Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
ISSN 2237-8642

# ANÁLISE TEMPORAL DE VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS: UMA ABORDAGEM COM JANELAS DESLIZANTES

## *Temporal analysis of climatological variables: an approach with sliding windows*

## *Análisis temporal de variables climatológicas: una aproximación con ventanas deslizantes*

**Taíze da Silva Sousa Doria**
Universidade Estadual de Feira de Santana
taize.sousadoria@gmail.com

**Everaldo Freitas Guedes**
Instituto Fernandes Figueira - Fiocruz
efgestatistico@gmail.com

**Elvira Catiana de Oliveira Santos Ferreira**
Universidade Estadual de Feira de Santana
19115041@discente.uefs.br

**Aloisio Machado da Silva Filho**
Universidade estadual de Feira de Santana
aloisioestatistico@uefs.br

**Resumo:** Esta pesquisa tem o objetivo de analisar as flutuações das variáveis temperatura do ar, umidade relativa do ar e a radiação solar do município de Feira de Santana, Bahia, Brasil com o procedimento das janelas deslizantes, no período de 2009 a 2019. A análise foi executada em duas etapas: 1 - Análise exploratória dos dados (média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria, curtose, mínimo e máximo); 2 - Janelas deslizantes (estatística descritiva, autocorrelação, correlação cruzada bivariada e multivariada). A autocorrelação foi mensurada com o expoente do método Detrended Fluctuation Analysis-DFA, a correlação cruzada bivariada e múltipla com os coeficientes ρDCCA e DMC, respectivamente. A análise DFA indicou comportamento persistente de longo alcance ($\alpha > 0,5$) nas séries temporais das três variáveis climatológicas estudadas. A modelagem por ρDCCA revelou correlação positiva predominante entre temperatura do ar e a radiação solar em todas as escalas de tempo e janelas analisadas. Observou-se correlação negativa entre radiação solar e a umidade relativa do ar. A temperatura do ar e a umidade relativa apresentaram correlação cruzada negativa, de moderada a muito forte, em quase todas as escalas. A correlação cruzada múltipla entre

as variáveis foi qualitativamente forte a muito forte, especialmente em escalas maiores. Os resultados reforçam a eficácia dos métodos aplicados para a modelagem de dados climatológicos e contribuem para a literatura ao caracterizar dinamicamente as autocorrelações e correlações cruzadas (bivariadas e multivariadas) das variáveis estudadas.
**Palavras-chave:** Variáveis climáticas. Séries temporais. Modelagem climática.

**Abstract:** This research aims to analyze the fluctuations of the variables air temperature, relative humidity and solar radiation of the city of Feira de Santana, Bahia, Brazil with the sliding windows procedure in the period from 2009 to 2019. The analysis was performed in two stages: 1 - exploratory data analysis (mean, standard deviation, coefficient of variation, asymmetry, kurtosis, minimum and maximum); 2 - sliding windows (descriptive statistics, autocorrelation, bivariate and multivariate cross-correlation). The autocorrelation was measured with the exponent of the method Detrended Fluctuation Analysis-DFA, the bivariate and multiple cross-correlation with the coefficients ρDCCA and DMC, respectively. The DFA analysis indicated long-range persistent behavior ($\alpha > 0.5$) in the time series of the three climatological variables studied. The ρDCCA modeling revealed a predominantly positive correlation between air temperature and solar radiation in all time scales and analyzed windows. There was a negative correlation between solar radiation and relative humidity. The air temperature and relative humidity showed negative cross-correlation, from moderate to very strong, in almost all scales. The multiple cross correlation between variables was qualitatively strong to very strong, especially on larger scales. The results reinforce the effectiveness of the applied methods for climatological data modeling and contribute to the literature by dynamically characterizing autocorrelations and cross-correlations (bivariate and multivariate) of the studied variables.
**Keywords:** Climate variables. Time series. Climatic modeling.

**Resumen:** Esta investigación tiene como objetivo analizar las fluctuaciones de las variables temperatura del aire, humedad relativa del aire y la radiación solar del municipio de Feira de Santana, Bahia, Brasil con el procedimiento de ventanas deslizantes, en el período 2009 a 2019. El análisis se realizó en dos etapas: 1 - Análisis exploratorio de los datos (media, desviación estándar, coeficiente de variación, asimetría, curtosis, mínimo y máximo); 2 - Ventanas deslizantes (estadística descriptiva, autocorrelación, correlación cruzada bivariada y multivariada). La autocorrelación fue medida con el exponente del método Detrended Fluctuation Analysis-DFA, la correlación cruzada bivariada y múltiple con los coeficientes ρDCCA y DMC, respectivamente. El análisis DFA indicó comportamiento persistente de largo alcance ($\alpha > 0,5$) en las series temporales de las tres variables climatológicas estudiadas. El modelado por ρDCCA reveló una correlación positiva predominante entre la temperatura del aire y la radiación solar en todas las escalas de tiempo y ventanas analizadas. Se observó correlación negativa entre la radiación solar y la humedad relativa del aire. La temperatura del aire y la humedad relativa presentaron correlación cruzada negativa, de moderada a muy fuerte, en casi todas las escalas. La correlación cruzada múltiple entre las variables fue cualitativamente fuerte a muy fuerte, especialmente en escalas mayores. Los resultados refuerzan la eficacia de los métodos aplicados para el modelado de datos climatológicos y contribuyen a la literatura al caracterizar dinámicamente las autocorrelaciones y correlaciones cruzadas (bivariadas y multivariadas) de las variables estudiadas.
**Palabras clave:** Variables climáticas. Serie temporal. Modelización climática.

Submetido em: 29/11/2024
Aceito para publicação em: 08/09/2025
Publicado em: 20/10/2025

# 1. INTRODUÇÃO

Os eventos climáticos têm atraído o interesse do ser humano desde a antiguidade (Brito, Silva Filho e Zebende, 2015), atualmente, compreender estes fenômenos tornou-se ainda mais importante em decorrência das mudanças climáticas que o planeta está vivenciando.

De acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a influência do ser humano sobre o sistema climático já é comprovada e a taxa de emissões de gases de efeito estufa de origens antropogênicas são as mais altas da história. As últimas quatro décadas foram mais quentes do que qualquer década que a precedeu desde 1850 (IPCC, 2021).

Projeções futuras apontam que a temperatura da superfície irá aumentar ao longo do século XXI, as ondas de calor podem ocorrer com mais frequência e durar por mais tempo e em muitos locais eventos drásticos de precipitação serão mais intensos e constantes (IPCC, 2014).

Segundo Sena *et al*. (2016), as mudanças ambientais em virtude de fatores como os modelos de desenvolvimento econômico adotados pelos países, destruição de ecossistemas, perda de biodiversidade, uso e ocupação do solo e desmatamento, são principalmente, em nível local, fortes ameaças para os meios ambiental, social e econômico, pois, afetam o ambiente, modificando as condições de vida e de saúde das populações.

Como comprovado pelo IPCC, a situação mundial com relação às mudanças climáticas é preocupante e estão interligadas com as ações que o ser humano vem adotando ao longo dos anos de existência neste planeta. Nesse sentido, pesquisas que estudem o comportamento da dinâmica dos padrões meteorológicos se destacam por contribuir na construção de medidas mitigadoras.

Dessa forma, é evidente a necessidade do desenvolvimento de estudos na área, fornecendo conhecimentos acerca do comportamento destas variáveis e aporte para aprimoramento de metodologias de análises. Uma particularidade bastante recorrente é a utilização de séries temporais com a finalidade de compreender o comportamento das variáveis climatológicas no espaço de tempo estudado e até mesmo fazer projeções para o futuro.

Autores como Brito, Silva Filho e Zebende (2015); Ferreira de Lima *et al*. (2017); Prado (2017); Mandú *et al*. (2019); Oliveira *et al*. (2020), têm desenvolvido trabalhos nesta perspectiva, colaborando para o melhor entendimento de como alguns métodos podem auxiliar na análise destes fenômenos climáticos. Entretanto, existem poucos trabalhos na literatura que realizaram uma análise conjunta e ampla aplicando vários métodos associados com a abordagem de janelas deslizantes em pesquisas para dados climatológicos. Diversas pesquisas como Brito, Silva Filho e Zebende (2015); Zebende *et al*. (2018); Iqbal (2020); Zebende *et al*. (2021); Rodrigues, Filho e Guedes (2022), estudaram a autocorrelação de séries climatológicas por meio do DFA e/ou ρDCCA, porém poucos com procedimento da análise dinâmica por meio das janelas deslizantes.

Nesse sentido, esta pesquisa se mostra relevante ao preencher uma lacuna existente na literatura, ao integrar de forma abrangente análises de autocorrelação, correlação cruzada bivariada e correlação cruzada multivariada com uma abordagem dinâmica baseada em janelas deslizantes aplicadas a séries temporais climatológicas. A metodologia das janelas deslizantes permite avaliar as correlações cruzadas entre as flutuações das variáveis estudadas em vários momentos da série, ou seja, de forma dinâmica.

Para Martin *et al.* (2016), "A série temporal é uma sucessão de valores de uma determinada variável observada em intervalos regulares de tempo". Os mesmos autores citam como exemplo para as séries temporais: preço das ações, valores de exportações, Produto Interno Bruto (PIB), temperatura, vendas médias de determinado item, temperatura média e batimentos cardíacos.

As séries temporais apresentam diversas propriedades fundamentais, tais como autocorrelação, estacionariedade, tendência, sazonalidade, ciclos e memória. A autocorrelação, em particular, fornece informações sobre a presença de dependência temporal entre os valores da série, indicando se ela possui memória de longa duração. Em outras palavras, revela se a série apresenta comportamento persistente, antipersistente ou se é essencialmente descorrelacionada (Anteneodo, 2005).

Diversos métodos estatísticos são utilizados para analisar as correlações em séries temporais de variáveis climatológicas. Dentre os métodos estatísticos, pode-se citar a estatística de Hurst e a Função de Autocorrelação (FAC), porém, estes métodos são adequados

na detecção de memória se a série for estacionária, entretanto, sabe-se que a maioria das séries temporais reais não são estacionárias.

Nessa perspectiva, métodos como o Detrended Fluctuation Analysis (DFA) (Peng *et al.*, 1994), Detrended Cross-correlation Analysis (DCCA) (Podobnik e Stanley, 2008), Coeficiente de Correlação Cruzada sem tendência (ρDCCA) (Zebende, 2011) e Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient (DMC) (Zebende e Da Silva Filho, 2018), são amplamente utilizados para análises da correlação de longo alcance de séries temporais não estacionárias. O DCCA é capaz de estudar a correlação cruzada entre duas séries temporais, enquanto lei de potência, e o coeficiente de correlação cruzada sem tendência (ρDCCA) mensura o nível da correlação cruzada, já o DMC analisa a correlação cruzada entre pelo menos três séries temporais (correlação cruzada múltipla).

Feira de Santana é o segundo maior município da Bahia (IBGE, 2025), localizado a 108 km da capital, Salvador (Antunes da Silva Maia *et al.,* 2018). Reconhecida como um importante entreposto comercial, sua posição geográfica estratégica a torna um ponto crucial nas rotas de escoamento de mercadorias, desempenhando papel significativo na economia do estado (Jesus, Santos e Carvalho, 2018). Além disso, o município é considerado um entroncamento logístico para o tráfego oriundo das regiões Sul e Centro-Oeste do Brasil com destino a Salvador e outras cidades do Nordeste (Reis, 2017).

