

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS, PROJETADAS PELO IPCC, NA ARIDEZ DO BRASIL

*José Micael Ferreira da Costa¹
Antonio Duarte Marcos Junior¹
Cleiton da Silva Silveira²
Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior³

INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE, DESIGNED BY THE IPCC, IN THE BRAZIL ARIDITY

Recibido el 22 de agosto de 2017; Aceptado el 8 de mayo de 2018

Abstract

The objective of this work is to analyze how climatic changes may interfere in the climatic classification of the aridity index in Brazil, through impacts on the water availability of each region of the country. The projections of 14 CMIP5 models published in the fifth IPCC report were used for the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. The period analyzed was from 2010 to 2099, compared to the historical scenario from 1950 to 1999. The methodology consists of the temperature projections - which enabled the calculation of potential evapotranspiration (ETP) by the Hargreaves and Samani method - and precipitation, which enabled the calculation of the Aridity Index developed by Thornthwaite, with subsequent adjustment by Penman. The bias removal of the studied variables was done using the data observed by the Climatic Research Unit (CRU). The results related to the aridity index point to a change in the spatial distribution of climatic types in some of the regions of the country. The analyzes indicate, in both CPRs, the increase of arid zones in the NE and CO regions and the maintenance of the current climates for the other regions.

Keywords: Aridity index, climate change, IPCC.

¹ Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (IEDS), Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB), Redenção, CE, Brasil.

² Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil.

³ Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Fortaleza, CE, Brasil.

* *Autor correspondente:* Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (IEDS), Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB), Avenida da Abolição, 3 – Centro. CEP.: 62.790-000. Redenção – CE – Brasil.
Email: micaelcosta@aluno.unilab.edu.br

Resumo

O objetivo deste trabalho é analisar como as mudanças climáticas poderão interferir na classificação climática quanto ao índice de aridez no Brasil, mediante impactos na disponibilidade hídrica de cada região do país. Utilizaram-se as projeções de 14 modelos do CMIP5 publicadas no quinto relatório do IPCC, para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. O período analisado foi de 2010 a 2099, em comparação ao cenário histórico de 1950 a 1999. A metodologia consiste nas projeções de temperatura - que possibilitou o cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) pelo método de Hargreaves e Samani - e precipitação, as quais possibilitaram o cálculo do Índice de Aridez desenvolvido por Thornthwaite, com posterior ajuste por Penman. A remoção de viés das variáveis estudadas foi feita utilizando-se os dados observados pela Climatic Research Unit (CRU). Os resultados referentes ao índice de aridez apontam alteração na distribuição espacial dos tipos climáticos em algumas das regiões do país. As análises indicam, em ambas as RCP's, aumento de zonas áridas nas regiões NE e CO e manutenção dos climas atuais para as demais regiões.

Palavras-chave: Índice de aridez, mudanças climáticas, IPCC.

Introdução

As mudanças climáticas que nas últimas décadas passaram a ocorrer de forma mais contundente, podem acarretar significativos impactos em diferentes setores do país dentre os quais destacam-se os recursos hídricos e energéticos (IPCC, 2007; Banco Mundial, 2010; PBMC, 2012; IPCC, 2014). Tais mudanças implicam em alterações diretas no ciclo hidrológico (precipitação e evapotranspiração), umidade do solo, reservas hídricas (tanto superficiais como subterrâneas) e geração de escoamento superficial (IPCC, 2007; IPCC, 2008; Silveira *et al.*, 2013).

Estas mudanças em conjunto com as projeções do aumento de problemas de saúde, de migração para áreas urbanas da região ou para outras regiões e da demanda por água, ocasionadas principalmente pelo crescimento populacional e aumento das riquezas, poderão pressionar os hidrossistemas brasileiros acima do seu limite sustentável nas próximas décadas (Marengo *et al.*, 2011). Desse modo, fazem necessárias mudanças na política de gestão dos recursos hídricos atual, pois do contrário poderá desencadear impactos no desenvolvimento econômico e social do país.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indica em seus relatórios o quanto as mudanças no clima ameaçam o desenvolvimento sustentável, já que acarretam impactos diretos e indiretos em diferentes áreas como: saúde, recursos hídricos, infraestruturas urbanas e rurais, zonas costeiras, biodiversidade, etc. Desta forma, torna-se fundamental a elaboração de planos estratégicos bem como subsídios ao planejamento nacional de longo prazo, a fim de tornar o país mais resiliente às condições climáticas futuras ou mesmo a variabilidade do clima.

Os estudos do IPCC encontram-se divididos em Rotas Representativas de Concentração de Gases (RCP), onde as mesmas trabalham com concentrações diferentes de gases do efeito estufa (GEE). Dentre as quatro RCPs existentes, duas (RCP 4.5 e a RCP 8.5) são apontadas como as mais

relevantes, as quais correspondem a concentrações médias de 650 e 1370 ppm de CO_{2eq}, respectivamente. Estas se destacam por indicarem, quanto a RCP 4.5, uma maior probabilidade de ocorrência e mudanças mais extremas, conforme a RCP 8.5. As RCPs são constituídas por diversos modelos climáticos elaborados por diferentes centros de estudo ao redor do planeta, que visam avaliar como se processam as mudanças do clima para posterior uso na elaboração de projeções.

