

PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS TO CORRELATE CLIMATIC VARIABLES IN THE RIO GRANDE DO NORTE

A.R.C GURGEL*, D.C. SALES, K.C. LIMA

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande de Norte*

augusto.rubim@ifrn.edu.br*

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0581-9475>*

Submitted April 23, 2023 - Accepted August 17, 2023

DOI: 10.15628/holos.2023.15369

ABSTRACT

In electricity generation, knowing how climate variables are related is important for strategic decision-making. The main objective of this research is to investigate the relationship between climate variables: air temperature, relative humidity, precipitation and wind speed simulated from a Regional Climate Model for the north coast of Rio Grande do Norte during the recent past (1986 to 2005). The data are simulated by the RegCM4.7 model

and the results obtained from the Principal Components Analysis technique. From the results, it was found that Principal Component 1 explained 75.74% of the variability of the data, and a very strong negative correlation was observed between wind speed and precipitation, thus, hydro wind complementarity was observed in the region.

KEYWORDS: Regional Climate Models, wind speed, precipitation, temperature, Relative humidity.

ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA CORRELACIONAR VARIÁVEIS CLIMÁTICAS SOBRE A REGIÃO DO RIO GRANDE DO NORTE

RESUMO

Na Geração de energia elétrica, saber como as variáveis climáticas se relacionam é importante para tomada de decisões estratégicas. Esta pesquisa tem como objetivo principal averiguar a relação entre as variáveis climáticas: temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento simuladas a partir de um Modelo Climático Regional para o litoral norte do Rio Grande do Norte durante o passado recente (1986 a 2005). Os dados

são simulados pelo modelo RegCM4.7 e os resultados obtidos a partir da técnica de Análise de Componentes Principais. A partir dos resultados, obteve-se que a Componente Principal 1 explicou 75,74% da variabilidade dos dados, e observou-se correlação negativa muito forte entre velocidade do vento e precipitação, deste modo, observada complementaridade hidro eólica na região.

Palavras chave: Modelos Climáticos Regionais, Velocidade do vento, precipitação, temperatura, umidade relativa do ar.

1. INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil (NEB) é uma região altamente vulnerável às mudanças climáticas devido aos seus baixos índices de desenvolvimento socioeconômico (TEIXEIRA, SILVA, FONTENELLE, SANTOS & PESSOA, 2021). Uma das principais causas das mudanças climáticas é o aumento da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), tais como: o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). Essas emissões estão associadas principalmente à queima de combustíveis fósseis para uma a produção de energia cada vez mais requisitada pela sociedade

mundial. Essas alterações do clima estão relacionadas com o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, como: secas, inundações, tempestades, incêndios florestais e deslizamentos de terra na região, prejudicando assim, o funcionamento de diversos setores estratégicos como o desenvolvimento da agricultura local, economia, saúde, energia e meio ambiente (MARENGO et al., 2022).

Neste sentido, um dos caminhos para mitigar as mudanças climáticas é a produção de energia elétrica a partir de fontes de energias renováveis. Entre as fontes, destacam-se a energia eólica, solar, hidrelétrica, biomassa e geotérmica. Para a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2020) a energia solar e eólica são as fontes mais utilizadas e a produção destas vem aumentando significativamente em países da Europa e da Ásia. No Brasil, investimentos no setor de energias renováveis têm sido realizados, em parte, devido às frequentes crises hídricas que impactam a produção de energia hidrelétrica (MOURA, 2022). Pelo fato da energia hidrelétrica corresponder a uma grande parte do total de energia produzida no país, há uma busca para diversificar sua matriz energética, a fim de não depender exclusivamente dessa fonte.

No Brasil, o primeiro passo para o desenvolvimento da energia eólica foi a instalação de uma torre em Fernando de Noronha (PE) no ano de 1992, gerando cerca de 1 MW de energia. A implementação de parques eólicos no país avançou a partir dos anos 2000 com o apoio de políticas públicas, especialmente, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) (ABEEÓLICA, 2023). Segundo o *Global Wind Energy Council* (2021), em 2020 havia um total de 707,4 GW de energia eólica *onshore* instalado no mundo, com o Brasil ocupando a sétima colocação, gerando 3% da energia total. No país, o ano de 2020 terminou com 686 usinas e 17,75 GW de potência eólica instalada, apresentando-se como a segunda maior fonte produtora de energia, totalizando 10,1% da produção elétrica, com predominância de geração nos estados do NEB, entre eles, Bahia, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí (ABEEÓLICA, 2020).

No NEB, quatro regiões se destacam na produção de energia eólica: A costa cearense, o litoral do Rio Grande do Norte, a região do planalto da Borborema entre os estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e o agreste de Pernambuco e a região central da Bahia. O litoral norte do Rio Grande do Norte e do Ceará possuem condições favoráveis para o desenvolvimento de projetos eólicos, devido à presença de brisas marítimas e à influência da Zona de Convergência Intertropical (KOUSKY, 1979; UVO, 1989). A região do planalto da Borborema é ideal para o funcionamento de parques eólicos, com ventos fortes e constantes, especialmente durante a estação seca (2º semestre do ano), além disso apresentam áreas planas e ausência de cobertura vegetal que favorecem a produção de energia eólica (NUNES, 2006; DINIZ & PEREIRA, 2015). A região central da Bahia apresenta topografia plana, ventos constantes e de boa intensidade, o que favorece a instalação de parques eólicos, sendo um fator importante para a produção de energia eólica (ANEEL, 2011).

Avaliar o comportamento de variáveis climáticas em uma determinada área torna-se essencial para uma melhor compreensão do clima da região, e entender como o impacto das mudanças climáticas possam ocorrer. Esse tipo de informação prepara os governantes a tomarem decisões estratégicas. Uma técnica estatística bastante utilizada é a Análise de Componentes Principais (ACP), que consiste em aplicar uma análise multivariada utilizada para identificar e quantificar relações entre diversas variáveis, podendo ser aplicada para qualquer área de

climatologia (JOLLIFFE, 2002). Prado et al. (2016) utilizaram a ACP para avaliar as variáveis climáticas (umidade relativa do ar, precipitação, amplitude térmica, temperatura do ar, temperatura máxima e mínima) na cidade de Uberlândia (MG). Encontrou-se que a Componente Principal 1 (CP₁) conseguiu explicar 70,59% da variação total do modelo, caracterizando os meses de dezembro a março como úmidos, chuvosos e com pouca variação de temperatura.