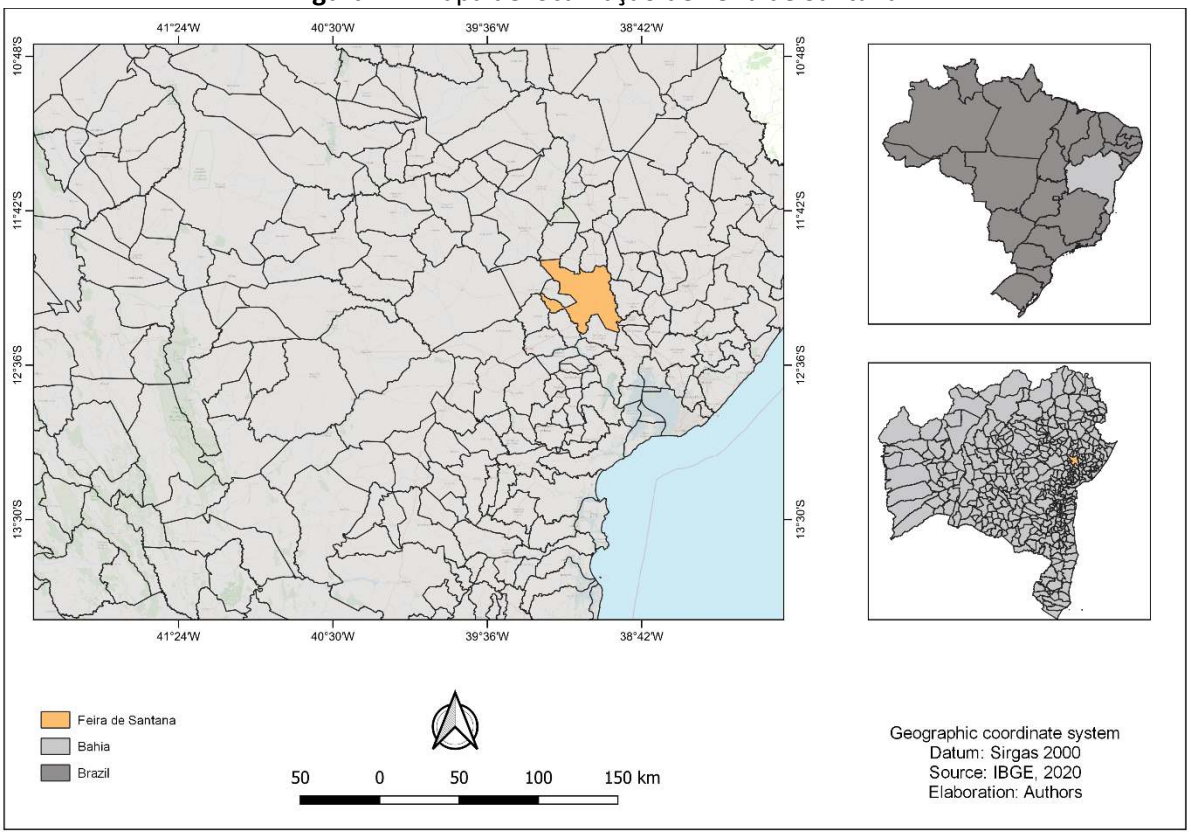
Diante do exposto, esta pesquisa tem como objetivo analisar as flutuações das variáveis Temperatura do ar, Umidade relativa do ar e Radiação solar do município de Feira de Santana, Bahia, Brasil, com o procedimento das janelas deslizantes, no período de 2009 a 2019.

# 2. METODOLOGIA

## 2.1. Área de estudo

A presente pesquisa tem como área de estudo Feira de Santana (Figura 1), segundo município mais populoso do estado da Bahia, perdendo apenas para a capital do estado, Salvador (IBGE, 2025). Localizado a 108 Km da capital, possui uma altitude média de 230 m (Antunes da Silva Maia *et al.*, 2018).

**Figura 1** – Mapa de localização de Feira de Santana.




**Fonte:** Mapa de localização de Feira de Santana. Fonte: Elaborado pelos autores.

O município possui uma população de acordo com o censo de 2022 de 616.272 pessoas, área territorial de 1.304,425 km² e Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) igual a 0,712 (IBGE, 2025).

Feira de Santana encontra-se em uma zona de transição climática intermediária entre úmida e o clima seco do semiárido (Antunes da Silva Maia *et al.,* 2018; Santos, Martins e Santos, 2018), com o território contemplando os biomas Caatinga e Mata Atlântica (IBGE, 2025). A precipitação pluviométrica média do município é de 850 mm anuais (Santos *et al.,* 2017), sua posição geográfica de baixa latitude proporciona a incidência de forte radiação solar durante todo o ano com elevadas temperaturas (De Oliveira *et al.,* 2007), sendo a temperatura média anual de 24 °C, no verão podendo atingir médias mensais de 27 °C e, no inverno, de 21 °C (Antunes da Silva Maia *et al.,* 2018). O período de menor deficiência hídrica é registrado nos meses de maio, junho e julho (Santos, Martins e Santos, 2018), e de acordo com Santos *et al*. (2017), o município possui dois períodos chuvosos distintos: o primeiro no outono-inverno e o segundo no final da primavera. Já os menores índices pluviométricos são registrados entre os meses de agosto e outubro (De Oliveira *et al.,* 2007).

Santos, Martins e Santos, (2018), estudando a classificação climática de Feira de Santana, concluíram que de acordo com o método de Köppen o município é classificado como “Asa”, megatérmico com chuvas de inverno e verão quente, já pelo método de Thornthwaite é classificado como C1w2A‘a’, clima Sub-úmido seco com largo excesso de verão, megatérmico e com concentração de evapotranspiração potencial no verão igual a 31,2%.

## 2.2. Fonte dos dados

Os dados utilizados nesta pesquisa são secundários, obtidos através do banco de dados das estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponível no endereço eletrônico https: //www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inmet, de forma gratuita.

Foram utilizados os registros diários obtidos a cada hora do dia (das 00:00 às 23:00 h UTC - Tempo Universal Coordenado) das variáveis umidade relativa do ar, temperatura do ar e radiação solar (das 09:00 às 22:00 h UTC). Os dados compreendem 3.828 observações, abrangendo o período de 01/01/2009 a 31/12/2019.

## 2.3. Tratamento dos dados

A partir do banco de dados bruto fornecido pelo INMET, procedeu-se a um pré-processamento da série temporal original com o intuito de eliminar inconsistências, notadamente registros ausentes, visando ao aprimoramento da qualidade dos dados e à construção de um banco de dados final mais acurado. Apesar da presença de lacunas no conjunto de dados do INMET, os métodos aplicados neste estudo (DFA, DCCA e o ρDCCA) apresentam comprovada robustez na análise de séries temporais não estacionárias com perda de dados, conforme demonstrado por Zebende *et al*. (2020).

Para construir a série corrigida final foi adotado o critério de inclusão dos dados que possuíssem pelo menos a quantidade mínima necessária para se calcular a média das variáveis estudadas, ou seja, que apresentassem ao menos três registros horários diário.

Após essa etapa, foi realizada a análise exploratória dos dados e em seguida, utilizou-se os métodos estatísticos: Estatística descritiva, DFA, ρDCCA e DMC com a abordagem de

janelas deslizantes para mensuração e caracterização da dispersão, autocorrelação, correlação bivariada e correlação cruzada múltipla das séries temporais climatológicas da área de estudo. A metodologia das janelas deslizantes foi aplicada com o objetivo de avaliar o comportamento da série em vários momentos, ou seja, de forma dinâmica. Considerando as especificidades dos métodos estatísticos, foram realizados testes estatísticos adequados, com um nível de significância de 5%.

Na próxima seção será apresentado o procedimento das janelas deslizantes que foi utilizado conjuntamente com os demais métodos estatísticos aplicados neste artigo e, nas seções subsequentes, serão discutidos os métodos.

## 2.4. Procedimento das Janelas deslizantes

Com o intuito de realizar uma análise dinâmica das séries temporais das variáveis Temperatura do ar, Umidade relativa do ar e Radiação solar foi utilizado a abordagem das janelas deslizantes em todos os métodos aplicados nesta pesquisa (Estatística descritiva, DFA, ρDCCA e DMC). Este procedimento estatístico possibilita avaliar dinamicamente uma medida estatística (como as que foram utilizadas neste estudo: curtose, assimetria, coeficiente de variação, DFA, ρDCCA, DMC, nível descritivo do teste, e Coeficiente de determinação) de uma ou mais séries temporais em função do tempo ($t$) para uma janela de tamanho ($w$) (Ferreira *et al*., 2018; Da Silva Filho *et al*., 2021; Santos *et al*., 2022, Ribas Junior *et al*., 2025).

A metodologia utilizada consiste em dividir todo o campo amostral analisado (séries do período de 2009 a 2019) em subamostras sequenciais de janelas de tamanho $w$ observações. Sendo assim, tomando como exemplo o coeficiente ρDCCA, para um tamanho de janela $w$ = 1000, o ρDCCA1 pertence a amostra de tamanho t =1, ..., t = 1000 para as duas séries analisadas simultaneamente, em seguida, para o ρDCCA2 t= 2, ..., t = 1001 e assim sucessivamente.

Nesta pesquisa utilizamos o comprimento da janela ($w$)=365 (aproximadamente 1 ano) e ($w$)=1000, visto que quanto maior o tamanho da janela ($w$), mais subamostras sucessivas se obtém da série, o que possibilita maior estabilidade nas flutuações das séries. Os resultados relativos à janela deslizante foram implementados com auxílio da linguagem R por meio do pacote SlidingWindows (Guedes *et al.*, 2020).

Os tamanhos das janelas foram definidos de forma a equilibrar dois critérios essenciais: serem suficientemente grandes para capturar a escala de interesse com robustez estatística, garantindo a aplicação confiável da lei de escala; e, ao mesmo tempo, suficientemente pequenas para permitir a detecção de variações locais ao longo da série temporal. (Kantelhardt *et al*., 2002).

## 2.5. Detrended Fluctuation Analysis - DFA

O Detrended Fluctuation Analysis (DFA) que traduzido para o português é denotado como Análise das Flutuações sem Tendência, é um método estatístico que evoluiu da análise clássica R/S proposta por Hurst em 1951 (Filho *et al.*, 2020), indicado para modelagens em séries temporais em situações que se deseja identificar a autocorrelação de longo alcance, ou seja, a correlação do sinal com a própria variável que se está estudando (Peng *et al.*, 1994).

O método Detrended Fluctuation Analysis (DFA) é eficaz na investigação da dependência temporal em séries temporais não estacionárias, evitando, assim, a obtenção de resultados equivocados que podem surgir em análises de longo prazo baseadas em relações espúrias entre dados (Dias *et al*., 2020). Além disso, de acordo com Carbone *et al*. (2004), os valores do expoente α obtidos por meio do DFA são estatisticamente confiáveis quando aplicados a séries com tamanho N ≥ 1000.

Para realizar o método de DFA é preciso seguir os seguintes passos:

Passo 1: Calcula-se o desvio padrão de cada registro em relação à incidência média da série completa, integrando o sinal $u_i$ (série original) e obtendo-se a série integrada $y(k)$ pela expressão abaixo:

$$y(k) = \sum_{i=1}^{k}\left(u_i - (u)\right); K = 1, 2 \ldots N. \quad (1)$$

No qual $(u)$ expressa o valor médio de $u_i$, e $N$, o total de pontos da série.