Assim, o conhecimento da aridez faz-se necessário para explicar as características da paisagem, bem como possibilitar a determinação de medidas políticas e de gestão, necessárias a utilização racional dos recursos hídricos em muitas regiões (Caitano *et al.*, 2011). Existem várias metodologias utilizadas para a determinação da aridez de uma região, servindo como indicador de susceptibilidade à desertificação. A definição elaborada pelas Nações Unidas (Unesco, 1979) e adotada no World Atlas of Desertification da UNEP (1992) e em outros estudos (Matallo Junior, 2003; Guimarães, 2016; Lopes *et al.*, 2017), baseia-se na metodologia desenvolvida por Thornthwaite (1948), com posterior ajuste por Penman (1953), segundo a qual o Índice de Aridez (IA) de uma região consiste na razão entre a quantidade de água advinda da chuva e as potenciais perdas de água para a atmosfera (Caitano *et al.*, 2011).

Objetiva-se com o presente trabalho realizar uma análise das alterações na distribuição climática do Brasil mediante o uso do índice de aridez, obtido através das projeções climáticas do IPCC para o território brasileiro.

Metodologia

A metodologia divide-se em quatro etapas:

- A primeira consiste na obtenção dos campos de precipitação dos modelos globais do IPCC-AR5 para os cenários Historical, RCP 4.5 e RCP 8.5 sobre o Brasil. Com estes, realizada a correção estatística do viés com base nos dados de precipitação mensal do "Climate Research Unit"(CRU) (UEA, 2015).
- A segunda etapa deteve-se na correção das variáveis, pois como as variáveis do IPCC são projeções obtidas através de diferentes modelagens matemáticas, faz-se necessário a remoção de viés destas variáveis buscando ajustá-las aos valores observados. A remoção de viés foi feita para as séries de precipitação e evapotranspiração, utilizando os dados observados pelo CRU.
- Na terceira etapa realizou-se o cálculo do Índice de Aridez proposto por Thornthwaite e Penman, utilizando como dados de entrada as precipitações com viés removido e as evapotranspirações estimadas para as Regiões estudadas, ambas obtidas por intermédio da média ponderada pela área (Thiessen).

- A quarta etapa consiste em realizar a classificação climática mediante o Índice de Aridez calculados para a base de dados do CRU e para os diferentes cenários e modelos globais do IPCC-AR5.

Inicialmente, realizou-se o estudo para as cinco regiões geográficas do Brasil: Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul (Figura 1). Foram analisados, para cada uma das regiões, como a evolução dos tipos climáticos decorre ao longo do século XXI de acordo com as projeções feitas pelos diferentes modelos do IPCC-AR5. Os tipos climáticos seguem a classificação climática quanto a aridez de cada região.

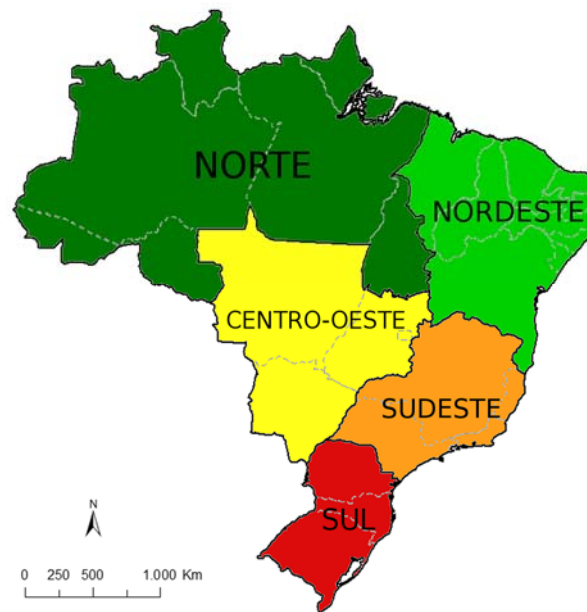


Figura 1. Região de estudo.

Foram utilizados os bancos de dados do IPCC e CRU. Dos bancos de dados do IPCC foram utilizadas as projeções de temperatura e precipitação, enquanto que do CRU foram utilizados os valores observados de temperatura e precipitação. Dentre os quatro cenários que compõem o IPCC-AR5, foram escolhidas as RCP's 4.5 e 8.5, e dos diversos modelos que compõem cada RCP foram selecionados quatorze, escolhidos de acordo com a disponibilidade de dados, relevância e distribuição espacial, os quais são: ACCESS1-0, ACCESS1-3, BCC-CSM-1-1, CESM1-BGC, CanESM2, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM5B-LR, CSIRO-Mk3-6-0, HadGem2-AO, MIROC5, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MPI-ESM-LR.

Evapotranspiração potencial

As séries analisadas foram divididas em quatro horizontes temporais: o primeiro denominado "período histórico" é considerado como referência, o qual utilizou-se de séries mensais no período de 1950 a 1999 e para as projeções do presente século considerou-se o período de 2010 a 2099 dividido em três intervalos de 30 anos: 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099.

Os modelos utilizados contam apenas com projeções de temperatura e precipitação. Desta forma, se fez necessário usar um método alternativo para estimar a evapotranspiração potencial a qual é primordial para o cálculo do Índice de Aridez. O método de estimativa da ETo proposto por Hargreaves e Samani (1985) é considerado empírico (Pereira *et al.*, 1997) e convenientemente requer uma menor quantidade de informações meteorológicas para o cálculo do mesmo. Desse modo, devido a quantidade de variáveis disponíveis, adotou-se o método de Hargreaves e Samani (1985) para a estimativa da ETo em cada região de estudo. O referido método utiliza como variáveis de entrada temperatura e radiação solar incidente na superfície, sendo determinado a partir da Equação 1, conforme usado por Raimundo (2017):

$$ET_o = 0.0023(T_{med} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{\frac{1}{2}} R_a * 0.408 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

ET_o: é a taxa de evapotranspiração potencial (mm.dia⁻¹);

T_{med}: temperatura média do ar (°C);

T_{max}: temperatura máxima do ar (°C);

T_{min}: temperatura mínima do ar (°C);

R_a: a radiação solar no topo da atmosfera (mm.dia⁻¹).