A partir do contexto apresentado, esta pesquisa tem como objetivo principal averiguar a relação entre as variáveis climáticas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento) simuladas a partir de um Modelo Climático Regional para o litoral norte do Rio Grande do Norte durante o período chamado de passado recente, compreendido entre 1986 a 2005.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo é o litoral norte do estado do Rio Grande do Norte (N-RN, retângulo preto – Figura 1). Essa área foi escolhida devido à grande quantidade de parques eólicos instalados.

Essa área apresenta os dois tipos climáticos do Rio Grande do Norte: Tropical do Nordeste Oriental e Tropical de Zona Equatorial, sendo a Tropical de Zona Equatorial adotada nesta pesquisa. Uma parte da região leste é caracterizada como semiárida úmida, apresentando de quatro a cinco meses secos, enquanto as demais áreas são caracterizadas como semiáridas, apresentando entre 7 a 8 meses secos. O clima tropical de Zona Equatorial ocupa a maior parte do RN e apresenta característica de chuvas intensas de fevereiro a maio (DINIZ & PEREIRA, 2015).

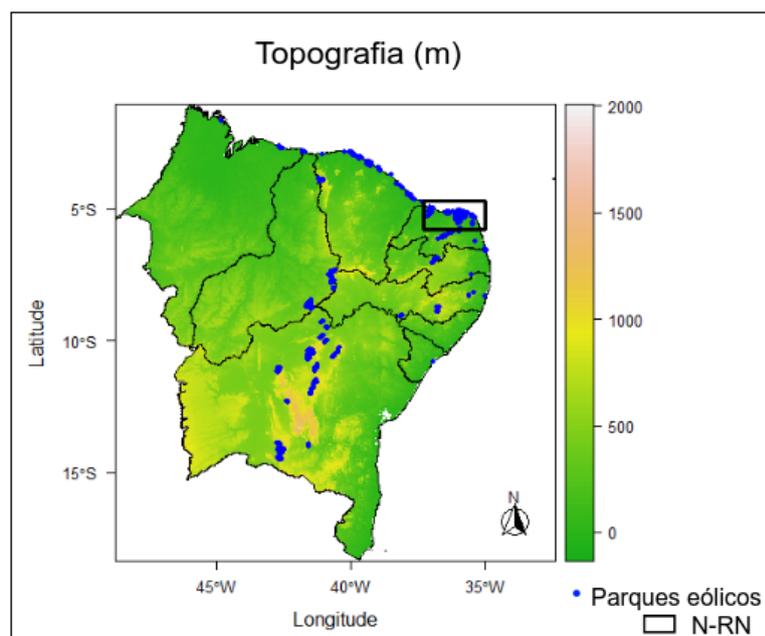


Figura 1: Região do NEB com a área de estudo recortada em um retângulo preto sobre o norte do Rio Grande do Norte. Pontos azuis representam os parques eólicos na região.

2.2 Dados

Para a realização desta pesquisa, utilizou-se o Modelo Climático Regional (MCR) RegCM4.7 (*Regional Climate Model, version 4.7*, GIORGI & EILGUINDI, 2013). Esse MCR foi forçado por um modelo climático global, o HadGEM2-ES (*Hadley Centre Global Environmental Model, Version 2 - Earth System*, COLLINS et al., 2008). Os dados foram adquiridos no âmbito do projeto CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*, GIORGI et al., 2009). Este é um projeto que padroniza simulações de grupos de pesquisa que utilizam a técnica de *downscaling* dinâmico no contexto de estudos de mudanças climáticas. Os dados de diversos modelos estão disponibilizados, e o conjunto RegCM4.7/HadGEM2-ES foi escolhido porque em avaliações anteriores pelos autores, verificou-se que este é o melhor modelo que representa o clima na área de estudo.

As seguintes variáveis climáticas foram utilizadas: temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m/s), todas ao nível de 2m, e precipitação acumulada média (mm/mês), para o período passado recente, nos anos de 1986 a 2005. Esse período corresponde ao experimento “*historical*” do conjunto de cenários RCPs (*Representative Concentration Pathways*, MOSS et al., 2010).

Além disso, para comparação entre os dados do modelo e os observados para a área em estudo, foram utilizadas as variáveis meteorológicas supracitadas proveniente da base de dados do Xavier, Scanlon, King e Alves (2022).

2.3 Metodologia

Nesta pesquisa será utilizada a Análise de Componentes Principais (ACP), com objetivo de correlacionar as variáveis climáticas supracitadas com os produtos do MCR RegCM4.7. Trata-se de um método multivariado, cujo principal objetivo é explicar a estrutura de variância e covariância de um vetor aleatório, composto de n -variáveis aleatórias, por intermédio da construção de combinações lineares das variáveis originais de um conjunto (HONGYU, SANDANIELO & DE OLIVEIRA JUNIOR, 2016). Nessa técnica estatística um conjunto menor de variáveis não correlacionadas que apresentam a maior parte das informações do conjunto original são obtidas por uma transformação linear de um conjunto original de variáveis as quais estão inicialmente correlacionados entre si (HONGYU et al., 2016). Para Lattin, Carroll e Green (2011), essa técnica permite que o pesquisador reorienta os dados de modo que as primeiras poucas dimensões expliquem o maior número possível de informações disponíveis.

Dessa forma, observando um conjunto de n -variáveis originais, $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$, pertencentes a n indivíduos ou populações, a ACP transforma o conjunto original em um novo conjunto de variáveis $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$, com equivalente dimensão, chamados de componentes principais. Assim, cada componente principal gerado provém de uma combinação linear das variáveis originais, que capturam ao máximo possível a variância das variáveis originais observadas (MATOS & RODRIGUES, 2019). A CP_1 explica a maior parte da variação total dos dados originais, a CP_2 explica a segunda maior variação dos dados originais, e assim sucessivamente até que toda a variação dos dados seja totalmente explicada.