Passo 2: Após obter a série integrada $y(k)$, deve-se dividir em intervalos de igual tamanho $n$ não sobrepostos. E para cada intervalo de tamanho $n$, é preciso ajustar um polinômio de grau maior ou igual a 1 a $y(k)$, denotado por $y_n(k)$.

Passo 3: O próximo passo é subtrair a série integrada $y(k)$ de $y_n(k)$ em cada intervalo de tamanho $n$, com base na seguinte expressão:

$$F_{DFA}(n) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}[y(k) - y_n(k)]^2} \quad (2)$$

Sendo que o cálculo anterior é repetido sistematicamente para diferentes amplitudes de tamanho $n$ $(4 \leq n \leq \frac{N}{4})$.

Passo 4: Verificar se $F_{DFA}(n)$ tem comportamento do tipo $F_{DFA}(n) \approx n^{\alpha}$. Neste caso, α representa o expoente de correlação de longo alcance. Aplicando log em $F_{DFA}(n) = \alpha n^{\alpha}$, tem-se:

$$\log F_{DFA}(n) = \alpha \log n + C \quad (3)$$

Na equação 3 "C" denota a constante relacionada ao intercepto do ajuste linear simples e α a inclinação da reta que corresponde ao expoente de escala ou de autocorrelação sem tendência do método DFA. No caso de séries temporais não correlacionadas, ou seja, sem memória, já é esperado α = 0, 50, o que comumente acontece em séries aleatórias. Se α > 0, 50, pode-se concluir que a série apresenta comportamento persistente de longo alcance. Para α < 0, 50, a série é denotada como comportamento de antipersistência (Peng *et al.*, 1994). Também podemos inferir outras interpretações para o coeficiente αDFA, conforme a tabela 1.

**Tabela 1**- Classificação do coeficiente αDFA.

| **αDFA** | **Classificação** |
|---|---|
| αDFA$< 0{,}50$ | Anti-persistente |
| αDFA$\cong 0{,}50$ | Não correlacionado (ruído branco) |
| αDFA$> 0{,}50$ | Persistente de longo alcance |
| αDFA$\cong 1{,}00$ | $1/f$ ruído |
| αDFA$> 1{,}00$ | Não estacionário |
| αDFA$\cong 3/2$ | Ruído Browniano |

Dessa forma, através do valor de α obtido pela modelagem do DFA é possível analisar a memória de longa duração em uma dada série, inferindo de que forma as flutuações da série temporal passada implicam na manutenção do comportamento das flutuações da série temporal futura (Sampaio *et al.*, 2008). A significância dos valores dos expoentes de autocorrelação, com certo nível de confiança, foram obtidos via modelo de regressão linear

simples com auxílio da linguagem R, tendo como alicerce a equação 3. A hipótese nula do teste é que αDFA=0. Neste estudo, admitimos que se o nível descritivo do teste for menor que 0,05 (p-valor<0,05) o valor do expoente αDFA será estatisticamente significativo com 95% de confiança.

## 2.6. Detrended Cross-Correlation Analysis - DCCA

Existem casos em que a série sofre interferência não somente dela mesma, mas também de outras séries. Nessa situação, o método Detrended Cross-Correlation Analysis (DCCA), em português: Análise de Correlação Cruzada sem Tendência, é utilizado, pois é capaz de estimar o expoente que caracteriza a correlação de longo alcance entre duas séries temporais, em regime não estacionário (Podobnik e Stanley, 2008). Resumidamente, o DCCA é uma generalização do DFA e é baseada na covariância sem tendência (Iqbal, 2020).

Considerando duas séries não estacionárias $y_i$ e $y'_i$ com o mesmo $N$ (mesmo número de pontos), é possível modelar o DCCA por meio dos seguintes procedimentos (Podobnik e Stanley, 2008; Silva Filho, 2014; Machado Filho, Da Silva e Zebende, 2014):

Passo 1: Integram-se as duas séries $y_i$ e $y'_i$ por meio das expressões abaixo:

$$R_K = y_1 \ , \ y_2 \ , y_3 + \ldots + \ y_k \qquad (4)$$
$$R'_K = y'_1 \ , \ y'_2, \ y'_3 + \ldots + \ y'_k$$

No qual $K = 1, 2, 3 \ldots N$.

Passo 2: Divide-se os sinais integrados $R_K$ e $R'_K$ em $(N - n)$ boxes (com superposição) de tamanho $n$, cada um contendo $(n + 1)$ valores. Para ambas séries temporais, em cada box (que inicia em $i$ e termina em $i + n$) definimos as "tendências locais", isto é, $\hat{\mathrm{R}}_{k,i}$ e $\hat{\mathrm{R}}'_{k,i}$ $(\mathrm{i} \leq \mathrm{K} \leq \mathrm{i} + \mathrm{n})$ como sendo a ordenada do ajuste linear (processo dos mínimos quadrados) da série integrada.

Passo 3: Define-se a partir do cálculo anterior a covariância dos resíduos em cada intervalo por meio da seguinte expressão:

$$f^2{}_{DCCA}(n, i) = \frac{1}{(n+1)} \sum_{K=1}^{1+n} (R_k - \hat{\mathrm{R}}_{k,i}) \ (R'_k \ - \ \hat{\mathrm{R}}_{k,i}) \qquad (5)$$

Passo 4: Determina-se a função de covariância sem tendência do método DCCA expressa como:

$$F^2{}_{DCCA}(n) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} f^2{}_{DCCA}(n,i) \quad (6)$$

Assim como o DFA, ao repetir sistematicamente para diferentes escalas temporais de tamanho n, o procedimento anteriormente demonstrado é possível verificar se existe lei de potência, ou seja, se $F^2{}_{DCCA}(n) \sim n^{\lambda}$ em que λ denota o expoente de correlação cruzada de longo alcance.

Entretanto, ao lidar com séries temporais que exibem relações não lineares, como é comum em variáveis climatológicas, caracterizadas por sua natureza não estacionária e elevada variabilidade espacial e temporal, torna-se mais apropriado empregar o coeficiente *ρ*DCCA para a mensuração de correlações cruzadas, tanto lineares quanto não lineares (Santos *et al*., 2024).

## 2.7. Coeficiente de correlação cruzada sem tendência – $\rho_{DCCA}$

Segundo Zebende (2011), o expoente obtido a partir da aplicação do DCCA quantifica a correlação cruzada como lei de potência, porém, não quantifica o nível da correlação cruzada. Dessa forma, o mesmo autor modelou o $\rho_{DCCA}$ para quantificar o nível de correlação cruzada, tendo como base o DFA e DCCA.

O $\rho_{DCCA}$ permite avaliar a correlação cruzada entre duas séries temporais de igual tamanho $N$ em diferentes escalas de tempo, com coeficiente variando entre -1 e 1, sendo que: -1 significa uma anticorrelação perfeita; 1, a correlação perfeita e coeficiente = 0 quer dizer que não existe correlação cruzada entre os sinais (Zebende, 2011).

O $\rho_{DCCA}$ pode ser classificado em diferentes níveis de intensidade de acordo com seu intervalo de valores. A tabela 2 apresenta a classificação destes níveis.

**Tabela 2**- Classificação do coeficiente $\rho_{DCCA}$.

| Intervalo | Classificação |
|---|---|
| $0 < \rho\text{DCCA} < 0{,}20$ | Muito fraca |
| $0{,}20 \leq \rho\text{DCCA} < 0{,}40$ | Fraca |
| $0{,}40 \leq \rho\text{DCCA} < 0{,}60$ | Moderada |
| $0{,}60 \leq \rho\text{DCCA} < 0{,}80$ | Forte |
| $0{,}80 \leq \rho\text{DCCA} < 1{,}00$ | Muito forte |

A modelagem do $\rho_{DCCA}$ em diferentes escalas de tempo de tamanho $n$, é definida como a relação entre a função de covariância sem tendência do método DCCA e a função de variância sem tendência do método DFA. A modelagem do $\rho_{DCCA}$ é denotada pela seguinte expressão (Zebende, 2011; Kristoufek, 2013; Machado, Zebende e Guedes, 2015; Da Silva *et al*., 2015):

$$\rho_{DCCA}(n) \cong \frac{F^2{}_{DCCA}(n)}{F_{DFA1}(n)\, F_{DFA2}(n)} \tag{7}$$

Segundo Zebende, Da Silva e Machado Filho (2013), e comprovado na pesquisa de (Silva Filho, 2014), a relação estatística entre os expoentes dos métodos DFA e DCCA, via diferenciação do $\rho_{DCCA}$ pode ajudar no entendimento das correlações em situações de séries não estacionárias.

Segundo Podobnik *et. al* (2011) a significância estatística do $\rho_{DCCA}$ consiste na simulação 10.000 pares de séries sem memória ($\alpha_1$DFA=0,50; $\alpha_2$DFA=0,50) de um processo gaussiano *iid* (independente e identicamente distribuído) com média zero e variância igual a 1. A partir da correlação bivariada entre pares das séries simuladas é possível estabelecer os limites dentro dos quais a correlação cruzada não será estatisticamente significativa, tendo como alicerce os quantis da distribuição normal de probabilidade, com certo nível de confiança. A hipótese nula do teste é que o coeficiente de correlação cruzada sem tendência é igual a zero. Nesta pesquisa, o teste estatístico do coeficiente de correlação sem tendência foi implementado com a linguagem R com o pacote denominado GMZTests idealizado por Guedes, Da Silva Filho e Zebende (2021).

## 2.8. Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient – DMC

Como mencionado na seção anterior, o $\rho_{DCCA}$ é capaz de estudar a correlação cruzada de longo alcance entre duas séries temporais, através do coeficiente de correlação cruzada sem tendência ($\rho_{DCCA}$), conforme a equação 8.

$$\rho_{xa,xb}(n) \cong \frac{F^2{}_{DCCA}(n)}{F_{DFA\{xa\}}(n)\, F_{DFA\{xb\}}(n)} \tag{8}$$

Entretanto, há casos em que se deseja analisar a correlação cruzada entre várias séries temporais (correlação cruzada múltipla) não estacionárias. Nesta situação, o Detrended

Multiple Cross-Correlation Coefficient, em português Coeficiente de Correlação Cruzada Múltipla sem Tendência, idealizado por Zebende e Da Silva Filho (2018) é um método indicado e tem sido utilizado em diversas áreas do conhecimento, como por exemplo (Brito, Araújo e Zebende, 2019) (variáveis meteorológicas), (Guedes, Da Silva Filho e Zebende, 2021) (em mercados de ações globais), (Wang, Xu e Fan, 2021) (dados do sistema financeiro e do ambiente) e (Afuecheta e Omar, 2021) (descrever as interações e as dependências complexas entre variáveis climáticas e variáveis relacionadas às culturas).

Para um exemplo em que temos duas variáveis independentes $x_1$ e $x_2$ e uma variável dependente $y$, a equação que define o coeficiente de correlação DMC será (Zebende e Da Silva Filho, 2018):

$$DMC_x^2\ (n) = \frac{\rho^2{}_{y,x1}(n)+\rho^2{}_{y,x2}(n)-2\rho_{y,x1}(n)\rho_{y,x2}(n)\rho_{x1,x2}(n)}{1-\rho^2{}_{x1,x2}(n)} \quad (9)$$

O coeficiente $DMC_x^2\ (n)$ varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior é a correlação cruzada múltipla sem tendência entre as variáveis, já quanto mais próximo de 0, menor é a correlação.