A radiação solar foi estimada em função da distância relativa entre a Terra e o Sol, na latitude do ponto de estudo. O valor 0,408 corresponde ao fator de conversão de MJ.m⁻².d⁻¹ para mm.dia⁻¹.

Correção de viés

A evapotranspiração potencial média foi obtida através de dados mensais referentes aos modelos globais do IPCC-AR5 para os cenários *Historical*, RCP 4.5 e RCP 8.5, usando o método de Hargreaves e Samani (1985), utilizando-se como dados de entrada as temperaturas máxima, mínima e média dos modelos globais do IPCC-AR5. A correção estatística do viés desta variável seguiu o método utilizado para a correção da precipitação, e utilizou-se das variáveis do CRU para a obtenção da evapotranspiração potencial a ser utilizada para a correção (UEA, 2015), através da Equação 2.

$$X_{cor} = \left(\frac{X_m - \bar{X}_m}{S_m} \right) * S_{obs} + \bar{X}_{obs} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

X_{cor}: é a variável corrigida

X_m: é o valor da variável original do modelo

\bar{X}_m : é a média do modelo

S_m: é o desvio padrão do modelo

S_{obs}: é o desvio padrão observado

\bar{X}_{obs} : é a média observada

Índice de aridez

O índice de aridez (IA) formulado inicialmente por Thornthwaite (1948) e ajustado por Penman (1953) é basicamente a razão entre a precipitação e a evapotranspiração, como mostra a Equação 3. A Tabela 1 apresenta a classificação climática para o índice de aridez.

$$IA = \frac{PR}{ETP}$$

Equação (3)

Onde:

PR: precipitação (mm)

ETP: evapotranspiração potencial (mm)

Tabela 1. Classificação do clima de acordo com o Índice de Aridez conforme a UNEP (1992). Fonte: Brasil (1997).

Classe	Índice
Hiper-árido	< 0.03
Árido	0.03 – 0.2
Semi-árido	0.21 – 0.5
Sub-úmido e seco	0.51 – 0.65
Sub-úmido e úmido	> 0.65

Resultados e Discussão

O período histórico de classificação climática conforme o índice de aridez aponta uma predominância de um mesmo tipo climático para cada região analisada, exceto a região Nordeste que apresenta modelos indicando clima sub-úmido seco em detrimento aos demais modelos que indicam clima semi-árido. Isso pode ser constatado no período de 1950 a 1999 das Figuras 2 e 3. As projeções dos modelos divergem entre si em ambos os cenários analisados, contudo a variabilidade para cada período se acentua na RCP 8.5. Em ambas as RCPs é possível notar que as regiões Norte e Sul não apresentam variações significativas na aridez ao ponto de causarem possíveis mudanças de seus climas.

Na literatura, os estudos destinados ao IA no Brasil referem-se majoritariamente ao Nordeste brasileiro (NEB), por esta ser a região com climas menos úmidos e mais suscetíveis à desertificação. No estudo realizado por Lopes e Leal (2015), para todas as capitais dos estados pertencentes ao NEB no período histórico de 1961 a 2015, nas estações estudadas pôde-se observar uma redução do IA. Em um outro estudo proposto por Lopes *et al.* (2017), utilizando-se do IA para a verificação da Tendência à Desertificação (TD) no NEB, os resultados demonstraram que apesar de mudanças do IA em muitas localidades, observou-se que não ocorreu alterações na classificação a TD.

O estudo realizado por Guimarães *et al.* (2016), que trata do desempenho e as projeções de simulações climáticas de Modelos Globais do CMIP5, e de Modelos Climáticos Regionais do CORDEX para o NEB, mostrou que o IA projetado em ambas as RCPs (4.5 e 8.5) é menor na maior parte das simulações, sugerindo uma tendência de aumento de aridez sobre o NEB durante o presente século, assim como demonstrado nesse estudo.

Uma análise mais detalhada mostra que os resultados para o período histórico demonstram, segundo os modelos climáticos utilizados, que as regiões Norte e Sul são as regiões com climas mais úmidos do país e a Nordeste a de clima mais árido. As regiões Sudeste e Centro-Oeste apresentam valores intermediários, não tendendo a climas mais extremos. Ao comparar estes resultados com a literatura, observa-se que os mesmos condizem com a realidade observada. Logo, esta análise demonstra que os modelos climáticos utilizados conseguem representar adequadamente as condições climáticas passadas destas regiões e, deste modo, espera-se que os mesmos representem de forma eficaz as condições futuras de clima.

Analisando-se as medianas da Figura 2, observa-se que os modelos não projetam grandes alterações no índice de aridez das regiões, já que as medianas se mantiveram constantes ou com variações irrisórias. Desse modo, não há projeções de mudança de clima futuros para as regiões em estudo. Quanto aos quartis, as menores variações entre modelos se encontra na região Sudeste enquanto que as maiores discordâncias entre modelos se remete à região Norte. Nas regiões Norte e Sul todos os modelos apontam para a manutenção do clima Sub-úmido úmido, enquanto que na região Nordeste, os modelos continuam a divergir entre os climas Sub-úmido seco e Semi-árido. Contudo, na segunda metade do século principalmente, há modelos indicando climas mais áridos para as regiões Sudeste e Centro Oeste, migrando do clima Sub-úmido úmido para Sub-úmido seco.

