 22,44 | 2066 | 23,62 | 2036 | 23,09 | 2066 | 25,34 |

*Continua...*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1992 | 20,76 | 2037 | 23,43 | 2067 | 23,54 | 2037 | 23,41 | 2067 | 24,91 |
| 1993 | 21,04 | 2038 | 23,31 | 2068 | 23,07 | 2038 | 22,97 | 2068 | 25,44 |
| 1994 | 21,10 | 2039 | 22,58 | 2069 | 24,02 | 2039 | 23,59 | 2069 | 25,06 |
| 1995 | 20,89 | 2040 | 22,85 | 2070 | 23,56 | 2040 | 22,97 | 2070 | 25,03 |
| 1996 | 20,73 | 2041 | 22,63 | 2071 | 23,99 | 2041 | 23,04 | 2071 | 25,07 |
| 1997 | 21,55 | 2042 | 23,07 | 2072 | 23,45 | 2042 | 23,44 | 2072 | 25,92 |
| 1998 | 20,99 | 2043 | 23,02 | 2073 | 23,42 | 2043 | 23,25 | 2073 | 25,15 |
| 1999 | 20,98 | 2044 | 22,96 | 2074 | 23,34 | 2044 | 23,34 | 2074 | 25,04 |
| 2000 | 20,87 | 2045 | 22,94 | 2075 | 23,57 | 2045 | 23,29 | 2075 | 25,03 |
| 2001 | 20,79 | 2046 | 22,49 | 2076 | 23,45 | 2046 | 23,38 | 2076 | 26,13 |
| 2002 | 20,87 | 2047 | 22,55 | 2077 | 23,15 | 2047 | 23,62 | 2077 | 25,21 |
| 2003 | 21,29 | 2048 | 22,79 | 2078 | 23,06 | 2048 | 23,64 | 2078 | 26,33 |
| 2004 | 21,26 | 2049 | 22,97 | 2079 | 23,50 | 2049 | 23,45 | 2079 | 25,25 |
| 2005 | 21,25 | 2050 | 22,56 | 2080 | 24,01 | 2050 | 23,12 | 2080 | 26,41 |
| **MÉDIA** | **20,99** | **MÉDIA** | **22,80** | **MÉDIA** | **23,56** | **MÉDIA** | **23,20** | **MÉDIA** | **25,32** |

Tabela 2 – Precipitações médias anuais no período Histórico, 2031-2050, 2061-2080 nos cenários RCP 4.5 e 8.5, coletados através do *ensemble* dos modelos EtaBESM, EtaCanESM2, EtaHadGEM2 e EtaMIROC5, para a Bacia do Descoberto-DF.

| **HISTÓRICO** | | **RCP 4.5** | | | | **RCP 8.5** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ANO | P (mm/ano) | ANO | P (mm/ano) | ANO | P (mm/ano) | ANO | P (mm/ano) | ANO | P (mm/ano) |
| 1986 | 1867,59 | 2031 | 646,68 | 2061 | 629,24 | 2031 | 1053,21 | 2061 | 999,46 |
| 1987 | 1458,97 | 2032 | 1016,52 | 2062 | 816,42 | 2032 | 1081,67 | 2062 | 660,95 |
| 1988 | 1417,02 | 2033 | 686,77 | 2063 | 755,61 | 2033 | 883,09 | 2063 | 623,22 |
| 1989 | 1167,87 | 2034 | 706,56 | 2064 | 1022,07 | 2034 | 736,28 | 2064 | 517,50 |
| 1990 | 1164,41 | 2035 | 887,34 | 2065 | 646,21 | 2035 | 658,44 | 2065 | 617,66 |
| 1991 | 1834,63 | 2036 | 890,92 | 2066 | 794,10 | 2036 | 792,04 | 2066 | 611,71 |
| 1992 | 1443,47 | 2037 | 546,82 | 2067 | 846,34 | 2037 | 1008,64 | 2067 | 741,66 |
| 1993 | 1562,93 | 2038 | 920,46 | 2068 | 914,04 | 2038 | 768,02 | 2068 | 813,04 |
| 1994 | 1738,46 | 2039 | 911,60 | 2069 | 415,21 | 2039 | 871,65 | 2069 | 541,30 |
| 1995 | 1454,15 | 2040 | 726,84 | 2070 | 731,62 | 2040 | 708,46 | 2070 | 733,32 |
| 1996 | 1618,25 | 2041 | 1179,44 | 2071 | 933,76 | 2041 | 953,01 | 2071 | 1024,98 |
| 1997 | 1008,54 | 2042 | 1139,25 | 2072 | 1179,24 | 2042 | 1403,26 | 2072 | 705,23 |
| 1998 | 1537,85 | 2043 | 1073,26 | 2073 | 1174,93 | 2043 | 1581,37 | 2073 | 970,91 |
| 1999 | 1465,54 | 2044 | 890,80 | 2074 | 1023,96 | 2044 | 986,13 | 2074 | 645,16 |
| 2000 | 1570,01 | 2045 | 1047,71 | 2075 | 1205,62 | 2045 | 1080,91 | 2075 | 1085,01 |
| 2001 | 1437,93 | 2046 | 1904,22 | 2076 | 2090,97 | 2046 | 2457,05 | 2076 | 1620,08 |
| 2002 | 1009,25 | 2047 | 1871,82 | 2077 | 2707,08 | 2047 | 2039,40 | 2077 | 2207,43 |
| 2003 | 1476,37 | 2048 | 2097,64 | 2078 | 2222,29 | 2048 | 2301,00 | 2078 | 1850,25 |
| 2004 | 1470,61 | 2049 | 1285,62 | 2079 | 628,60 | 2049 | 1069,08 | 2079 | 588,27 |
| 2005 | 1783,05 | 2050 | 1209,70 | 2080 | 910,34 | 2050 | 1139,23 | 2080 | 164,24 |
| **MÉDIA** | **1474,34** | **MÉDIA** | **1082,00** | **MÉDIA** | **1082,38** | **MÉDIA** | **1178,60** | **MÉDIA** | **886,07** |