A tabela 3 refere-se aos níveis de classificação do coeficiente $DMC_x^2\ (n)$ de acordo com seus respectivos intervalos (Zebende e Da Silva Filho, 2018).

Vale ressaltar que o $DMC_x^2\ (n)$ é calculado tendo como base o $\rho_{DCCA}$, nesse sentido, visto que nesta pesquisa foi utilizado a metodologia das janelas deslizantes, para o $DMC_x^2\ (n)$ foi realizado o mesmo procedimento para a análise dinâmica das correlações múltiplas entre as flutuações das séries temporais da Umidade relativa do ar, Temperatura do ar e Radiação solar.

**Tabela 3**- Intervalos de coeficientes de correlação cruzada múltipla sem tendência.

| **Níveis** | $\boldsymbol{DMC_x^2\ (n)}$ |
|---|---|
| Muito fraco | 0,0 – 0,2 |
| Fraco | 0,2 – 0,4 |
| Médio | 0,4 – 0,6 |
| Forte | 0,6 – 0,8 |
| Muito forte | 0,8 – 1,0 |

A significância estatística do DMC foi idealizada por Silva Filho *et. al*, (2021) a partir da geração de 10.000 trios de séries aleatórias de um processo gaussiano *iid* com média zero e variância igual a 1 (Y, $X_1$ e $X_2$). A partir desta simulação é calculado o DMC das séries simuladas de modo que seja possível, com certo nível de confiança, em função da distribuição beta de probabilidade, estabelecer os limites dentro dos quais o DMC não será estatisticamente significativo. As hipóteses do teste do DMC são: H0: DMC=0; H1: DMC>0, em que "H0" denota a hipótese nula e "H1" hipótese alternativa. Neste estudo, o teste estatístico do coeficiente de correlação cruzada múltipla sem tendência (DMC) foi realizado com o pacote implementado na linguagem R GMZtest (Guedes, Da Silva Filho e Zebende, 2021).

# 3. RESULTADOS

## 3.1. Análise exploratória dos dados

A figura 2 apresenta os coeficientes estatísticos para a análise exploratória dos dados das médias diárias das variáveis climatológicas Radiação solar, Temperatura do ar e Umidade relativa do ar para o município de Feira de Santana no período estudado (2009 a 2019).

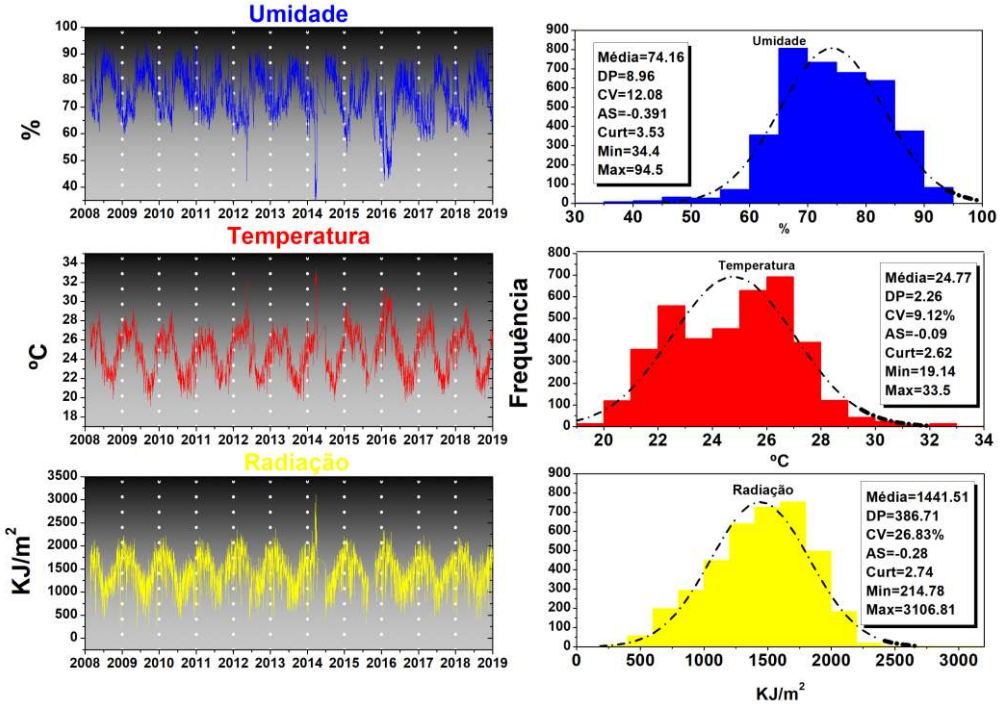
Por meio dos dados apresentados nesta figura é possível descrever o comportamento das três variáveis estudadas. Podemos identificar várias propriedades importantes das séries temporais, como a sazonalidade, correlação cruzada bivariada e multivariada. É possível inferir também que a série possui memória, ou seja, autocorrelação.

Além disso, analisando descritivamente a série original, observa-se que as séries da Temperatura do ar e Radiação solar apresentam correlação positiva, em contrapartida, ao comparar as séries da Temperatura do ar e Umidade relativa do ar e Radiação solar e Umidade relativa do ar, a correlação é negativa. Apesar dos dados apresentados na Figura 2 nos apontarem para estas interpretações com relação a autocorrelação e correlação cruzada, apenas a análise descritiva da série original não é possível inferir em qual escala e qual período esta correlação é mais forte ou mais fraca ao longo do tempo. Para isto, utilizamos os métodos Detrended Fluctuation Analysis (DFA), Coeficiente de correlação cruzada sem tendência ($\rho_{DCCA}$) e o $DMC_x^2\ (n)$ apresentados na seção metodológica.

A medida descritiva CV indica que há uma homogeneidade dos dados para as três variáveis analisadas, uma vez que os valores encontrados podem ser considerados baixos,

indicando que existe pouca variação dos valores. Com relação a assimetria, para Radiação solar e Umidade relativa do ar, os resultados foram negativos, isso denota que há concentração dos dados acima da média, já para Temperatura do ar o resultado foi positivo, ou seja, os dados estão concentrados abaixo da média. Para a medida descritiva curtose, a Radiação solar e Temperatura do ar apresentaram valores menores que 3, isto é, os dados possuem distribuição platicúrtica, com uma maior dispersão dos dados. Já a Umidade relativa do ar apresentou resultado maior que 3 (curva leptocúrtica), indicando que há menor dispersão dos dados.

**Figura 2** - Análise exploratória da série original das variáveis Umidade relativa do ar, Temperatura do ar e Radiação solar para o município de Feira de Santana no período de 2009 a 2019.



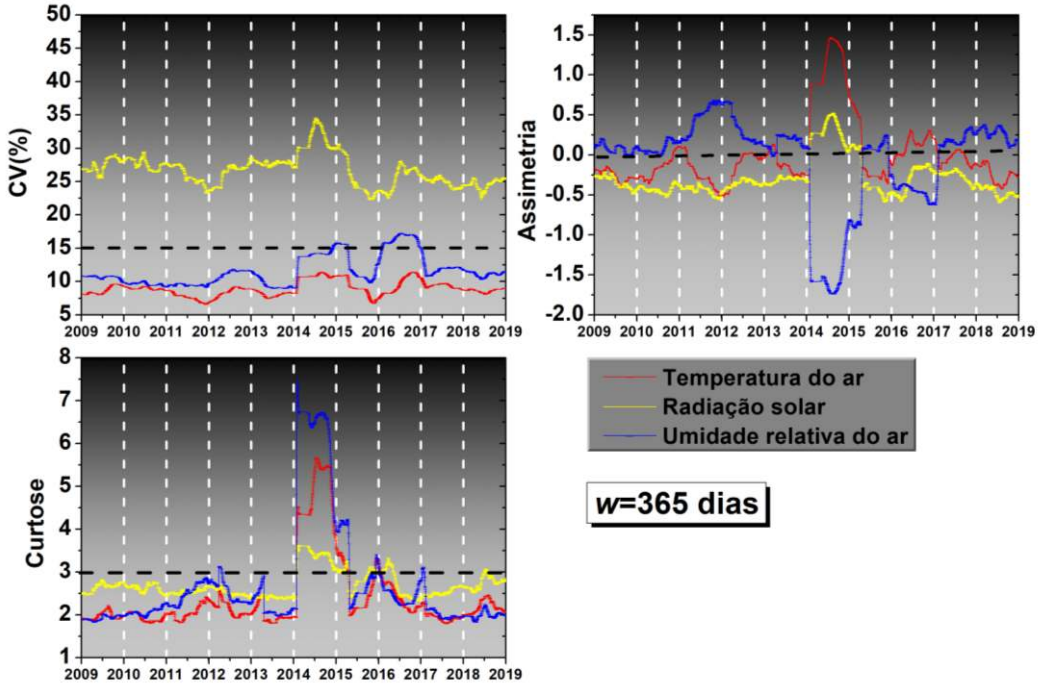

**Fonte:** Elaborado pelos autores. Nota: "DP" denota desvio-padrão; "CV" coeficiente de variação (desvio-padrão/média)x100; "AS" coeficiente de assimetria; "Curt" coeficiente de curtose; "Min" mínimo; "Max" Máximo.

## 3.2. Descritiva – Janelas deslizantes

A Figura 3 exibe os resultados das medidas descritivas Coeficiente de variação (CV), Assimetria e Curtose para as três séries temporais estudadas na pesquisa, utilizando a abordagem das janelas deslizantes com uma janela de 365 dias ($w$ = 365).

É possível observar que em Feira de Santana, no período estudado, dentre as três séries analisadas (Temperatura do ar, Umidade relativa e Radiação solar), a Radiação solar apresentou maior variação relativa, seguida da Umidade relativa e por último a Temperatura. Foi identificado um comportamento semelhante entre as séries temporais, no qual é detectado um súbito aumento na variação dos dados entre os anos de 2014 e 2015, seguido de um decréscimo no final de 2015, voltando a aumentar no início de 2016 e diminuindo novamente nos primeiros meses de 2017. Nos últimos anos analisados da série, os CVs se mantiveram relativamente constantes, variando em torno de 27% para a Radiação, 12% para a Umidade e 8% para a Temperatura.

**Figura 3** - Coeficiente de variação, Assimetria e Curtose com abordagem das janelas deslizantes ($w$ = 365) das variáveis Umidade relativa do ar, Temperatura do ar e Radiação solar para o município de Feira de Santana no período de 2009 a 2019.



