Correlação Cruzada Múltipla em Dados Meteorológicos na Cidade de Salvador, Bahia, Brasil☆

Multiple Cross-Correlation in Meteorological Data in the City of Salvador, Bahia, Brazil

Joice de Jesus Santos[1,†], Gilney Figueira Zebende[2], Andrea de Almeida Brito[3]

[1]*Universidade do Estadual de Feira de Santana – Feira de Santana, BA, Brasil*
[2]*Universidade do Estadual de Feira de Santana – Feira de Santana, BA, Brasil*
[3]*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – Salvador, BA, Brasil*
[†]**Autor correspondente:** santosjoice1999@gmail.com

Resumo

A importância da análise das variáveis meteorológicas decorre do fato de que estes elementos afetam o meio ambiente como um todo. Com essa perspectiva, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise de correlação cruzada entre dados meteorológicos para diagnosticar seus efeitos diretos e indiretos, na cidade de Salvador, Bahia, Brasil. Para a metodologia, foram usados como base dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia e os métodos do coeficiente de correlação cruzada e coeficiente de correlação cruzada múltipla. Na análise do coeficiente de correlação cruzada, a radiação solar x temperatura do ar teve uma condição forte, a radiação solar × umidade relativa também teve uma condição forte, já a radiação solar × velocidade do vento teve uma condição média. O resultado da correlação cruzada múltipla, isto é, as variáveis temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, foram correlacionadas com a radiação solar, obtendo uma condição muito forte entre elas (0,88). Estudar correlações em dados meteorológicos é fundamental para melhorar a previsão do tempo e antecipar condições adversas, ajudando a entender mudanças climáticas ao revelar padrões e tendências de longo prazo, crucial para desenvolver estratégias de mitigação e adaptação.

Palavras-chave

Coeficientes • Modelagem • Variáveis

Abstract

The importance of analyzing meteorological variables stems from the fact that these elements affect the environment as a whole. With this in mind, this study aims to carry out a cross-correlation analysis of meteorological data in order to diagnose its direct and indirect effects in the city of Salvador, Bahia, Brazil. The methodology used meteorological data from the National Meteorological Institute and the cross-correlation coefficient and multiple crosscorrelation coefficient methods. In the cross-correlation coefficient analysis, solar radiation × air temperature had a strong condition, solar radiation × relative humidity also had a strong condition, while solar radiation x wind speed had a medium condition. The result of the multiple cross-correlation, i.e. the

☆ Este artigo é uma versão estendida do trabalho apresentado no XXVII ENMC Encontro Nacional de Modelagem Computacional e XV ECTM Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais, ocorridos em Ilhéus – BA, de 1 a 4 de outubro de 2024.

variables air temperature, relative humidity and wind speed, were correlated with solar radiation, obtaining a very strong condition between them (0.88). Studying correlations in meteorological data is fundamental to improving weather forecasting and anticipating adverse conditions, helping to understand climate change by revealing long-term patterns and trends, which is crucial for developing mitigation and adaptation strategies.

Keywords

Coefficients • Modeling • Variables

1 Introdução

A importância da análise das variáveis meteorológicas decorre do fato de que estes elementos afetam o meio ambiente como um todo, com implicações para a sociedade em todas as atividades humanas [1]. As variáveis climáticas mais influenciadas pelos ambientes urbanos são a radiação solar, a temperatura do ar, a umidade do ar e a velocidade do ar. No caso de ambientes urbanos, em espaços abertos há uma maior flutuação das variáveis climáticas quando comparados aos ambientes internos, tornando a sua avaliação mais complexa [2].

A variável destacada para o estudo é a radiação solar, que é o fluxo de energia emitida pelo Sol e transmitida na forma de radiação eletromagnética. As medições de radiação são denominadas TSI – *Total Solar Irradiance* e SSI – *Solar Spectral Irradiance*. A principal razão para estudar a irradiância solar é conhecer a sua verdadeira influência nas variações do clima da Terra, uma vez que afetam a nossa vida quotidiana. Assim, como determinar a influência dos processos humanos (efeito estufa e emissões de CO_2, por exemplo) no clima e na sua variabilidade [3].

A obtenção de valores de irradiância solar altamente precisos é importante em modelos climáticos e atmosféricos. Esses valores são equivalentes à quantidade total de irradiância solar incidente durante um período de tempo [4].