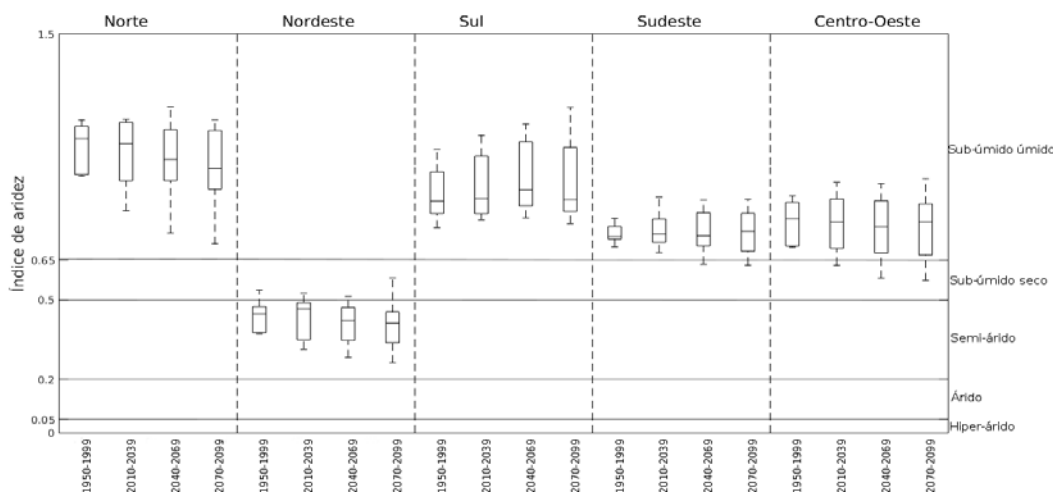


Figura 2. Variação do índice de aridez segundo a RCP 4.5.

Conforme a Figura 3, as medianas da RCP 8.5 variam de forma mais acentuada. Logo, é possível perceber as regiões com maior variabilidade entre os modelos possibilitando uma visão mais clara quanto às possíveis mudanças no clima, mediante alterações no índice de aridez no decorrer do século.

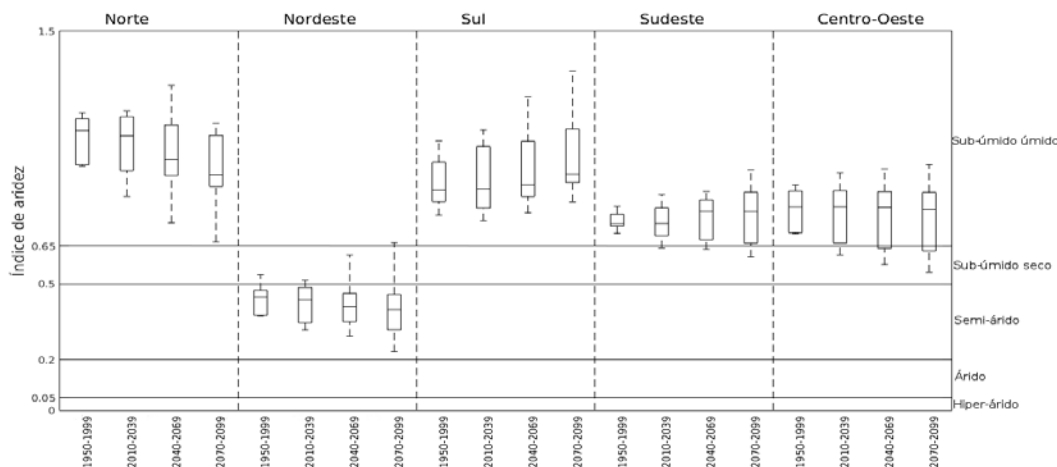


Figura 3. Variação do índice de aridez segundo a RCP 8.5.

Considerando-se as medianas, regiões como as do Norte e Nordeste apresentaram decréscimo do índice de aridez, se comparados os períodos do início e fim do século, o que representa aumento de climas áridos, enquanto que as demais regiões não obtiveram variações significativas. Contudo, não há indicativo de mudanças na classificação climática em nenhuma das regiões.

Para os quartis, as regiões de menores e maiores divergências entre modelos foram a Sudeste e Norte, respectivamente. No entanto, a variabilidade entre os modelos para as regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste indicam que poderão haver mudanças na classificação climática quanto à aridez. Para a região Nordeste, os modelos indicam a manutenção dos climas do período histórico em todos os períodos de projeção, sendo que no último período os modelos divergem consideravelmente, alguns chegando a indicar o aumento do índice de aridez mas sem alteração na classificação climática. As duas outras regiões mencionadas apresentam aumento de climas áridos, com decréscimo do índice de aridez conforme o passar do século, o que poderá acarretar na alteração do clima Sub-úmido úmido para Sub-úmido seco.

A análise do índice de aridez através da distribuição espacial mostra de uma maneira mais contundente como o clima se comporta e como o mesmo poderá ser alterado no país. O período histórico, visto na Figura 4, demonstra que todos os modelos concordam entre si, pois refletem a distribuição do índice estudado de forma coerente com a realidade de clima do país. A grande semelhança na distribuição espacial do índice de aridez entre os modelos deve-se à correção de viés realizada. As regiões constatadas como mais áridas são a Nordeste e Centro-Oeste, sendo atribuído ao primeiro os maiores índices de aridez do país.