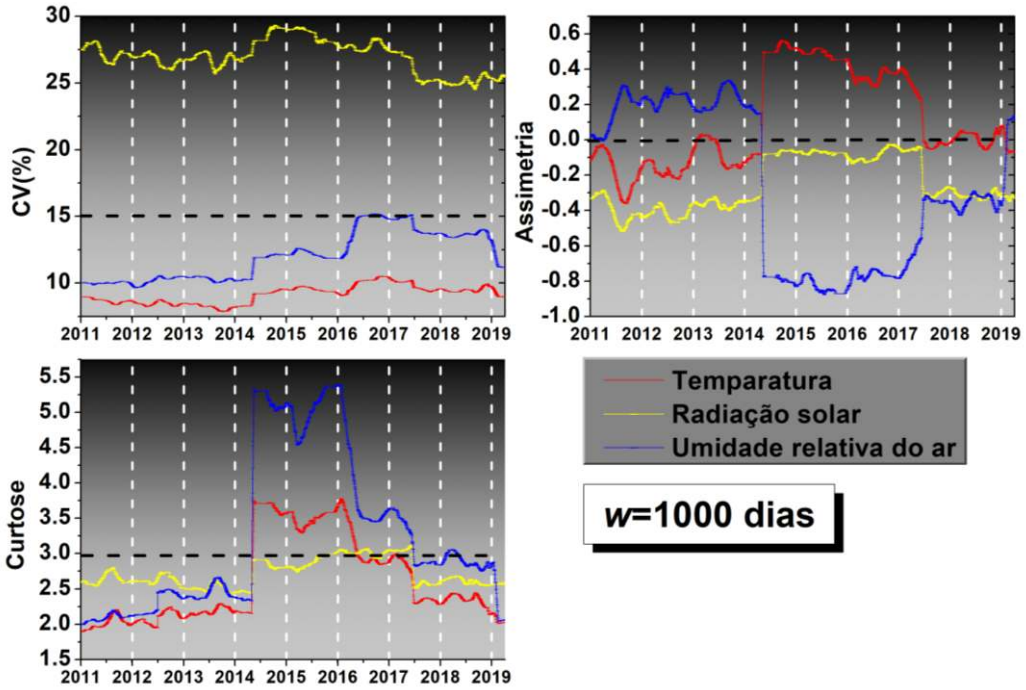

**Fonte:** Elaborado pelos autores. Nota: CV% denota coeficiente de variação (desvio padrão/ média) x100.

Todas as séries apresentaram oscilações na Assimetria com momentos em que eram positiva e outros negativa. Analisando de forma individual, a Umidade expressou maior predominância de assimetria positiva, por outro lado, a Temperatura e Radiação tiveram maior predominância de assimetria negativa.

A Curtose com abordagem das janelas deslizantes mostrou que as séries apresentaram predominantemente comportamento platicúrtico ($K$ < 3), porém, entre os anos de 2014 e 2015 ocorreu um aumento nos valores de Curtose ($K$ > 3) mudando seu comportamento para leptocúrtico. Em alguns anos as séries são classificadas como mesocúrtica sendo o coeficiente de Curtose $K$ =3.

A seguir serão discutidas as medidas descritivas aqui propostas, com um tamanho de janela igual a 1000 dias (Figura 4), com o objetivo de analisar dinamicamente e com uma quantidade maior de pontos nas séries.

**Figura 4** - Coeficiente de variação, Assimetria e Curtose com abordagem das janelas deslizantes ($w$ = 1000) das variáveis Umidade relativa do ar, Temperatura do ar e Radiação solar para o município de Feira de Santana no período de 2009 a 2019.




**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Quando aumentamos o tamanho da janela, podemos observar uma suavização nas séries, porém os comportamentos se mantêm semelhantes aos obtidos com uma janela de aproximadamente 1 ano ($w$ = 365). A Radiação obteve maiores valores de variação relativa, em seguida, a Umidade e por último a Temperatura.

Com relação a assimetria, as séries da Umidade e temperatura apresentaram oscilações de comportamento assimétrico, anos em que foram positivas e anos em que foram

negativas, porém, ambas na maior parte do tempo com comportamento assimétrico negativo. A Radiação expressou assimetria negativa em todos os anos analisados (para uma janela de $w$ = 1000), diferentemente do que foi encontrado quando analisamos com uma janela menor ($w$ = 365), no qual foi identificado períodos com assimetria positiva. Esses resultados de assimetria para a série de Radiação, considerando $w$ = 365 e $w$ = 1000 corroboram com os achados de (Ferreira, 2021), em que em sua pesquisa também identificou essa variação no comportamento a depender do tamanho da janela analisada.

A Curtose com abordagem das janelas deslizantes para uma janela de tamanho $w$ = 1000 mostrou que as séries apresentaram predominantemente comportamento platicúrtico ($K$ < 3), porém, entre os anos de 2014 e 2017 ocorreu um aumento nos valores de Curtose ($K$ > 3) com uma inversão no seu comportamento para leptocúrtico. Em alguns anos as séries tocam a linha de referência do gráfico ($K$ =3), sendo classificadas como mesocúrtica.

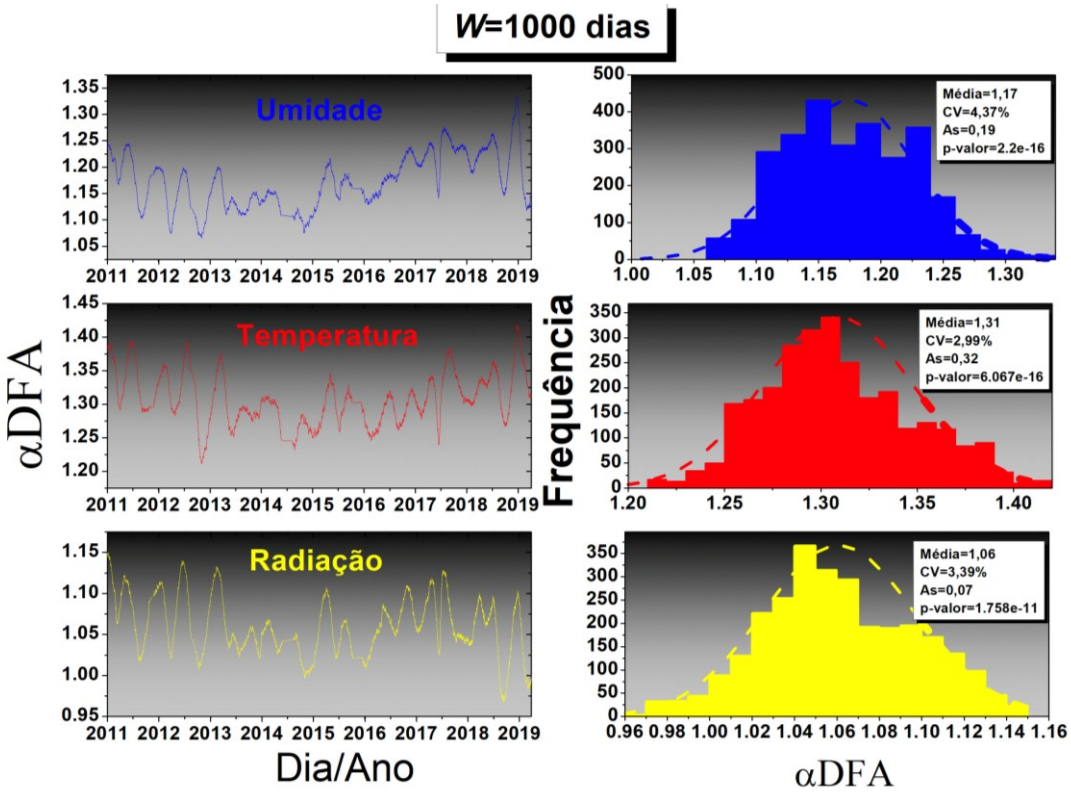
## 3.3. DFA – Janelas deslizantes

A figura 5 apresenta a flutuação do αDFA com abordagem de janelas deslizantes (w = 1000) acompanhado de seus respectivos histogramas já a figura 6 apresenta os resultados da significância estatística dos expoentes αDFA, com 95% de confiança.

Analisando o histograma, de acordo com o teste de Shapiro Wilk, interpretado através do p-valor, para as três variáveis estudadas no município de Feira de Santana, os dados da flutuação do αDFA não são normalmente distribuídos (p-valor< 0, 05). Ainda sobre a distribuição de frequência, a Umidade relativa do ar apresentou maior variabilidade relativa (CV=4,37%), seguida da Radiação solar (CV=3,39%) e Temperatura do ar (CV=2,99%) (Figura 5).

Os resultados do teste estatístico do expoente αDFA, para uma janela deslizante de 1000 dias (w=1000) foram estatisticamente significativos com 95% de confiança (p-valor<0,05 e $R^2$ maiores ou iguais a 0,96), e esses achados convergem com a pesquisa de Carbone *et al*. (2004), que prova em sua investigação que os resultados do método DFA são estatisticamente significativos para séries temporais com no mínimo 1000 pontos.

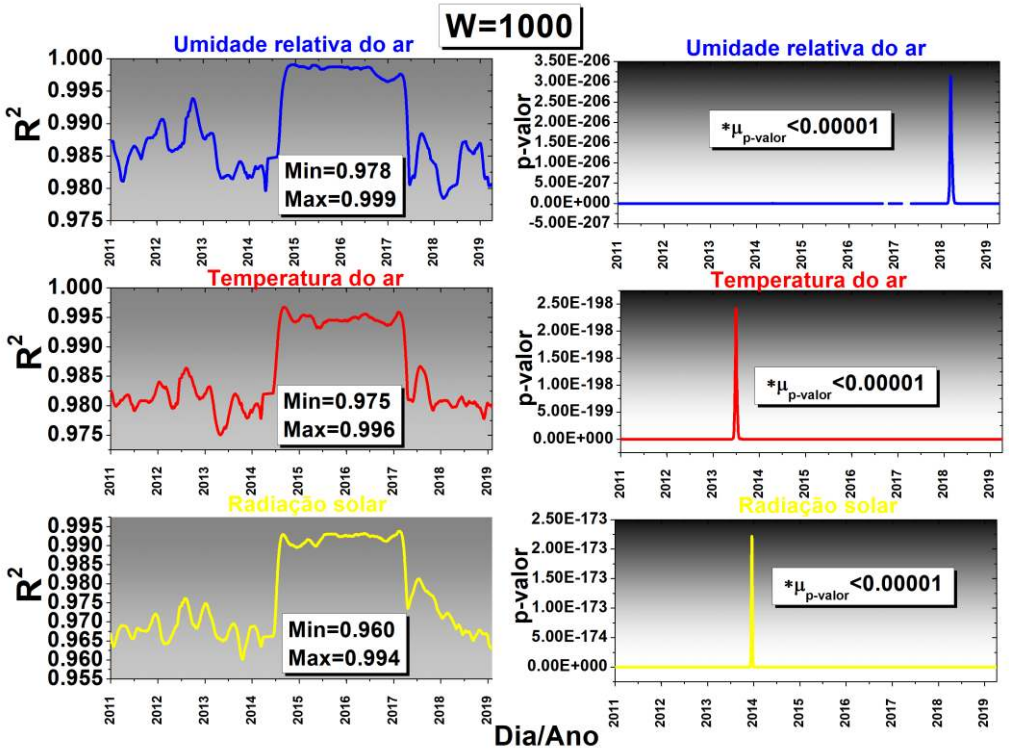
**Figura 5** - Comportamento do expoente αDFA com abordagem das janelas deslizantes ($w$ = 1000 dias) das variáveis Umidade relativa do ar, Temperatura do ar e Radiação solar para o município de Feira de Santana, no período de 2009 a 2019.




**Fonte:** Elaborado pelos autores. Nota: "CV%" denota coeficiente de variação (desvio padrão/ média) x100; "As" coeficiente de assimetria; "p-valor" nível descritivo do teste de normalidade com 95% de confiança.

Apesar da variável Radiação solar apresentar alguns valores de DFA menores que 1 (final do ano de 2018 ao final de 2019), na maior parte dos resultados o DFA identificou comportamento persistente e não estacionário nas séries temporais estudadas (α > 1).