A ACP é representada matematicamente pela Equação (1):

$$Cp_i = a_{1i}Y_1 + a_{2i}Y_2 + \dots + a_{ni}Y_n \quad (1)$$

Cp_i corresponde a i -ésima componente principal, a_{ji} são os coeficientes da componente principal, Y_j é o valor da j -ésima variável e n é o número de variáveis (MATOS & RODRIGUES, 2019).

O teste de esfericidade de Bartlett foi aplicado para verificar se há indícios das variáveis originais apresentarem correlações significativas. Este teste avalia em que medida a matriz de covariância é similar a uma matriz identidade com determinante igual a um. A hipótese nula precisa ser rejeitada (H_0 = a matriz de correlações é uma matriz identidade) com nível de significância ($p < 0,05$) para verificar a adequação da análise de componentes principais (HAIR, BLACK, BABIN, ANDERSON & TATHAM, 2009; HONGYU, 2018).

Após obtidos os coeficientes de CP, aplicou-se o método de rotação de fatores ortogonais Varimax para reduzir as variáveis com altas cargas em um fator. Este passo, tem como objetivo maximizar as variações entre os pesos de cada componente principal (KAISER, 1958).

Por fim, para averiguar o comportamento das variáveis climáticas, aqui utilizadas, na área de estudo, será empregado, a classificação dos coeficientes de correlação de Pearson sugerida por Devore (2006), com intuito de classificar esse índice estatístico (Tabela 1):

Tabela 1: Classificação dos coeficientes de correlação de Pearson. Fonte: Devore (2006).

Classificação	Intervalo de r
Muito Fraca	0,00 a 0,19
Fraca	0,20 a 0,39
Moderada	0,40 a 0,69
Forte	0,70 a 0,89
Muito Forte	0,90 a 1,00

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 apresenta-se a distribuição mensal da (a) precipitação, (b) umidade relativa do ar, (c) velocidade do vento e (d) temperatura do ar (observação e modelo) para o norte do Rio Grande do Norte referente ao passado recente de 1986 a 2005.

Na Figura 2(a) nota-se que na estação chuvosa (fevereiro a maio) registra acumulados máximo de 564,3 mm para o mês de abril, com mediana máxima observada em março de 179,25 mm. O modelo RegCM4.7 apresenta o mesmo padrão para o período, entretanto superestima os valores observados e com maior variabilidade. O MCR RegCM4.7 apresenta picos de chuva nos meses de abril e maio, com registros superiores a 1000 mm/mês. Em março apresenta maior mediana, com 480 mm, superestimando o dado observado em 167%. Esse problema de alta superestimação para a estação chuvosa do MCR RegCM4.7 comparado aos dados observados foram encontrados por Silva, Gomes, Silveira e Sakamoto (2020) em estudo para a cidade de Fortaleza/CE no período de 1970 a 2005.

Durante a estação seca, que se estendeu por sete meses (junho a dezembro) se verificou medianas dos acumulados mensais inferiores a 50 mm/mês (Figura 2a). Para essa época do ano, os dados observados e estimados do MCR RegCM4.7 apresentaram resultados semelhantes. No mês de transição entre a estação chuvosa e seca (junho) o RegCM4.7 subestima o acumulado de

precipitação em comparação ao dado observado, entretanto, apresenta *outliers* que captam precipitação máxima superior ao dado observado.

Segundo Giorgi et al. (2012) o modelo RegCM4 conta com três parametrizações físicas para convecção *cumulus*. O primeiro é um esquema *cumulus* simplificado de Kuo (ANTHES et al., 1987), o segundo é o esquema de Grell (GIORGI et al., 1993) sendo o mais utilizado, e o terceiro esquema é o MIT (EMANUEL, 1991; EMANUEL & ZIVKOVIC ROTHMAN, 1999). Experimentos mostram a capacidade desse modelo em utilizar diferentes esquemas de parametrização sobre o oceano e a terra, utilizando-se, portanto, uma “convecção misturada”. Observa-se que o MIT tende a simular precipitação excessiva sobre o continente enquanto o esquema de Grell tende a simular precipitação excessivamente fraca sobre oceanos. Dessa forma, em geral, utiliza-se o esquema MIT no oceano e Grell no continente. Nesta pesquisa, a área estudada encontra-se em região de transição oceano-continente. A superestimação da precipitação em relação ao dado observado pode ser proveniente da superestimação do esquema MIT no oceano.

Pareja-Quispe, Franchito e Fernandez (2021) compararam a precipitação do modelo RegCM4 com a base de dados observados do CRU na América do Sul. Encontrou-se uma alta superestimação dos valores de precipitação para o NEB principalmente na estação chuvosa (março a maio). Para esses autores, essa alta superestimação ocorre devido ao fato de que o modelo RegCM4 é incapaz de realizar boa simulação de precipitação em regiões de contraste oceano-superfície.

Em relação ao clima da região, um dos sistemas atmosféricos que atua principalmente na área litorânea norte do NEB é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). No outono, esse sistema atinge a sua posição mais ao sul, caracterizando a estação chuvosa na região, tornando-a mais úmida e apresentando meses com temperaturas mais baixas e velocidades dos ventos menos intensas. Nas demais estações, a ZCIT migra para o norte, e o ramo descendente austral atinge essa região inibindo a precipitação (REBOITA, KRUSCHE, AMBRIZZI & ROCHA, 2012), corroborando com o que se observa na Figura 2.