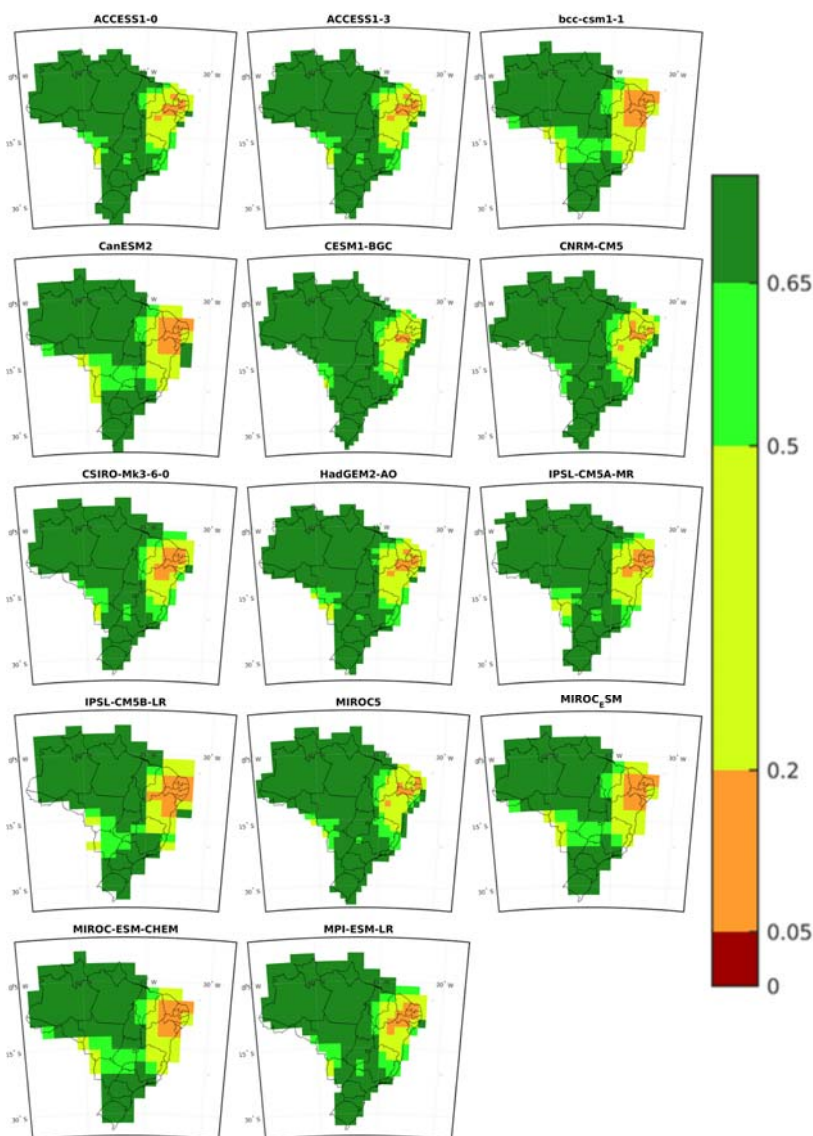


Figura 4. Distribuição espacial do IA segundo o cenário histórico.

As projeções para o período de 2010 a 2039 não apontam grandes variações na distribuição do índice de aridez pelo país, como mostrado na Figura 5. Apenas as regiões Nordeste e Centro-Oeste são apontada por alguns dos modelos como as regiões com maior probabilidade de aumento nas áreas áridas, se evidenciando com as projeções feitas na RCP 8.5. Às demais regiões se mantiveram com índices próximos aos observados no período histórico. É possível observar que o modelo CansESM2 apresenta o cenário mais árido no país com enfoque nas duas regiões já referidas, em contraste com o MIROC5 que apresenta o cenário mais úmido, propondo também a diminuição da aridez nas regiões do Nordeste e Centro-Oeste.