**Figura 6** - Teste estatístico do expoente αDFA com 95% de confiança com abordagem das janelas deslizantes ($w$ = 1000 dias) das variáveis Umidade relativa do ar, Temperatura do ar e Radiação solar para o município de Feira de Santana, no período de 2009 a 2019. Nota: O $R^2$ e p-valor foram obtidos por meio da equação 3 do método DFA, via modelo de regressão de linear simples.




**Fonte:** Elaborado pelos autores. Notas: 1 - * denota a média dos valores descritivos do teste de hipótese (p-valor). 2 - A hipótese nula é que αDFA=0. 3 - p-valor<0,05 rejeita-se a hipótese nula.

Os resultados obtidos, com valores de αDFA> 0,5 para as séries temporais das três variáveis analisadas neste estudo, indicam a presença de comportamento persistente de longo alcance, caracterizando-as como séries com memória. Em termos práticos, isso significa que os efeitos de eventos passados continuam a influenciar os valores presentes ao longo do tempo (Peiris e Hunt, 2023). Dessa forma, caso haja uma tendência de aumento ou redução nas flutuações da temperatura do ar, umidade relativa do ar ou radiação solar no município de Feira de Santana, esse padrão tende a se manter no longo prazo.

No atual contexto das mudanças climáticas, marcado pelo aumento contínuo da temperatura da superfície global e pelo crescimento populacional acelerado, os riscos de inundações em áreas urbanas têm se intensificado de forma significativa (IPCC, 2023; Rogers *et al*., 2025). Essa realidade é particularmente preocupante no município de Feira de Santana. De acordo com Sousa *et al*. (2024), foi identificado um aumento gradativo da temperatura da superfície na região, com elevação de aproximadamente 1 °C no valor máximo da média anual

entre os anos de 2000 e 2020. Diante desse cenário, a ausência de medidas eficazes de mitigação e adaptação aos impactos das mudanças climáticas poderá comprometer o desenvolvimento urbano sustentável e agravar os efeitos ambientais, sociais e econômicos.

O αDFA apresentou maior persistência para a variável Temperatura quando comparado com as demais variáveis (αDFAtemperatura> αDFAumidade> αDFAradiação). Em outras palavras, caso exista uma tendência de crescimento ou decrescimento nas flutuações da série da Temperatura, Umidade e Radiação, este comportamento tende a ocorrer, em longo prazo, com maior intensidade na Temperatura.

A abordagem das janelas deslizantes ($w$ = 1000) aplicada nas séries temporais da Temperatura do ar, Umidade relativa do ar e Radiação solar, identificou para as três variáveis, valores de αDFA próximos de 1 (ruído rosa), esse resultado indica que há uma transição entre o comportamento estacionário e não estacionário. Foi identificado também valores maiores que 1, o que recebe o nome de comportamento persistente não estacionário com caminhos aleatórios (Walleczek, 2000).

Nas seções a seguir continuaremos as investigações do comportamento das flutuações das séries de Temperatura do ar, Radiação solar e Umidade relativa do ar, em Feira de Santana. As próximas análises dizem respeito à correlação entre pares de séries (através do $\rho_{DCCA}$) e três séries temporais (por meio do $DMC_x^2\ (n)$).

## 3.4. $\rho_{DCCA}$ – Janelas deslizantes

Nesta seção iremos quantificar os níveis de correlações cruzadas entre as séries de Temperatura do ar, Radiação solar e Umidade relativa do ar no município de Feira de Santana, com abordagem das janelas deslizantes, por meio de diagramas de cores.

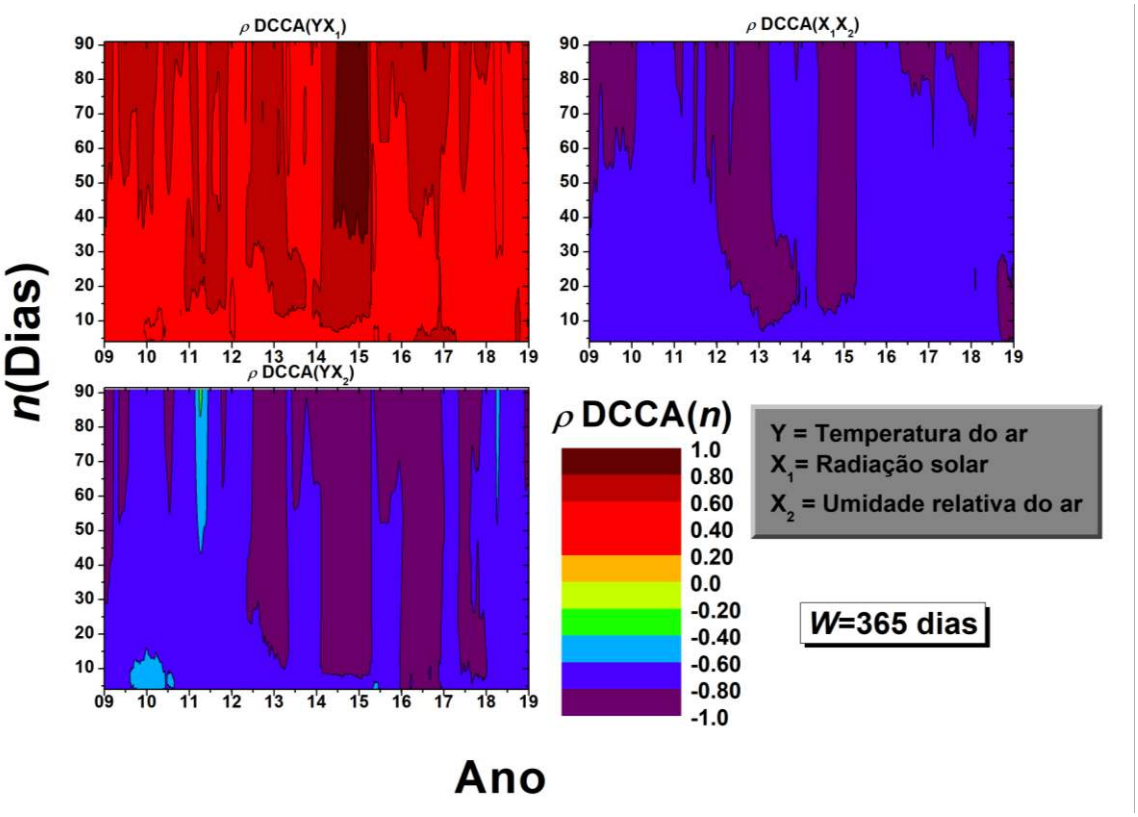
Para a interpretação dos resultados de $\rho_{DCCA}$ apresentados nas Figuras 7 e 8, consideramos a classificação dos intervalos conforme a Tabela 4.

**Tabela 4**- Classificação do coeficiente $\rho_{DCCA}$.

| Intervalo | Classificação |
|---|---|
| $0,00 < \|\rho DCCA\| < 0,20$ | Muito fraca |
| $0,20 \leq \|\rho DCCA\| < 0,40$ | Fraca |
| $0,40 \leq \|\rho DCCA\| < 0,60$ | Moderada |
| $0,60 \leq \|\rho DCCA\| < 0,80$ | Forte |
| $0,80 \leq \|\rho DCCA\| < 1,00$ | Muito forte |

A Figura 7 representa os valores de $\rho_{DCCA}$ para uma janela de aproximadamente 1 ano ($w$ = 365), para diferentes escalas de tempo ($n$), no qual $Y$ =Temperatura do ar, $X_1$=Radiação solar e $X_2$=Umidade relativa do ar. Diante dessa definição, combinamos os pares de séries para aplicar o método e analisar a correlação entre elas da seguinte forma: $Y$ e $X_1$, $Y$ e $X_2$ e $X_1$ e $X_2$.

**Figura 7** - Comportamento do coeficiente $\rho$DCCA com abordagem das janelas deslizantes ($w$ = 365) das variáveis Umidade relativa do ar, Temperatura do ar e Radiação solar para o município de Feira de Santana no período de 2009 a 2019.




**Fonte:** Elaborado pelos autores.

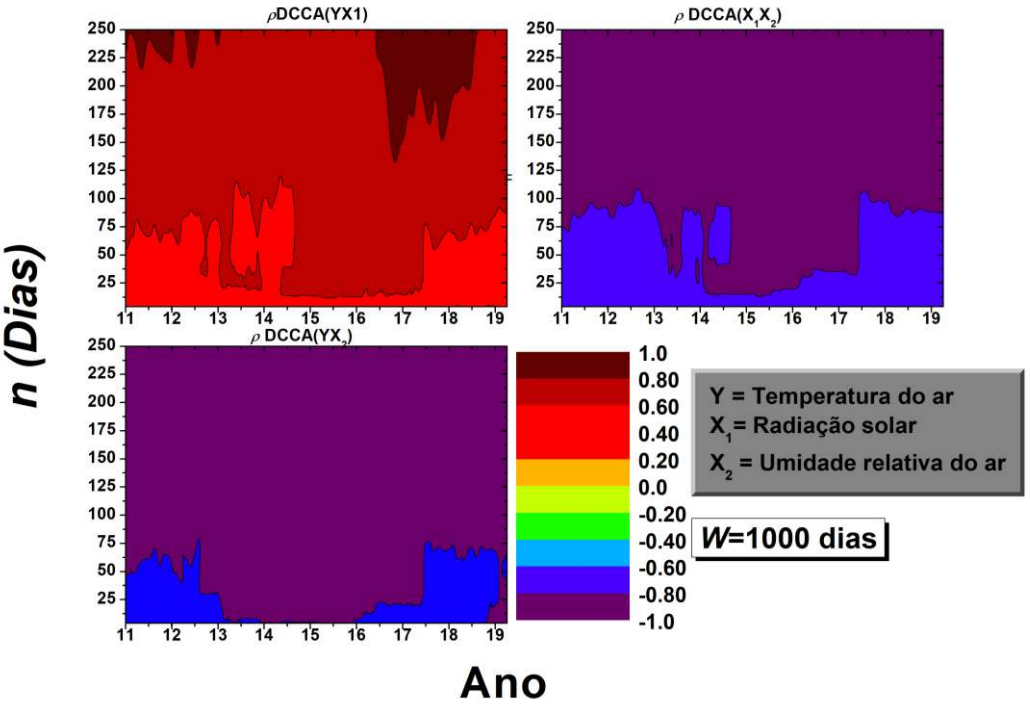
Em Feira de Santana, é possível identificar uma maior frequência de correlação positiva ($\rho_{DCCA}$ > 0) entre Temperatura do ar e Radiação solar para todas as escalas de tempo

avaliadas, com classificação qualitativa variando de Fraca a Muito forte, sendo classificada como Muito forte (0, 80 $\rho_{DCCA}$ < 1, 00) para n variando de $n$ = 40 a $n$ = 90, entre os anos de 2014 e início de 2015 e para $n$ > 80 no final de 2016 a início de 2017.

A Radiação solar e Umidade relativa apresentaram predominantemente correlação negativa ($\rho_{DCCA}$ < 0), sendo classificado com variação de Forte a Muito forte, tanto para escalas menores ($n$ = 10), quanto para maiores escalas ($n$ = 90). Para a Temperatura do ar e Umidade relativa foi detectada uma correlação negativa variando de Moderada a Muito forte em quase todas as escalas de tempo $n$.

Com o objetivo de aumentar o número de pontos analisados nas séries, e consequentemente a precisão dos resultados, calculou-se o $\rho_{DCCA}$ para uma janela de tamanho $w$ = 1000, para avaliar o comportamento da correlação cruzada das flutuações das séries de Temperatura do ar, Radiação solar e Umidade relativa do ar em diferentes períodos (anos) e escalas de tempo ($n$). Os resultados são apresentados da Figura 8.