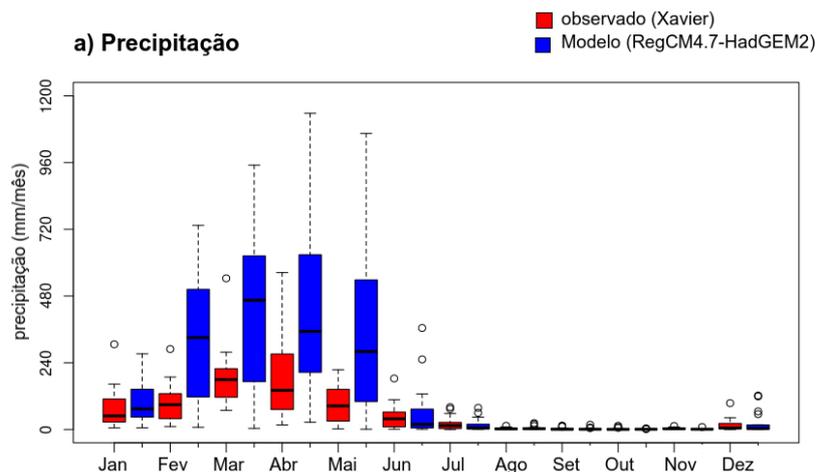
Quanto à umidade relativa do ar (Figura 2b), segundo os dados observados, os meses com maiores registros são observados na estação chuvosa. O MCR RegCM4.7 apresenta padrão semelhante, com crescimento da umidade relativa do ar de março a abril. Entretanto, o RegCM4.7 apresenta a maior mediana no mês de março com 79,9%, coincidindo com o mês de maior precipitação. Já para o observado, ocorreu no mês mais úmido (abril), com mediana de 78,65%. Com relação a estação seca, a umidade relativa do ar também apresenta diminuição, com medianas mensais inferiores a 70% (julho a dezembro) para o MCR RegCM4.7, entretanto para o dado observado, somente a partir de agosto observa-se mediana inferior a 70%. Outubro é o mês que apresenta menor mediana, registrando 63,73%, enquanto para esse mês o RegCM4.7 simula valores em 59,25%. Para essa variável, o RegCM4.7 superestima na estação chuvosa e, subestima na estação seca.

Em relação à velocidade do vento (Figura 2c) foram obtidos maiores valores na estação seca da região, enquanto valores reduzidos são observados na estação chuvosa, tanto nos observados quanto nos estimados. Nos meses de janeiro a abril, registraram as menores medianas observadas, inferiores a 4 m/s, enquanto o modelo simula valores inferiores a 5 m/s de fevereiro a abril. Em

maio, a mediana supera os 6m/s para os dados simulados pelo RegCM4.7, o que garante valor mínimo para a produção de energia (AMARANTE, BROWER, ZACK & SÁ, 2001), enquanto os dados observados pelo Xavier et al. (2022) continuam com mediana inferior a 4m/s. A mediana registrada para o mês de janeiro pelo RegCM4.7 é de 6,68 m/s, por outro lado, os dados observados apresentam 3,73 m/s, ou seja, o modelo superestima os valores observados em 79% para esse mês. Em relação ao período seco, as medianas das velocidades dos ventos são as maiores, com o mês de setembro apresentando a maior mediana e valor máximo registrado de 9,9 m/s para o modelo RegCM4.7, enquanto o dado observado do Xavier et al. (2022) apresenta velocidade máxima registrada de 5,26 m/s.

Por fim, quanto à temperatura do ar (Figura 2d), sua variação é pequena com medianas diminuindo (janeiro a junho). De uma forma geral, o modelo RegCM4.7 subestima os valores encontrados. A mediana da temperatura do ar aumenta de junho a novembro e começa a decrescer em dezembro para ambos.

Além disso, os valores de índice de correlação obtido entre as duas bases de dados (observado e modelo), demonstram classificação moderada entre os dados de velocidade do vento ($r=0,58$), umidade relativa do ar ($r=0,63$), precipitação ($r=0,56$), e temperatura do ar ($r=0,55$). Em todos os testes foi obtida significância estatística entre os dados. Neste sentido, apesar dos erros de viés, o MCR, representa de forma satisfatória as variáveis analisadas, dessa forma, a pesquisa foi desenvolvida utilizando-se o modelo RegCM4.7.