As bases de dados meteorológicas são projetadas para receber, armazenar, processar e disponibilizar dados e informações sobre diversas variáveis meteorológicas. Os dados meteorológicos são gerados localmente, através de estações meteorológicas convencionais ou automáticas, ou remotamente através de sensores orbitais, aéreos ou sistemas de radar [5].

O processamento e análise de múltiplas superfícies contínuas de variáveis meteorológicas permite, por exemplo, zonear áreas potenciais para agricultura [6], identificar áreas expostas a riscos climáticos [7], realizar previsões meteorológicas e estudos climáticos. Essas informações são disponibilizadas através de sites especializados em previsão do tempo e climatologia, como o do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil [8].

O estudo de correlações entre variáveis, apesar de ser de grande importância na quantificação da magnitude e direção (correlação negativa ou positiva) das influências dos fatores na determinação de caracteres complexos, não relata com precisão as relações de causa e efeito entre as variáveis. Daí a importância de desagregar os coeficientes de correlação, nos seus efeitos diretos e indiretos. Assim, através desta técnica é possível diagnosticar a real relação de cada variável explicativa sobre a variável principal [9].

Com essa perspectiva, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise de correlação cruzada entre dados meteorológicos para diagnosticar seus efeitos diretos e indiretos, na cidade de Salvador, Bahia, Brasil.

2 Metodologia

Salvador, a capital do Estado da Bahia, é conhecida mundialmente pela sua forte identidade cultural, sendo uma das primeiras cidades do Brasil e, como várias outras, apresenta problemas urbanos graves, reflexo do seu crescimento. Salvador, atualmente, com 170 bairros, distribuídos em 303,5 km² de área urbana [10], que se constituem em unidades espaciais de referência para fins de planejamento e gestão, conforme Lei Municipal nº 9.278/2017 [11], está localizada aproximadamente entre os paralelos 12° 58′ 30″ Sul e 38° 30′ 07″ Oeste, como mostra a Figura 1.

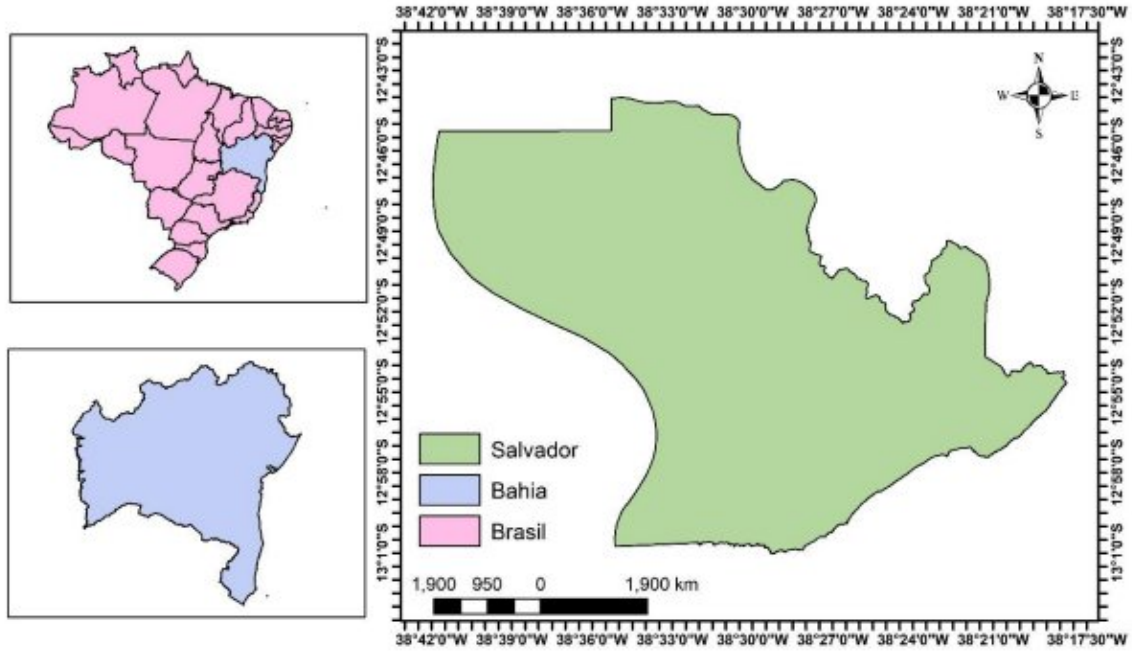

Figura 1: Mapa de Localização de Salvador.

Para a base de dados foram coletados dados de variáveis meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para os anos de 2009 a 2019. As séries históricas utilizadas foram das variáveis de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento.