**Figura 8** - Comportamento do coeficiente ρDCCA com abordagem das janelas deslizantes ($w$ = 1000) das variáveis Umidade relativa do ar, Temperatura do ar e Radiação solar para o município de Feira de Santana no período de 2009 a 2019.




**Fonte:** Elaborado pelos autores.

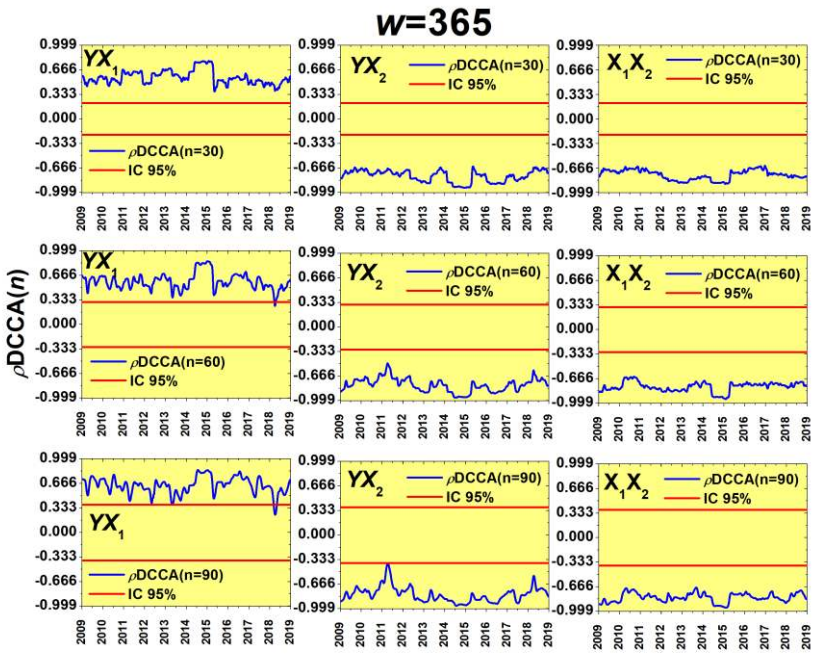
A Temperatura e Radiação apresentaram correlação positiva ( $\rho_{DCCA}$ > 0), sendo classificada qualitativamente como Fraca a Muito forte. Para escalas maiores ($n$ > 213) foi identificado correlação Muito forte (0, 80 $\rho_{DCCA}$ < 1, 00) para o período entre os anos de 2011 e 2013 e para escalas com $n$ > 125 no período de 2016 a 2018.

Para Radiação e Umidade em todos os períodos estudados (anos) foi encontrado correlação negativa Forte em escalas menores de dias ($n$ < 100) e Muito forte para maiores escalas ($n$ > 100). Entre a Temperatura e Umidade identificou-se correlação negativa Forte em escalas menores de dias ($n$ < 75) e Muito forte para maiores escalas ($n$ > 75), para todos os períodos.

Os resultados encontrados por meio do $\rho_{DCCA}$ convergem com os obtidos através na análise exploratória dos dados, em que foi identificado entre a Temperatura e Radiação solar correlação cruzada positiva, ou seja, fica comprovado por meio do método que na presente área de estudo no período analisado, valores altos/baixos de Temperatura tendem a ser acompanhados de registros de valores altos/baixos de Radiação solar ou vice-versa. Em contrapartida, entre a Temperatura do ar e Umidade relativa existe uma correlação cruzada negativa (relação antipersistente), isto é, valores altos de Temperatura tendem a ser acompanhados de valores baixos de Umidade relativa.

Com o objetivo de validar os achados apresentados nesta pesquisa em relação ao coeficiente $\rho$DCCA com o procedimento de janelas deslizantes, executamos o teste estatístico idealizado por Podobnik *et al*. (2011) em função do tamanho da janela (w=365 e w=1000 dias) e das escalas temporais (n=30, n=60 e n=90 dias), com 95% de confiança (Figura 9 e Figura 10).

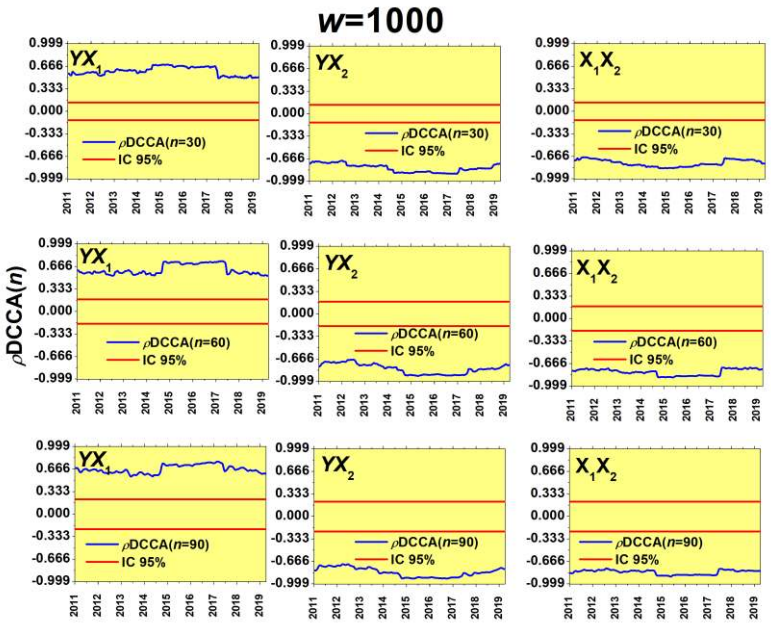
**Figura 9** – Execução do teste estatístico do coeficiente $\rho_{DCCA}$ com abordagem das janelas deslizantes ($w$ = 365 dias) em escalas temporais específicas (n=30, n=60 e n= 90 dias) das variáveis Temperatura do ar (Y), Radiação solar ($X_1$) e Umidade relativa do ar ($X_2$) para o município de Feira de Santana no período de 2009 a 2019.




**Fonte:** Elaborado pelos autores. Notas: 1 - As linhas vermelhas horizontais correspondem aos limites acima dos quais os coeficientes de correlação cruzada sem tendência serão estatisticamente diferentes de zero ao nível de 5% de significância; 2 - O teste estatístico foi executado com a linguagem R por meio do pacote GMZTests implementado por Guedes, Da Silva Filho e Zebende (2021).

A não significância estatística da correlação cruzada sem tendência com a abordagem da janela deslizante, ao nível de 5% de significância, ocorreu apenas entre as variáveis temperatura do ar (Y) e a radiação solar ($X_1$), para janela de 365 dias (1 ano de análise) e escalas temporais iguais a 60 e 90 dias (2º semestre de 2018) (Figura 9). Para os demais casos a correlação, segundo o teste estatístico implementado por Podobnik *et al*. (2011), foram estatisticamente significativos com 95% de confiança (Figura 10).

**Figura 10** – Execução do teste estatístico do coeficiente $\rho_{DCCA}$ com abordagem das janelas deslizantes em função do tamanho da janela ($W$ = 1000 dias) e escalas temporais (n=30, n=60 e n= 90 dias) Temperatura do ar (Y), Radiação solar ($X_1$) e Umidade relativa do ar ($X_2$) para o município de Feira de Santana no período de 2009 a 2019.




**Fonte:** Elaborado pelos autores. Notas: 1 - As linhas vermelhas horizontais correspondem aos limites que os coeficientes de correlação cruzada sem tendência serão denotados sem significância estatística com 95% de confiança; 2 - O teste estatístico foi executado com a linguagem R por meio do pacote GMZTests implementado por Guedes, Da Silva Filho e Zebende (2021).

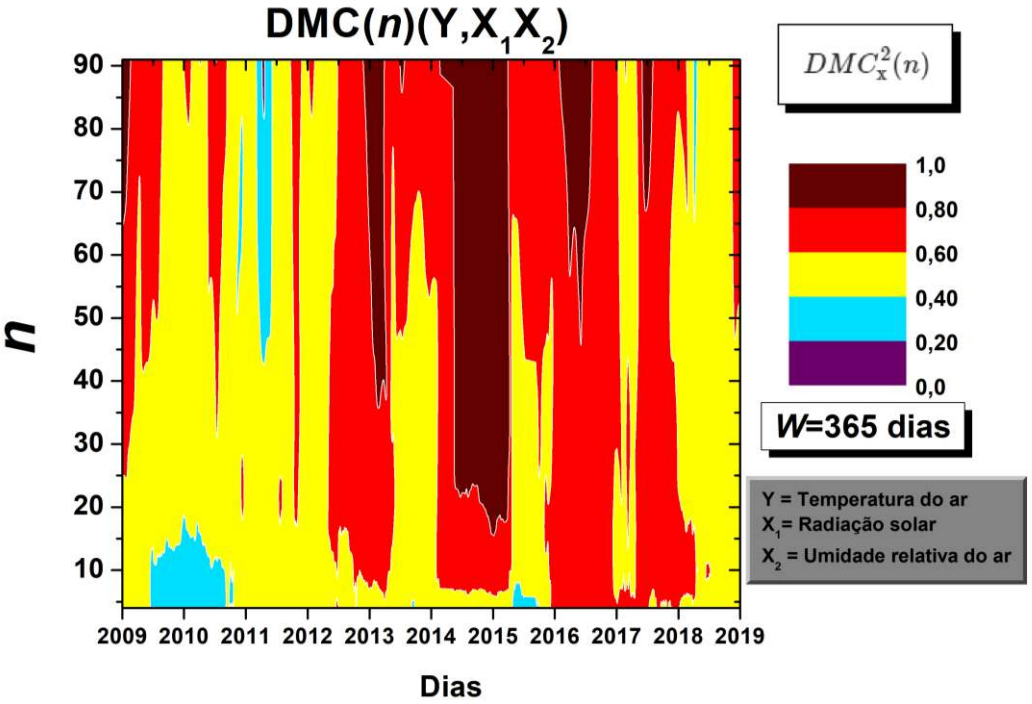
Nossos achados, em relação ao teste estatístico, convergem com a teoria desenvolvida por Podobnik *et al.* (2011) ao encontrar maior significância estatística para séries maiores. A seguir, continuaremos com as investigações, finalmente, estudaremos a Correlação Cruzada Múltipla entre as três variáveis objeto de estudo.

## 3.5. DMC – Janelas deslizantes

Nesta seção iremos apresentar os resultados do Coeficiente de Correlação Cruzada Múltipla sem Tendência ( $DMC_x^2\,(n)$ ), idealizado por Zebende e Da Silva Filho (2018). Diferentemente de outros trabalhos encontrados na literatura como Brito, Araújo e Zebende (2019); Afuecheta e Omar (2021); Guedes, Da Silva Filho e Zebende (2021); Wang, Xu e Fan (2021), na presente pesquisa calculamos o $DMC_x^2\,(n)$ com a abordagem das janelas deslizantes aplicado em variáveis climatológicas, o que permitiu analisar dinamicamente as series em diferentes pontos.

A Figura 11 representa os valores de $DMC_x^2\ (n)$ para uma janela $w$ = 365, no qual $Y$=Temperatura do ar (variável dependente), $X_1$=Radiação solar (variável independente) e $X_2$=Umidade relativa do ar (variável independente). Como opção metodológica decidimos utilizar a Temperatura como variável dependente, uma vez que o comportamento das suas variações pode ser influenciado por outras variáveis como as que estamos estudando. Diante dessa definição, foi aplicado o método para analisar a correlação múltipla entre as séries.