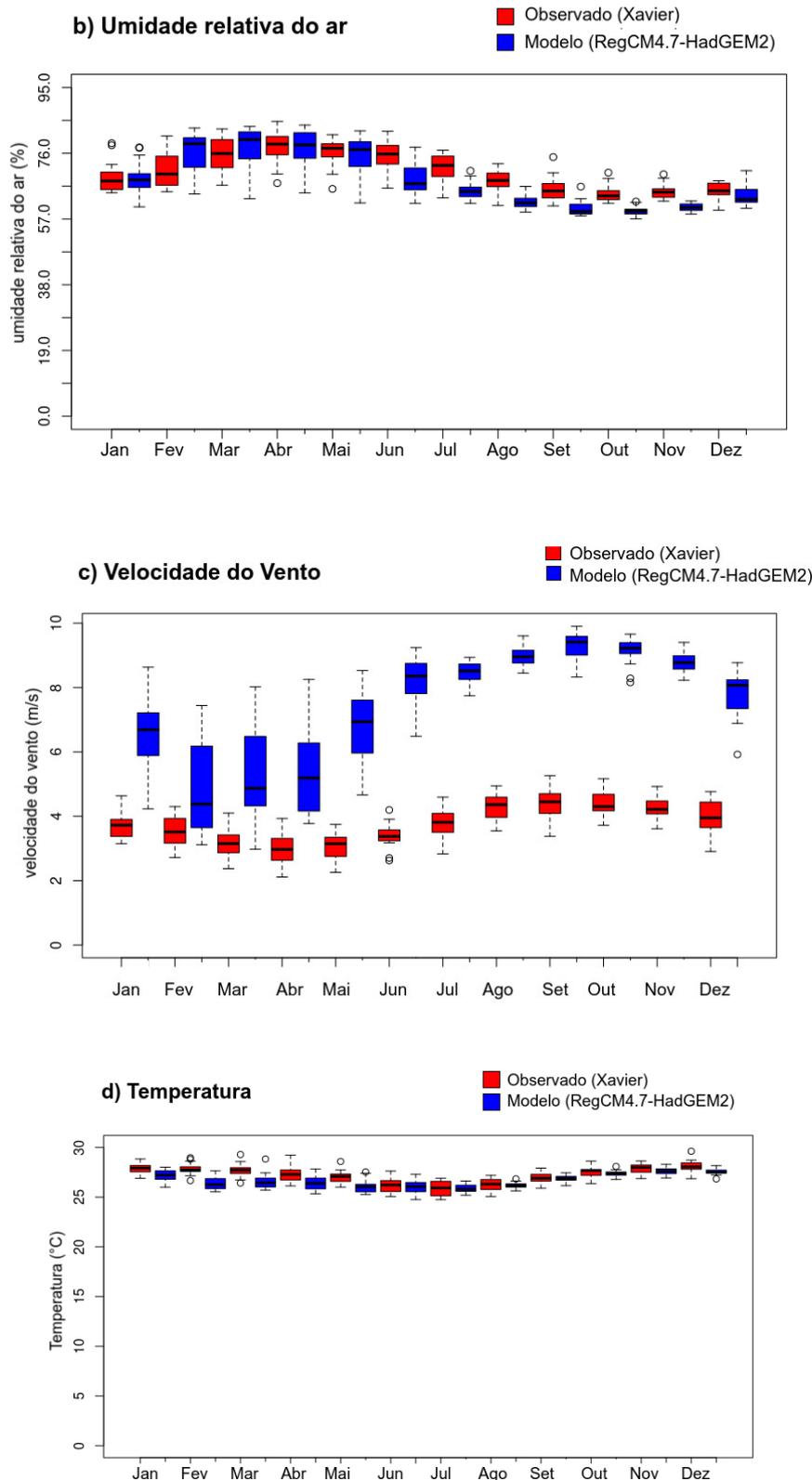


Figura 2: Distribuição mensal das variáveis climáticas: a) precipitação acumulada mensal, b) umidade relativa do ar, c) velocidade do vento e d) temperatura do ar no norte do Rio Grande do Norte referente ao passado recente (1986-2005), a partir do dado observado (boxplot em vermelho) e o MCR RegCM4.7 (boxplot azul).

Para realização da ACP nos dados do MCR RegCM4.7 realizou-se o teste de esfericidade de Bartlett. O resultado confirma, com 5% de significância, uma correlação significativa, ou seja, ao

menos uma das correlações entre as variáveis estudadas é significativamente diferente de zero, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Valores obtidos para o teste de Bartlett para as variáveis climáticas no norte do Rio Grande do Norte para o período passado recente (1986 a 2005).

K² (valor observado)	229.94
P-valor	2,2x10 ⁻¹⁶

Após a realização da ACP, obteve-se a CP₁ extraída do conjunto de variáveis climáticas aqui utilizadas. A CP₁ consegue explicar 75,75% da variabilidade dos dados e apresenta autovalor relacionado a ele de 1,7406. A CP₂ explica 21,67% da variação dos dados, a qual apresenta autovalor de 0,9311. As informações das demais CP são apresentadas na Tabela 3. Os resultados dos autovalores são importantes, já que mensuram a variação retida por cada CP. O critério de Kaiser (KAISER, 1958), usado por diversos pesquisadores, determinam que autovalores acima de 1, são utilizados para selecionar os CP. Dessa forma, a CP₁ aqui obtida já é altamente explicativa para essa pesquisa.

Tabela 3: Autovalores e as variabilidades de cada componente principal das variáveis climáticas estudadas no norte do Rio Grande do Norte para o período passado recente (1986 a 2005).

	CP1	CP2	CP3	CP4
Autovalor	1,7406	0,9311	0,2951	0,1260
Variabilidade explicada (%)	75,75	21,67	2,18	0,40
Variabilidade acumulada (%)	75,75	97,42	99,60	100,00

Os autovetores dos CP, também foram analisados e são apresentados na Tabela 4. Utiliza-se nessa etapa a rotação varimax para maximizar os pesos das CP. Os valores positivos mostram uma relação diretamente proporcional entre o componente e a respectiva variável, enquanto valores negativos mostram uma relação inversamente proporcional. Portanto, a CP₁ representa os meses com valores de velocidade dos ventos mais intensos e temperaturas mais elevadas, associado aos meses que apresentaram menores índices de precipitação e umidade relativa. Neste sentido, a Figura 2, se refere ao segundo semestre do ano.

Tabela 4: Autovetores dos componentes principais extraídos das variáveis climáticas estudadas no norte do Rio Grande do Norte para o período passado recente (1986-2005).

Variáveis	CP1	CP2	CP3	CP4
Velocidade do Vento (m/s)	0,5397	0,3015	0,6351	0,4630
Temperatura do ar (°C)	0,2769	-0,9403	0,0789	0,1814
Umidade relativa do ar (%)	-0,5711	-0,0193	-0,0993	0,8146
Precipitação (mm/mês)	-0,5531	-0,1564	0,7619	-0,2985

Assim, a equação para a CP₁, levando-se em consideração os pesos de cada variável em quatro casas decimais, é mostrado na Equação (2):

$$CP_1 = 0,5397Y_1 + 0,2769Y_2 - 0,5711Y_3 - 0,5531Y_4 \quad (2)$$

Além da obtenção dos escores para os CP, podem-se obter para a CP₁ em relação aos meses do ano. Conforme apresentado na Tabela 5, os escores positivos estão associados aos meses de junho a dezembro, ou seja, corresponde à estação do ano com as velocidades dos ventos mais intensas, temperaturas do ar mais elevadas e baixa precipitação e umidade relativa do ar. Por outro

lado, os meses de janeiro a maio apresentam os escores negativos, e estão associados aos meses com maiores acumulados de precipitação, e umidade relativa do ar, e de baixas intensidades de velocidades dos ventos e temperaturas do ar.

Tabela 5: Escores da CP₁ relacionados aos meses do ano das variáveis climáticas estudadas no norte do Rio Grande do Norte para o período passado recente (1986-2005).