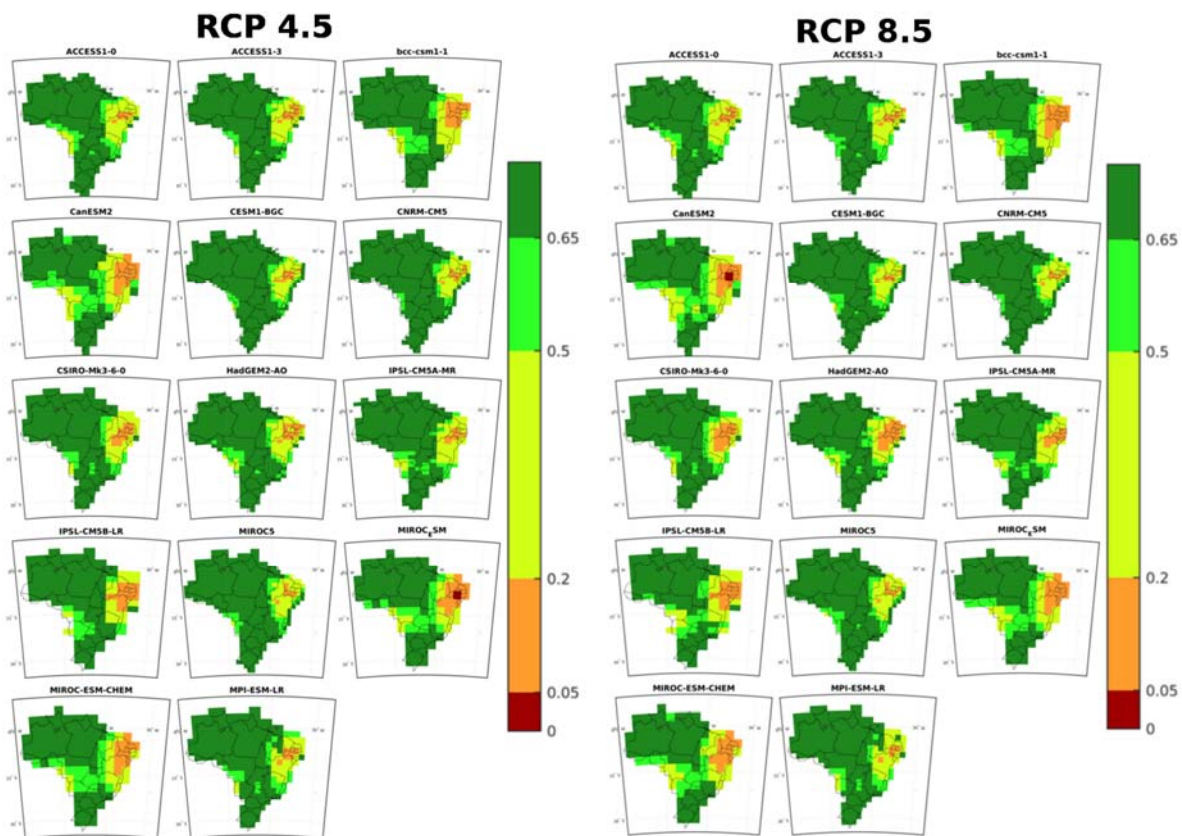


Figura 5. Distribuição espacial do IA para o período de 2010-2039.

Quanto ao período de meados do século XXI, são observadas sensíveis mudanças na distribuição do índice de aridez pelo país, como mostrado na Figura 6. Não há grandes variações projetadas pelos modelos para ambos os cenários, se comparados o período histórico e o período em questão. No entanto para as regiões Nordeste e Centro-Oeste, percebe-se que alguns dos modelos apontam aumento da aridez enquanto outros indicam diminuição do mesmo.

No Centro-Oeste, para ambos os cenários analisados, verifica-se a diminuição da aridez na região conforme o modelo ACCESS 1-3, enquanto que os modelos CanESM2 e MIROC-ESM apresentam aumentos discretos. Na RCP 4.5 o modelo CanESM2 e na RCP 8.5 os modelos bcc-csm1-1 e CanESM2 apontam para um aumento da aridez na Região Nordeste, que poderá acarretar na mudança de alguns pontos de clima para a classificação de árido. Os modelos IPSL-CM5A-MR e MPI-ESM-LR, no entanto, apontam para o aumento da umidade na região.

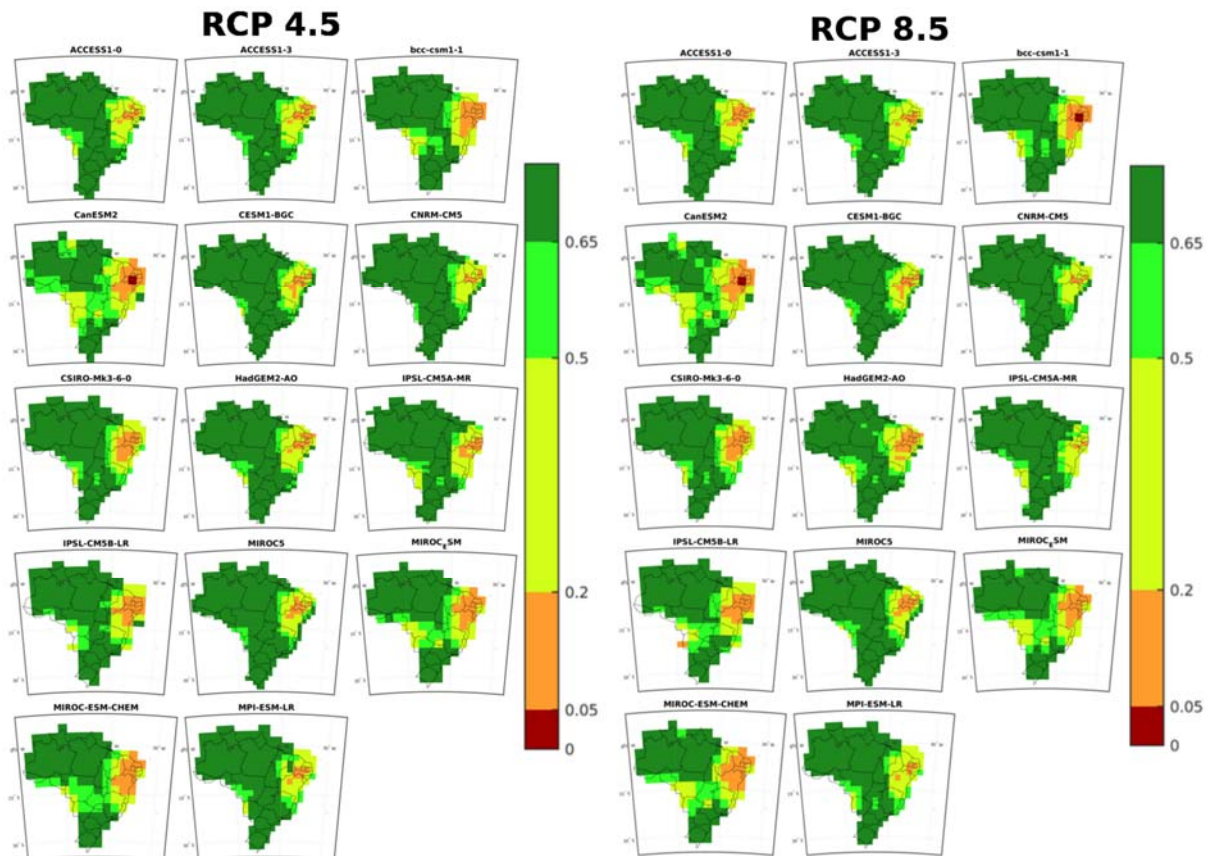


Figura 6. Distribuição do IA para o período de 2040-2069.