Logo, houve a organização desses dados em planilhas eletrônicas, onde, definiu-se a radiação solar como variável dependente e as demais variáveis como independentes. O horário também foi levado em consideração, foram coletados 13 horas de medições de acordo o Tempo Universal coordenado (UTC), medições essas que estão de acordo com os horários em que os sensores medem os dados de radiação solar das 9:00 UTC às 21:00 UTC, já que a mesma é a variável em destaque para o estudo.

Para o processamento das correlações utilizou-se dois métodos de correlação cruzada.

O método de Zebende [12], baseado no coeficiente de correlação cruzada $\rho DCCA$, que tem como objetivo quantificar o nível de correlação cruzada entre duas séries temporais não estacionárias, isto é, as variáveis meteorológicas, definido pela razão entre a função de covariância sem tendência, F^2_{DCCA} e a função de variância sem tendência, F_{DFA}, dada pela equação:

$$\rho DCCA(n) \equiv \frac{F^2_{DCCA}(N)}{F_{DFAx}(n)F_{DFAy}(n)} \quad (1)$$

em que,

F^2_{DCCA} - Dada em lei de potência, denomina a correlação cruzada das duas series temporais de um mesmo tamanho (n).

F_{DFA} - Dada em lei de potência, denomina a auto correlação da serie temporal x ou y de um dado tamanho (n).

Este coeficiente de correlação cruzada é adimensional e com variação no intervalo $-1 \leq \rho DCCA \leq 1$.

Na Tabela 1 apresentamos suas características, segundo Zebende [12]. Podemos também definir o coeficiente de correlação cruzada $\rho DCCA$ em seis níveis de correlação cruzada.

E o método proposto por Zebende e Silva Filho [14], o coeficiente de correlação cruzada múltiplo, DMC^2_x, é a generalização da análise do coeficiente $\rho DCCA$, tem como objetivo mensurar as correlações cruzadas de duas ou mais séries temporais não estacionárias. No entanto, para o caso particular de quatro variáveis, ou seja, uma {Y} (variável dependente) e três {X1}, {X2}, {X3} (variáveis independentes), este estudo propõe o cálculo do DMC^2_x com 3 variáveis independentes sendo representado por esta equação abaixo:

$$DMC_x^2 = (\rho^2 x_2,x_3 * \rho_Y^2, x_1 - \rho_Y^2, x_1 + \rho_{X_1}^2, x_3 * \rho_Y^2, x_2 - \rho_Y^2, x_2 + 2 * \rho_{X_1}, x_2 * \rho_Y, x_1 * \rho_Y, x_2 - 2 * \rho_{X_1}, x_3 * \rho_{X_2}, x_3 * \rho_Y, x_1 + \rho_{X_1}^2, x_2 * \rho_Y^2, x_3 - \rho_Y^2, x_3 + 2 * \rho_{X_1}, x_3 * \rho_Y, x_1 * \rho_Y, x_3 - 2 * \rho_{X_1}, x_2 * \rho_{X_2}, x_3 * \rho_Y, x_1 * \rho_Y, x_3 - 2 * \rho_{X_1}, x_2 * \rho_{X_1}, x_3 * \rho_Y, x_2 * \rho_Y, x_3 + 2 * \rho_{X_2}, x_3 * \rho_Y, x_2 * \rho_Y, x_3) / (\rho^2 x_1,x_2 + \rho^2 x_1,x_3 + \rho^2 x_2,x_3 - 2 * \rho_{X_1}, x_2 * \rho_{X_1}, x_3 * \rho_{X_2}^{-1}, x_3) \quad (2)$$

De forma análoga, podemos estender a Eq. (2), em todos os casos $0 \leq DMC_x^2(n) \leq 1$. O valor do coeficiente de correlação cruzada múltiplo, DMC_x^2 , significa que, quanto mais próximo de 1, maior é a correlação cruzada múltipla entre a variável dependente e as variáveis independentes e quanto mais próximo de 0, menor é a correlação cruzada múltipla entre as mesmas. Zebende e Silva Filho [14] dividiram o intervalo do coeficiente de correlação cruzada múltiplo, DMC_x^2 e propuseram 05 (cinco) níveis de intervalos com as as características apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: DMC_x^2, coeficiente de correlação cruzada múltiplo e possíveis níveis de correlação cruzada

Características	DMC_x^2
Muito Forte	$0,8 \rightarrow 1,0$
Forte	$0,6 \rightarrow 0,8$
Médio	$0,4 \rightarrow 0,6$
Fraco	$0,2 \rightarrow 0,4$
Muito Fraco	$0,0 \rightarrow 0,2$

Para o processamento das correlações, foi utilizado o aplicativo RHO-DCCA_MATRIX. Os dados foram analisados no software Origin.