Mês	CP1
Janeiro	-0,02270164
Fevereiro	-2,26094140
Março	-2,39526046
Abril	-2,40250336
Maió	-1,68158297
Junho	0,15608181
Julho	0,56286271
Agosto	1,17854611
Setembro	1,75340199
Outubro	2,00496381
Novembro	1,89150630
Dezembro	1,21562709

A CP₁ representa o eixo das abscissas, no qual o primeiro e quarto quadrantes, correspondem às variáveis positivas, enquanto, o segundo e terceiro quadrantes, correspondem às coordenadas negativas (ou seja, os meses menos associados a CP₁) (Figura 3). Esse resultado demonstra o poder das CP em capturar bem o clima da área de estudo. Os meses 8 (agosto) a 12 (dezembro) estão presentes no primeiro e quarto quadrante, período do ano característico de ventos mais fortes e temperaturas do ar elevadas. Por outro lado, os meses 2 (fevereiro) a 5 (maio) são evidentes no segundo e terceiro quadrante, característicos de meses com alta precipitação e umidade relativa do ar. Observa-se que o mês 1 (Janeiro) encontra-se próximo ao centro do terceiro e quarto quadrante, enquanto os meses 6 (junho) e 7 (julho), no primeiro e segundo quadrante. Esses meses podem ser caracterizados como de transição das estações chuvosa e seca, e vice-versa.

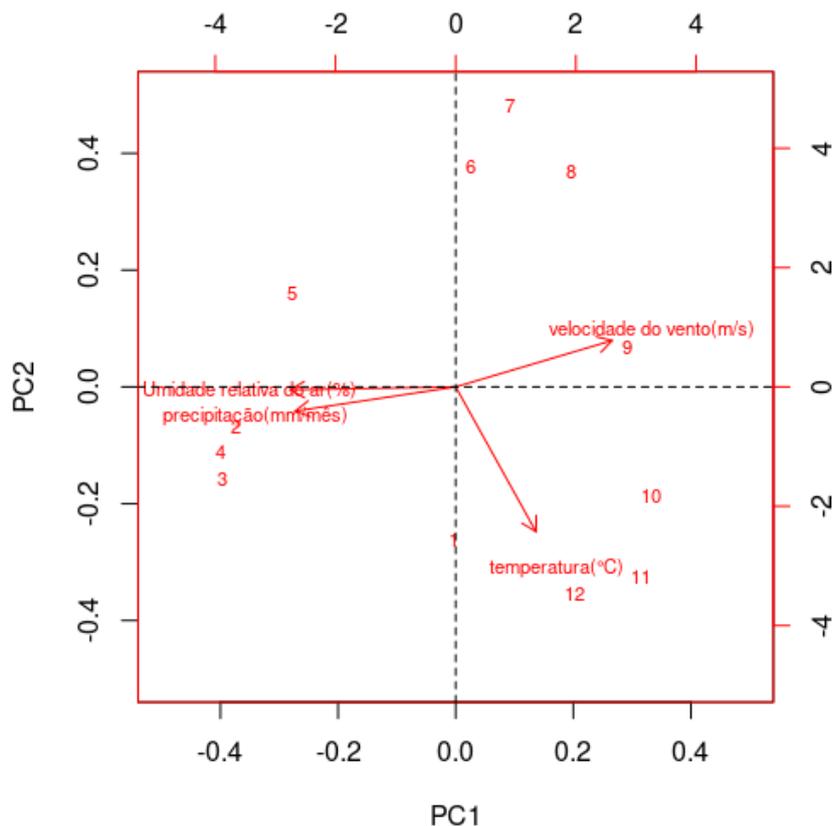


Figura 3: Biplot dos meses em relação às variáveis climáticas estudadas no norte do Rio Grande do Norte para o período passado recente (1986-2005). Os números de 1 a 12 representam os meses do ano.

Conforme observa-se, a velocidade do vento e a precipitação se correlacionam negativamente (-0,91) (Figura 4), isto é, ventos mais fracos ocorrem em grandes acumulados de precipitação, enquanto ventos mais fortes são observados quando tem-se baixas quantidades de precipitação. Ao confrontar com a umidade relativa do ar (%), percebeu-se correlação de -0,94.

Com relação à temperatura do ar, esta se correlaciona negativamente de forma moderada e fraca (-0,46 e -0,33), com a umidade relativa do ar e a precipitação, respectivamente, e correlaciona-se positivamente com a velocidade do vento (0,21), considerada fraca. Observou-se correlação positiva muito forte (0,95) entre umidade relativa do ar e a precipitação, ou seja, os meses que apresentam maiores valores de umidade são os meses com maiores acumulados de chuva. O teste t de *student* foi realizado e não foi encontrado significância entre a correlação da temperatura do ar com as demais variáveis, ou seja, a variação da temperatura não afeta variações nas demais variáveis.

Brito (2021) realizou estudo sobre focos ativos (locais que atingem temperaturas superiores a 47°C, sendo o principal meio para estimativa de incêndios florestais no país) no Rio Grande do Norte, e correlacionou as variáveis velocidade do vento, temperatura máxima do ar, precipitação e umidade relativa do ar em relação a variável foco ativo. Os dados obtidos foram provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esse autor obteve correlação moderada negativa entre velocidade do vento com a precipitação e umidade relativa do ar, e uma correlação fraca positiva com a temperatura máxima do ar.

Os fenômenos meteorológicos presentes no norte do Rio Grande do Norte são responsáveis pelos resultados observados. A região é influenciada principalmente pela atuação da ZCIT, que atinge sua posição mais ao sul nos meses de março a abril, representando períodos de alta precipitação e umidade relativa do ar. Tal condição está relacionada a anomalias positivas de temperatura de superfície do mar no Atlântico Sul Tropical e ventos alísios de sudeste mais fracos. Por outro lado, no inverno austral (nos meses de junho a agosto), a ZCIT migra para norte, ocorre um resfriamento do Atlântico Sul Tropical e os ventos alísios de sudeste se intensificam (UTIDA et al., 2019).