A Figura 7 mostra a possível distribuição do índice de aridez pelo país no final do presente século. A maioria dos modelos apontam, em ambas as RCP's, uma expansão do semiárido Nordestino. Na Região Centro-Oeste poderá haver predominância do clima semiárido. A Região Norte, para a qual a análise das Figuras 2 e 3 mostrou uma diminuição do índice de aridez médio da região, o clima sub-úmido úmido prevalece ao longo de seu território. Contudo, alguns modelos em especial na RCP 8.5 apontam para o aumento de climas mais áridos em parte do Pará, o que acarreta na diminuição do índice de aridez médio da região. As demais regiões seguem sem

grandes modificações na distribuição espacial do índice de aridez. Apenas o modelo MIROC-ESM aponta para um aumento de climas mais áridos para a Região Sudeste.

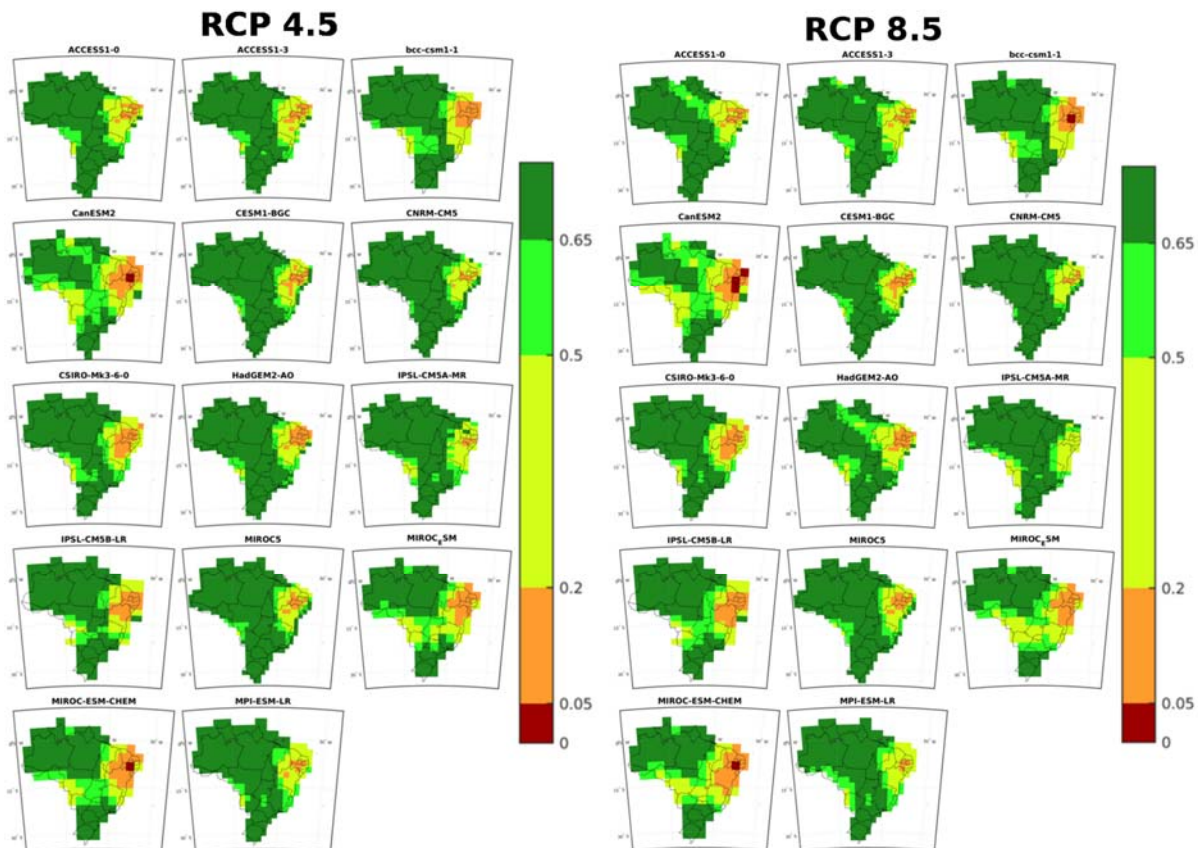


Figura 7. Distribuição espacial IA período 2070-2099.

Conclusões

Com base nos modelos analisados do IPCC-AR5, verificou-se a variabilidade entre os mesmos quanto às projeções do índice de aridez para todo o território nacional, bem como o mapeamento das regiões estudadas, o qual possibilitou uma visão mais ampla e objetiva do clima no decorrer do presente século.

A RCP 8.5 mesmo gerando cenários mais extremos, demonstrou resultados que se assemelham aos da RCP 4.5. No entanto, existem divergências entre os modelos, o que gera incertezas quanto ao futuro do quadro climático do país, embora se veja no geral uma tendência dos modelos

indicando a permanência dos climas atuais para as regiões Norte, Sudeste e Sul, e uma sinalização de aumento das zonas semiáridas na região Centro-Oeste e de zonas áridas na região Nordeste. O indicativo de aumento de climas áridos no Nordeste e Centro-Oeste brasileiro aliado a fatores como crescimento da demanda por energia, alimentos e água sugere que medidas de infraestrutura venham a ser tomadas em ambas as regiões, a fim de mitigar as possíveis mudanças e assim possibilitar um fornecimento adequado do lado da oferta, gerando um abastecimento que garanta as condições mínimas de desenvolvimento pelos múltiplos usuários finais. Projetos como a transposição do rio São Francisco para as demais regiões do Nordeste é uma iniciativa que visa auxiliar nos problemas de abastecimento, por ser este um problema vivenciado há tempos nesta região. Assim, as possíveis consequências das mudanças climáticas trazem consigo uma preocupação atual, pois necessitam ser vistas a fim de manter a confiabilidade dos sistemas de abastecimento de água no país, mediante uma boa gestão dos recursos disponíveis.