3 Resultados e Discussões

Levando em consideração o pressuposto dos impactos climáticos causados pelo uso e ocupação na cidade de Salvador, como faz a Ref. [15], que enfatiza a necessidade de metodologias de aplicação de conhecimentos e princípios climatológicos na solução de problemas que afetam o meio urbano, mas refletem em toda a humanidade, a Fig. 2 vem trazendo a análise do coeficiente de correlação cruzada ($\rho DCCA$) das respectivas variáveis estudadas.

O gráfico da Fig. 2 apresenta os valores do coeficiente $\rho DCCA$ entre as variáveis meteorológicas analisadas, considerando diferentes escalas temporais (representadas pelo eixo x em horas). Observa-se que há variações expressivas no padrão de correlação cruzada ao longo das múltiplas escalas avaliadas, destacando a complexidade das interações entre essas variáveis em intervalos de tempo curtos e longos. Essa abordagem multiescala permite capturar comportamentos que poderiam passar despercebidos em análises tradicionais, restritas a uma única escala.

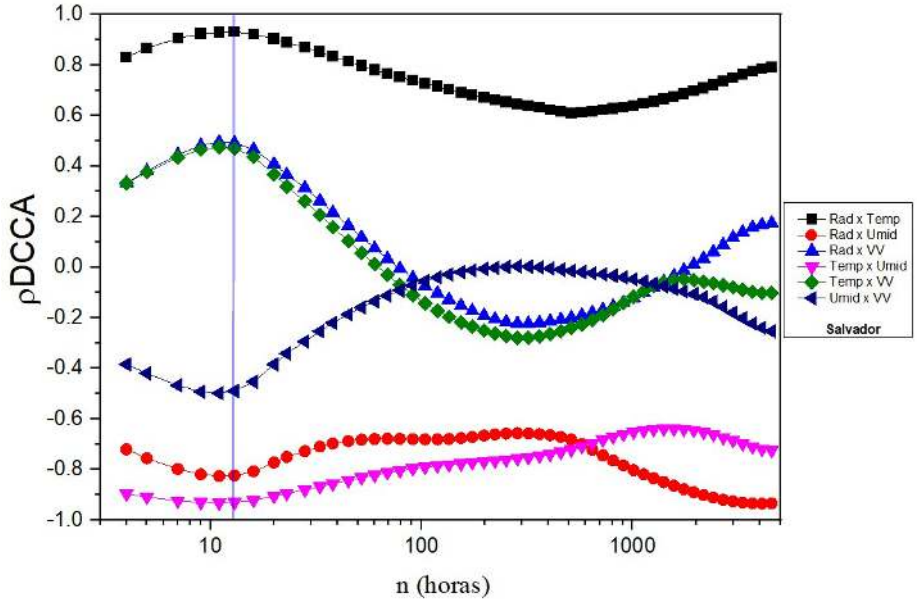

Figura 2: Correlação Cruzada dos dados meteorológicos da cidade de Salvador.

Em termos descritivos, verificam-se valores mais elevados de $\rho DCCA$ entre radiação solar e temperatura do ar, sugerindo uma associação consistente entre essas variáveis. Tal resultado é coerente com o entendimento físico de que o aquecimento do ar está diretamente relacionado à disponibilidade de energia radiante, reforçando a importância da radiação solar como principal moduladora da temperatura, especialmente em regiões tropicais como Salvador.

Entre radiação solar e umidade relativa, observa-se também uma tendência de valores relativamente altos de $\rho DCCA$, indicando uma possível interdependência indireta, associada ao papel da água na absorção e dispersão da radiação solar. Esse comportamento pode refletir processos de evaporação e condensação que influenciam a umidade do ar conforme variam os níveis de radiação ao longo do dia.

Por outro lado, a relação entre radiação solar e velocidade do vento apresentou valores mais baixos de $\rho DCCA$ em praticamente todas as escalas analisadas. Esse padrão sugere que essas variáveis possuem dinâmicas menos sincronizadas, possivelmente por estarem ligadas a processos físicos distintos, como circulação atmosférica local ou efeitos topográficos específicos.