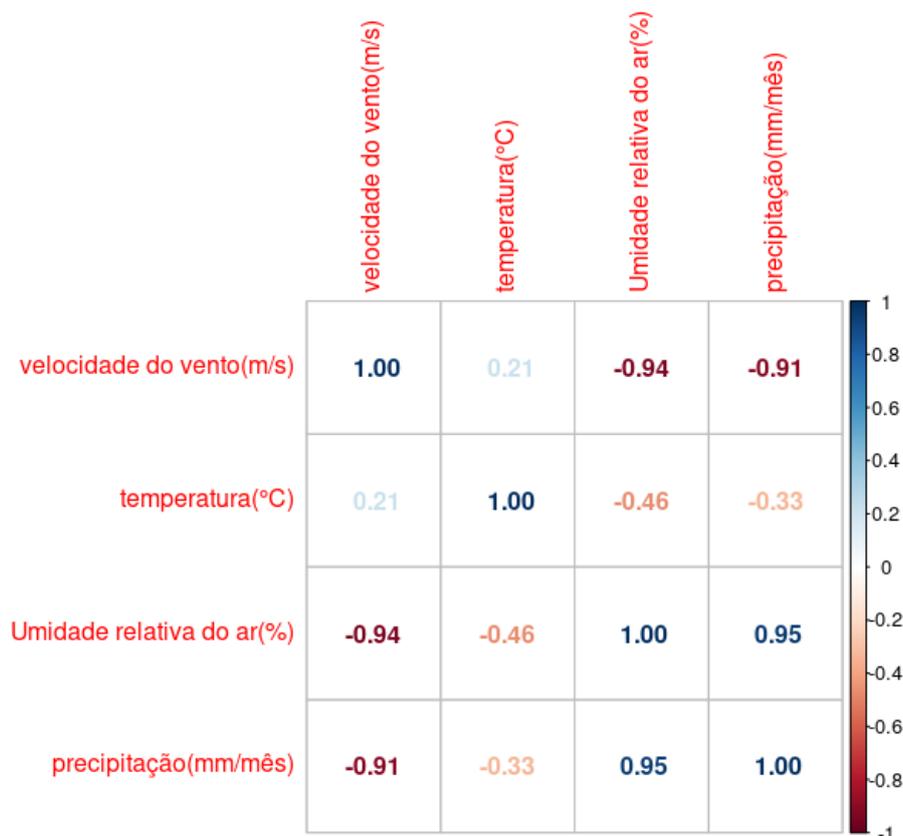


Figura 4: Correlograma entre as variáveis climáticas em estudo no norte do Rio Grande do Norte para o período passado recente (1986-2005).

Mediante o fato da velocidade do vento e a precipitação se correlacionarem negativamente, isso nos mostra uma informação importante quanto à complementaridade hidro eólica na produção de energia elétrica na área de estudo. Esta característica foi bem representada pelo MCR RegCM4.7, e mostra uma certa confiabilidade para utilizar as projeções climáticas futuras do modelo para, por exemplo, estudos de impactos de vulnerabilidade. Destaca-se ainda que, em épocas de seca, os reservatórios atingem valores abaixo da sua capacidade, diminuindo a capacidade de produção de energia hidroelétrica, isso leva ao acionamento de usinas termoelétricas para complementar a produção de energia elétrica nesse período. Diante desse fato e conforme mostrado na Figura 2, o norte do Rio Grande do Norte apresenta boas condições para geração de energia eólica em épocas de seca apresentando-se como uma solução para a produção de energia elétrica no país.

4 CONCLUSÕES

A técnica estatística utilizada nesta pesquisa, a saber, Análise de Componentes Principais (ACP), exibe boa capacidade de correlacionar variáveis que apresentam unidades distintas, uniformizando os pesos para as variáveis em estudo. A contribuição dessa pesquisa é apresentar uma solução para estudos de correlações de variáveis de unidades distintas, principalmente entre velocidade do vento e acumulado de precipitação a fim de saber como essas variáveis se relacionam em determinada área de estudo.

Vieses foram encontrados entre os dados observados e estimados, principalmente, para precipitação que apresentou alta superestimação para o primeiro semestre do ano. Apesar disso, os dados simulados conseguiram reproduzir satisfatoriamente o clima da área de estudo, e assim foram validados para utilização nessa pesquisa.

Os resultados foram satisfatórios, uma vez que a ACP reduziu a dimensão dos dados a uma única componente, que explicou 75,74% dos dados. Por meio dos escores das componentes principais em relação aos meses dos anos, observou-se que os maiores valores positivos ocorreram de setembro a novembro, sendo meses associados a velocidade dos ventos intensos e de baixos acumulados de precipitação e baixa umidade relativa do ar.

Notou-se correlação negativa forte entre a velocidade do vento e as variáveis de precipitação e umidade relativa do ar, ou seja, em meses de altos valores de acumulado de precipitação e de umidade relativa do ar indicou baixa velocidade do vento. Além disso, verificou-se que a complementaridade hidro eólica nessa região é eficaz, visto que a velocidade do vento, consegue produzir uma boa quantidade de energia elétrica durante todo o ano principalmente em meses de menor quantidade de precipitação (SCHMIDT, CANCELLA & PEREIRA, 2016).

Por fim, sugere-se estudos de potencial eólico para o norte do RN e para o NEB, com intuito de melhor visualização dessa complementaridade hidro eólica, bem como, entender a importância dessa região na produção de energia eólica para o país.

5 REFERÊNCIAS

- Agência Brasileira de Energia Eólica. (2020). Boletim anual de dados. Recuperado em 20 de março de 2023 de https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/04/PT_Boletim-Anual-de-Geracao_2020.pdf
- Agência Brasileira de Energia Eólica. (2023). O setor eólico. Recuperado em 06 de março de 2023 de <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/>
- Agência Nacional de Energia Elétrica. (2011). Atlas Eólico do Brasil. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro.
- Amarante, O. A. C., Brower, M., Zack, J., & Sá, A. L. (2001). Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro.
- Anthes, R. A., Hsie, E. Y., & Kuo, Y. H. (1987). Description of the Penn State/NCAR mesoscale model version 4 (MM4). Boulder: NCAR.