A correção dos resultados dos modelos climáticos emergiu no mundo como um procedimento padrão nos estudos de impacto sobre mudanças climáticas mais recentes, através de métodos numéricos que quantificam o erro, como demonstrado por Chen *et al.* (2015), Kingston *et al.* (2015) e Dale *et al.* (2017). Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se mensurar às incertezas inerentes aos modelos, pois a validade desta suposição tem implicações importantes para os estudos de impacto e precisa ser verificada para tratar adequadamente as incertezas nas futuras projeções climáticas.

Referências bibliográficas

- Banco Mundial (2010) *Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010: A mudança do clima e o desenvolvimento*, UNESP, São Paulo, 50pp.
- Caitano, R. F., Lopes, F. B., Teixeira, A. S. (2011) Estimativa da aridez no Estado do Ceará usando Sistemas de Informação Geográfica. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba-PR, Brasil*.
- Chen, J., Brissette, F. P., Lucas-Picher, P. (2015) Assessing the limits of bias-correcting climate model outputs for climate change impact studies, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**(3), 1123–1136. doi:10.1002/2014JD022635.
- Brasil, Conselho Nacional do Meio Ambiente (1997) *Resolução CONAMA nº 238 de 22 de dezembro de 1997*. Publicação Diário Oficial da União, Brasília-DF, 23 de dezembro de 1997. Acesso em 28 de julho de 2017, disponível em: <http://www.areaseg.com/conama/1997/238-1997.pdf>.
- Dale, A., Fant, C., Strzepek, K., Lickley, M., Solomon, S. (2017) Climate model uncertainty in impact assessments for agriculture: A multi-ensemble case study on maize in sub-Saharan Africa, *Earth's Future*, **5**(3), 337–353. doi:10.1002/2017EF000539.
- Guimarães, S. O, Costa, A. A., Vasconcelos Júnior, F. C., Silva, E. M., Sales, M. C., Araújo Júnior, L. M., Souza, S. G. (2016) Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **31**(3), 337-365. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631320150150>
- Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1985) Reference crop evaporation from temperature. *Journal of Applied Engineering in Agriculture*, St Joseph, **1**(2), 96-99.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) *Climate Change 2007: The physical science basis*. Cambridge: IPCC, 18 pp.

- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2008) Climate Change 2014: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 pp.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. *Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- Kingston, D. G., Todd, M. C., Taylor, R. G., Thompson, J. R., Arnell, N. W. (2009) Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change, *Geophys. Res. Lett.*, **36**(20), L20403, doi:10.1029/2009GL040267.
- Lopes, I., Leal, B. G. (2015) Índice de aridez e tendência a desertificação para estações meteorológicas nos Estados da Bahia e Pernambuco, *Revista Brasileira de Climatologia*, **17**, 155-172.
- Lopes, I., Santos, S. M., Leal, B. G., Melo, J. M. M. (2017) Variação do índice de aridez e tendência climática à desertificação para a região semiárida do nordeste brasileiro, *Revista Brasileira de Geografia Física*, **10** (4), 1014-1026.
- Marengo, J. A., Alves, L. M., Beserra, E. A., Lacerda, F. F. (2011) *Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro*, in: Medeiros, S. de S., Gheyi, H. R., Galvão, C. de O., Paz, V. P da S. (Orgs.), Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas, INSA, Campina Grande, 383-416pp.
- Matallo Junior, H. A. (2003) Desertificação no mundo e no Brasil. In: SCHENKEL, C.S. e MATALLO JR, H (Org). Desertificação. Brasília: UNESCO.
- PBMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (2012) Sumário Executivo do Volume 1 - Base Científica das Mudanças Climáticas. *Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1º Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*. Brasil: Volume Especial para a Rio+20, 34pp.
- Penman, H. L. (1953) The Physical bases of irrigation control. In: *International Horticultural Congress*, **13**, 1953, London. Report... London: Royal Horticultural Society. 913-924pp.
- Pereira, A. R.; Vila Nova, N. A.; Sediya, G. C. (1997) Evapotranspiração. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiros: FEALQ, Piracicaba, 183pp.
- Raimundo, C. do C. (2017) *Análise de impacto das mudanças climáticas no setor de recursos hídricos: uma crítica sobre o cálculo de evapotranspiração potencial (eto) em estudos desta natureza*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 226pp.
- Silveira, C. S., Souza Filho, F. D. A., Costa, A. A., Cabral, S. L. (2013) Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região nordeste do Brasil, Amazônia e bacia da prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **28**(3), 317-330.
- Thornthwaite, C. W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, **38**(1), 55-94.
- UEA, University East Anglia (2015) Climatic Research Unit, CRU. Acesso em 05 de julho de 2017, disponível em: <http://www.cru.uea.ac.uk/>.
- UNEP, United Nations Environment Programme (1992) World atlas of desertification. Barrow, C.J. Edited by N. Middleton and D.S.G. Thomas. Edward Arnold, London, Land Degradation and Development, **3**(4), 249pp.