É importante ressaltar que os resultados apresentados têm caráter exploratório e devem ser interpretados com cautela, pois não foram realizados testes estatísticos formais para verificar a significância das correlações identificadas. A ausência desse tipo de verificação limita a possibilidade de afirmar que as associações observadas são estatisticamente relevantes ou poderiam ocorrer por acaso.

A Figura 3 apresenta os resultados da correlação cruzada múltipla DMC_x^2, que avalia a associação conjunta da temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento com a radiação solar. Os valores observados mantêm-se elevados ao longo das escalas temporais, atingindo picos de até 0,88, o que indica uma condição de correlação múltipla muito forte entre essas variáveis meteorológicas e a radiação.

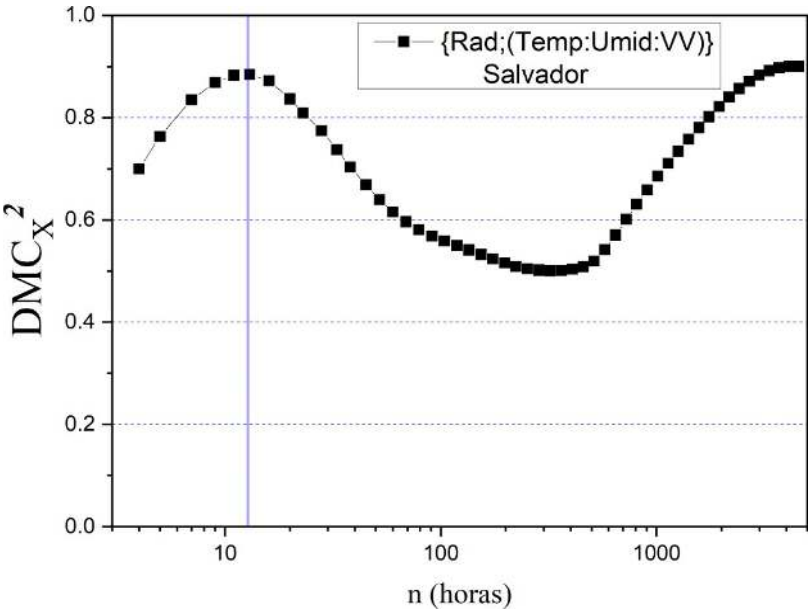

Figura 3: Correlação Cruzada Múltipla dos dados meteorológicos da cidade de Salvador.

Em escalas temporais mais curtas (cerca de 10 horas), a temperatura do ar exerce maior influência, pois reage quase imediatamente às variações na radiação solar ao longo do dia. Em escalas intermediárias, a umidade relativa se destaca, refletindo processos de evaporação, condensação e variações na cobertura de nuvens que afetam a quantidade de radiação disponível. Já em escalas mais longas, observa-se uma retomada do aumento dos valores de DMC_x^2, sugerindo que padrões sazonais ou de maior duração passam a influenciar essas variáveis de forma integrada.

Esses resultados são coerentes com as características urbanas de Salvador, como o predomínio de construções horizontais, grande extensão de áreas pavimentadas e baixa refletância, que favorecem o acúmulo de calor e intensificam o fenômeno da ilha de calor urbana. Esse efeito contribui para o aumento das temperaturas locais, impacta o conforto térmico da população e eleva a demanda por sistemas de resfriamento.

Além de ampliar a compreensão sobre a dinâmica atmosférica urbana, análises multiescalares como essa são fundamentais para apoiar o planejamento urbano sustentável, otimizar a geração de energia renovável, aperfeiçoar modelos climáticos e subsidiar políticas públicas de mitigação e adaptação aos efeitos das mudanças climáticas.

Estudar correlações em dados meteorológicos é fundamental para melhorar a previsão do tempo e antecipar condições adversas, contribuindo para a segurança pública. Ajuda a entender mudanças climáticas ao revelar padrões e tendências de longo prazo, crucial para desenvolver estratégias de mitigação e adaptação. Facilita a gestão eficiente de recursos naturais, como água e energia, e melhora práticas agrícolas. Apoia a construção de modelos climáticos mais precisos, usados para simular futuros cenários climáticos. Contribui para a saúde pública ao correlacionar condições meteorológicas com a incidência de doenças. É essencial para desenvolver sistemas de alerta precoce e estratégias de mitigação de desastres naturais.