- Brito, B. M. N. (2021). Correlação entre variáveis meteorológicas e focos ativos para o Rio Grande do Norte. [Monografia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido]. *Repositório eletrônico da Ufersa*. Recuperado em 04 de abril de 2023 de <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/7104>.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Hinton, T., Jones, C. D., ... & Halloran, P. (2008). Evaluation of the HadGEM2 model (p. 48). Exeter, UK: Met Office.
- Devore, J. L. (2006). Probabilidade e estatística para engenharia e ciência. Thomson Pioneira.
- Diniz, M. T. M., & Pereira, V. H. C. (2015). Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima (3a ed., Vol. 35). *Boletim Goiano de Geografia*. 488-506.
- Emanuel, K. A. (1991). A scheme for representing cumulus convection in large-scale models (21th ed., Vol. 48). *Journal of the atmospheric sciences*, 2313-2329.
- Emanuel, K. A., & Živković-Rothman, M. (1999). Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models (11th ed., Vol. 56). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1766-1782.
- Giorgi, F., Marinucci, M. R., Bates, G. T., & De Canio, G. (1993). Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions (10th ed., Vol. 121). *Monthly Weather Review*, 2814-2832.
- Giorgi, F., Jones, C., & Asrar, G. R. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework (3th ed., Vol. 58). *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, 175.
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., ... & Brankovic, C. (2012). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. Vol 52, 7-29. *Climate Research*.
- Giorgi, F., & Elguindi, N. (2013). Model RegCM User's Guide Version 4.4. Recuperado em 18 de fevereiro de 2023 de http://154.66.220.45:3000/doc/_downloads/RegCM-UserGuide.pdf
- Global Wind Energy Council. (2021). Global Wind Report 2021. Recuperado em 15 de março de 2023 de <https://gwec.net/global-wind-report-2021/#Download>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2009). Análise multivariada de dados (6a ed.). Bookman editora.
- Hongyu, K., Sandanielo, V. L. M., & de Oliveira Junior, G. J. (2016). Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *E&S Engineering and Science*, 5(1), 83-90.
- Hongyu, K. (2018). Análise Fatorial Exploratória: resumo teórico, aplicação e interpretação. *E&S Engineering and Science*, 7(4), 88-103.
- International Renewable Energy Agency. (2020). Renewable energy statistics 2020. Recuperado de https://www.irena.org//media/files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2020.pdf?rev=3a5e14b11fe6434dbc3e59b7bbacd6e7

- Jolliffe, I. T. (2002). Principal component analysis for special types of data. In *Principal component analysis* (pp. 338-372). Springer.
- Kaiser, H. F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23(3), 187-200.
- Kousky, V. E. (1979). Frontal influences on northeast Brazil (9th ed., Vol. 107). *Monthly Weather Review*, 1140-1153.
- Lattin, J., Carroll, J. D., & Green, P. E. (2011). *Análise de dados multivariados*. Cengage Learning.
- Matos, D. A. S., & Rodrigues, E. C. (2019), Brasília-DF. *Análise fatorial*. Enap.
- Marengo, J. A., Galdos, M. V., Challinor, A., Cunha, A. P., Marin, F. R., Vianna, M. D. S., ... & Bender, F. (2022). Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. (1th ed., Vol. 1). *Climate Resilience and Sustainability*, e17.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
- Moura, J. D. F. (2022). Aumento da eficácia na geração de energia elétrica proveniente dos parques eólicos em decorrência da crise hídrica no Brasil (Vol. 7). *Revista Valore*, 111-120.
- Nunes, E. (2006). *Geografia física do Rio Grande do Norte*. Imagem Gráfica.
- Pareja-Quispe, D., Franchito, S. H., & Fernandez, J. P. R. (2021). Assessment of the RegCM4 performance in simulating the surface radiation budget and hydrologic balance variables in South America (3th ed., Vol. 5). *Earth Systems and Environment*, 499-518.
- Prado, B. Q. D. M., Fernandes, H. R., Araújo, T. G., Laia, G. A., & Biase, N. G. (2016). Avaliação de variáveis climatológicas da cidade de Uberlândia (MG) por meio da análise de componentes principais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21, 407-413.
- Reboita, M. S., Krusche, N., Ambrizzi, T., & Rocha, R. P. D. (2012). Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul (1a ed., Vol. 8). *Terra e Didática*, 34-50.
- Schmidt, J., Cancelli, R., & Junior, A. O. P. (2016). The effect of windpower on long-term variability of combined hydro-wind resources: The case of Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 131-141.
- Silva, A. E. F. D., Gomes, D. T., Silveira, C. D. S., & Sakamoto, M. S. (2020). Desempenho das simulações do Projeto Cordex quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no Século XX sobre o município de Fortaleza, Ceará. Vol. 35. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 387-396.
- Teixeira, R. L. P., Silva, R. A. D., Fontenelle, A. L., Santos, Y. C. D., & Pessoa, Z. S. (2021). "Pensando no hoje e no futuro": iniciativas de mudanças climáticas nas capitais do Nordeste do Brasil. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia*, (52).

- Uvo, C. R. (1989). A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da região norte do Nordeste do Brasil. [Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais]. *Repositório eletrônico do INPE*. <http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.26.22.54>.
- Utida, G., Cruz, F. W., Etourneau, J., Bouloubassi, I., Schefuß, E., Vuille, M., ... & Turcq, B. (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years (1th ed., Vol. 9) *Scientific Reports*, 1698.
- Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I. (2022). New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). (16th ed., Vol. 42) *International Journal of Climatology*, 8390-8404.

HOW CITE THIS ARTICLE

Rubim Costa Gurgel, A., Carla Lima, K., & Cassain Sales, D. (2023). ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA CORRELACIONAR VARIÁVEIS CLIMÁTICAS SOBRE A REGIÃO DO RIO GRANDE DO NORTE . HOLOS, 3(39). Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/15369>

ABOUT THE AUTHORS

A.R.C GURGEL

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande de Norte

E-mail: augusto.rubim@ifrn.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0581-9475>

D.C. SALES

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

E-mail: domingo.sales@funceme.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7564-8969>

K.C. LIMA

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

E-mail: kellen.lima@ufrn.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-450X>

Editora Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Pareceristas Ad Hoc: Aurilene Barros dos Santos de Andrade e Henrique Almeida Martins



Submitted April 23, 2023
Accepted August 17, 2023
Published December 15, 2023