Assim como, as energias renováveis, como solar e eólica, dependem das condições meteorológicas. Analisar correlações em dados meteorológicos permite prever a produção de energia, otimizar a localização de usinas solares e turbinas eólicas, e gerenciar a distribuição de energia. Isso ajuda a equilibrar oferta e demanda, integrar energias renováveis na rede elétrica, e desenvolver estratégias para mitigar a variabilidade na produção.

5 Conclusões

Na análise do coeficiente de correlação cruzada, a radiação solar × temperatura do ar teve uma condição forte, a radiação solar × umidade relativa também teve uma condição forte, já a radiação solar × velocidade do vento teve uma condição média. O resultado da correlação cruzada múltipla, isto é, as variáveis temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, foram correlacionadas com a radiação solar, obtendo uma condição muito forte entre elas (0,88). Estudar correlações em dados meteorológicos é fundamental para melhorar a previsão do tempo e antecipar condições adversas, ajudando a entender mudanças climáticas ao revelar padrões e tendências de longo

prazo, crucial para desenvolver estratégias de mitigação e adaptação. Assim como, permite prever a produção de energia, otimizar a localização de usinas solares e turbinas eólicas, e gerenciar a distribuição de energia.

Referências

[1] D. Guha-Sapir, P. Hoyois, e R. Below, "Annual disaster statistical review 2014: The numbers and trends," 2014. Disponível em: https://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2014.pdf

[2] F. T. Silva e C. E. Alvarez, "A correlação entre variáveis climáticas em diferentes configurações urbanas," em *Proceedings of EURO ELECS 2015*, Guimarães, Portugal, 2015.

[3] C. Frohlich, "Solar irradiance variability since 1978," *Space Science Reviews*, vol. 125, pp. 53–56, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-0-387-48341-2_5

[4] N. K. Solanki e S. K. Haigh, "Solar irradiance variability and climate," *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 51, pp. 311-351, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082812-141007

[5] T. Lucas, D. Plec, L. Abreu, e M. Parizzi, "Identificação de interpoladores adequados a dados de chuva a partir de parâmetros estatísticos," *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 13, pp. 7–21, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.5380/abclima.v13i0.31259

[6] W. Ricce, S. Carvalho, P. Caramori, e S. Roberto, "Zoneamento agroclimático da cultura da videira no estado do Paraná," *SEMINA: Ciências Agrárias*, vol. 35, no. 45, pp. 2327–2336, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n4Suplp2327

[7] M. Herrmann, *Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina*, 1ª Edição, Florianópolis, Brasil: Secretaria de Estado da Segurança Pública e Defesa do Cidadão, 2006. Disponível em: http://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2006/01/Atlas_Ceped.pdf

[8] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/

[9] A. I. Filho, P. F. Borges, L. S. Araujo, A. R. Pereira, E. M. Lima, L. S. Silva, e C. V. S. Junior, "Influência das variáveis climáticas sobre a evapotranspiração," *Gaia Scientia*, vol. 9, no. 1, pp. 62-63, 2015.

[10] Conder - Companhia de Desenvolvimento Urbano da Bahia, *Painel de informações: dados socioeconômicos do município de Salvador por bairros e prefeituras-bairro /Sistema de Informações Geográficas Urbanas do Estado da Bahia*, Salvador, Brasil: CONDER/INFORMS, 2016.

[11] Salvador (Município), *Lei N° 9.278/2017 de 21 de setembro de 2017. Dispõe sobre a delimitação e denominação dos bairros do Município de Salvador, Capital do Estado da Bahia, na forma que indica, e dá outras providências*, 2017.

[12] G. F. Zebende, "DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation," *Physica A*, vol. 390, no. 4, pp. 614–618, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.10.022

[14] G. F. Zebende e A. M. Silva Filho, "Detrended multiple cross-correlation coefficient," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 510, pp. 91–97, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.06.119

[15] D. C. Galvão, "A estrutura e o clima da urbe: uma relação sistêmica," *Humanae*, vol. 8, no. 2, 2014. [Online]. Disponível em: https://revistas.esuda.edu.br/index.php/humanae/article/view/124

[16] R. Zimmermann e S. M. Schons, "Aquecimento global e impacto nas águas," *Revista Filosofazer*, vol. 28, no. 34, pp. 83-106, 2009. Disponível em: http://filosofazer.ifibe.edu.br/index.php/filosofazerimpressa/article/viewFile/149/146

[17] D. H. Rached, "Interfaces entre o regime internacional de mudança climática e a saúde global," *Lua Nova*, vol. 98, pp. 231-254, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0102-6445231-254/98