**Figura 11** - Comportamento do coeficiente DMC com abordagem das janelas deslizantes ($w$= 365) das variáveis Umidade relativa do ar, Temperatura do ar e Radiação solar para o município de Feira de Santana no período de 2009 a 2019.




**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Para a interpretação dos resultados do coeficiente DMC utilizamos as classificações dos níveis de intensidade conforme a tabela 5.

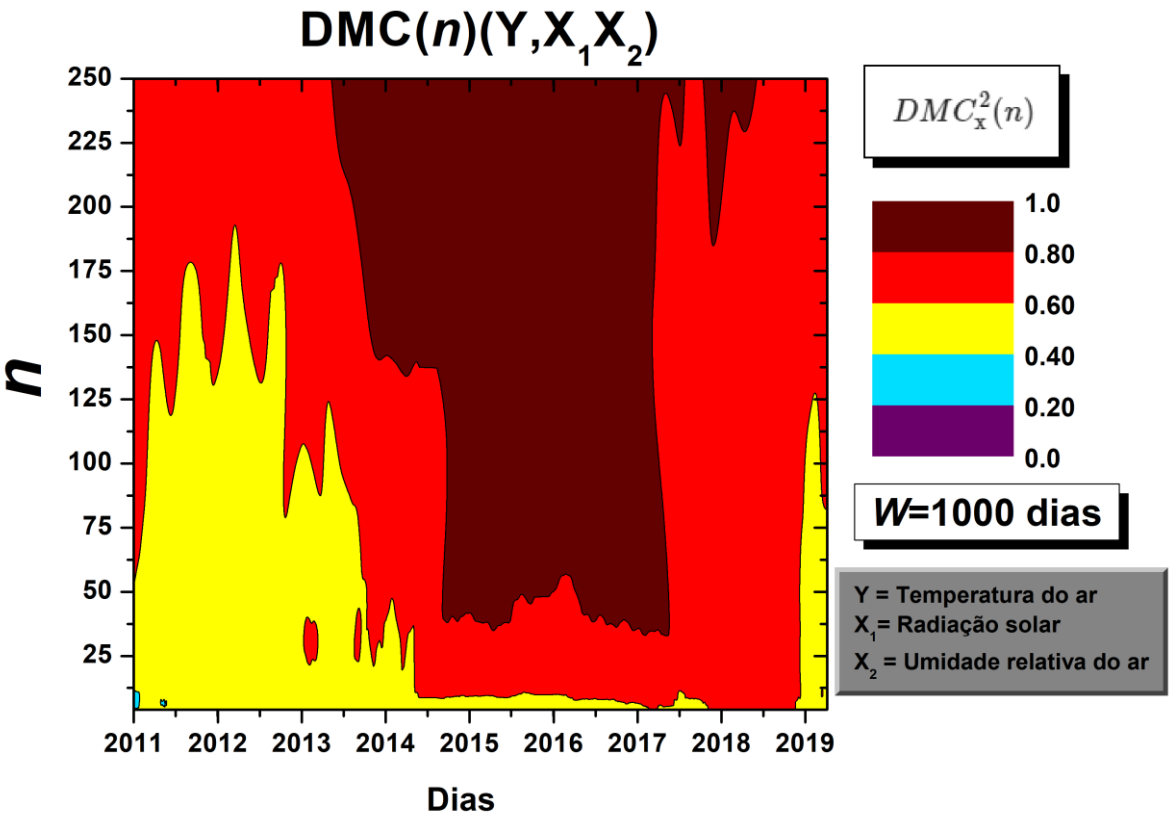
**Tabela 5**- Intervalos de coeficientes de correlação cruzada múltipla sem tendência.

| **Níveis** | $\boldsymbol{DMC_x^2\ (n)}$ |
|---|---|
| Muito fraco | 0,0 – 0,2 |
| Fraco | 0,2 – 0,4 |
| Médio | 0,4 – 0,6 |
| Forte | 0,6 – 0,8 |
| Muito forte | 0,8 – 1,0 |

Para uma janela de aproximadamente 1 ano é encontrado uma correlação variando de fraca a muito forte a depender da escala e do ano analisado. Entre os anos de 2009 e 2010 a correlação cruzada múltipla é considerada fraca para escalas de tempo menores ($n$ < 20). A medida que aumenta o tamanho da escala ($n$ > 20), essa correlação aumenta de intensidade indo até muito forte ($DMC_x^2\ (n)$ =1), visualizado principalmente no ano de 2015 (Figura 11).

A figura 12 apresenta o $DMC_x^2\ (n)$ para uma janela de tamanho $w$ = 1000. Ao passo que aumentamos o número de pontos analisados na série (tamanho da janela), conseguimos observar com maior detalhe os resultados obtidos através dos métodos estudados, uma vez que se torna mais sensível à detecção de mudanças no padrão do comportamento das variáveis.

**Figura 12**- Comportamento do coeficiente DMC com abordagem das janelas deslizantes ($w$ = 1000) das variáveis Umidade relativa do ar, Temperatura do ar e Radiação solar para o município de Feira de Santana no período de 2009 a 2019.



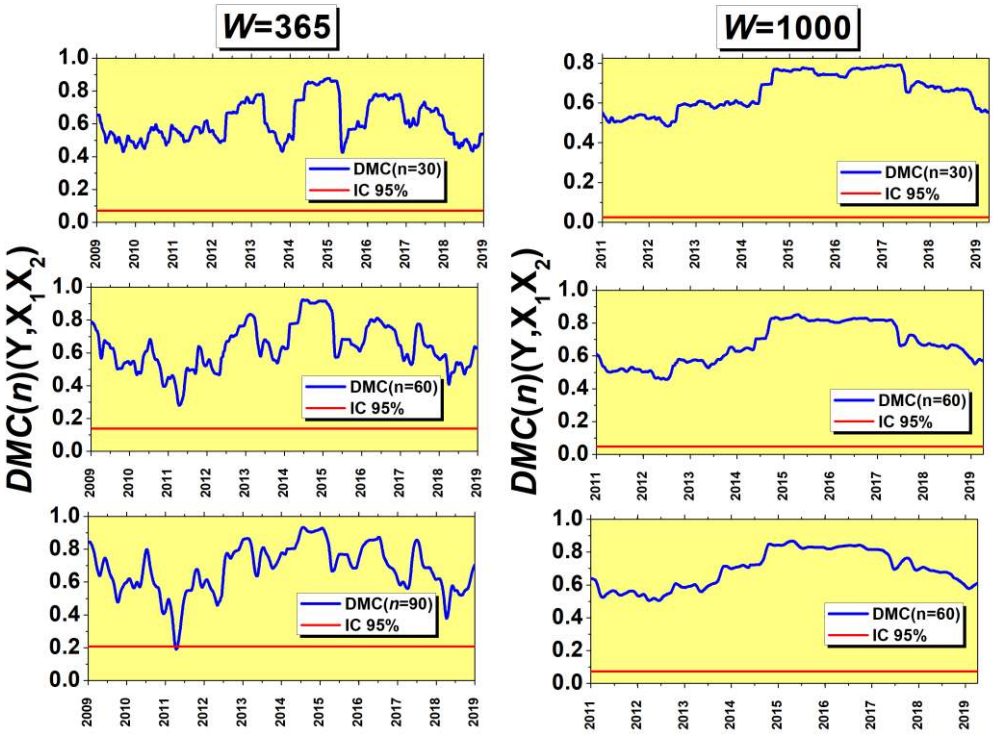

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Para $w$ = 1000 é predominantemente identificado uma correlação cruzada múltipla variando de média a muito forte. Entre 2011 e 2014 o $DMC_x^2\ (n)$ é médio (para $n$ < 190) e

forte para escalas maiores. A partir de aproximadamente julho de 2014 a julho de 2017 a correlação é muito forte, independentemente do tamanho da escala e no final de 2019 volta a se tornar média para médias escalas de tempo (Figura 12).

Para validar os achados do $DMC_x^2\ (n)$ aplicamos o teste estatístico desenvolvido por Silva Filho *et al.* (2021) com auxílio da linguagem R, com o pacote GMZTests implementado por Guedes, Da Silva Filho e Zebende (2021), com 95% de confiança (Figura 13).

**Figura 13**- Execução do teste estatístico do coeficiente DMC com abordagem das janelas deslizantes para ($W$= 365) e ($W$= 1000) e escalas temporais específicas (*n*=30, *n*=50 e *n*=90 dias) das variáveis Temperatura do ar (Y), Radiação solar ($X_1$) e Umidade relativa do ar ($X_2$) para o município de Feira de Santana no período de 2009 a 2019.




**Fonte:** Elaborado pelos autores. Nota: O teste estatístico do DMC foi executado com a linguagem R por meio do pacote GMZTests implementado por Guedes, Da Silva Filho e Zebende (2021).

De modo geral, os resultados encontrados de correlação cruzada múltipla (calculada com o coeficiente DMC) para o município de Feira de Santana, levando em consideração a Temperatura do ar, Radiação solar e Umidade relativa podem ser considerados qualitativamente forte e muito forte e estatisticamente significativos com 95% de confiança (Figura 13), evidenciado predominantemente para maiores escalas.

## 4. DISCUSSÃO

Existe um crescente aumento nas pesquisas que utilizam o método DFA para modelar a autocorrelação de séries temporais nas mais diferentes áreas: Astronomia (Zebende, Fernandez e Perreira, 2017); Sistema financeiro (Ferreira *et al*. 2018; Guedes *et al*., 2019; Zebende, Santos Dias e De Aguiar, 2022); Dados climatológicos (Koscielny-Bunde, 1998; Chen, Lin e Fu, 2007; Dos Anjos *et al*. 2015; Brito, Silva Filho e Zebende, 2015; Zebende *et al*. 2018; Iqbal, 2020; Zebende *et al*., 2021; Rodrigues, Filho e Guedes, 2022; Santos *et al*., 2022); Vazões de rios (Toledo *et al.* 2022); Poluentes atmosféricos (Palmeira *et al*. 2022). Porém, poucos trabalhos que combinem o método DFA com a técnica das janelas deslizantes, nesse sentido, nossa pesquisa traz importantes contribuições para a ciência e para a modelagem estatística de dados climatológicos.

Os resultados encontrados para a autocorrelação por meio do DFA convergem com os achados de Palmeira *et al*. (2022), para séries temporais de poluentes atmosféricos X variáveis climatológicas na região Metropolitana de Salvador-BA, também evidenciaram comportamento persistente (αDFA> 0, 5), além disso, encontraram valores de αDFA> 1, o que segundo os autores, implica que durante essas janelas deslizantes a série é não estacionária. Zebende *et al*. (2021), analisando autocorrelações em dados de temperatura do ar e umidade relativa por meio do DFA nos municípios de Barreiras, Cruz das Almas, Paulo Afonso e Salvador, na Bahia, concluíram que tanto para a temperatura quanto para a umidade, independentemente do município, os resultados de αDFA apontam comportamento persistente para a escala temporal $4 \leq n \leq 30$. Na mesma área de estudo da presente pesquisa (Feira de Santana), Santos *et al*. (2022), estudando séries temporais de velocidade do vento, utilizaram a abordagem das janelas deslizantes aplicada no método DFA e também evidenciaram comportamento persistente.

De acordo com Santos *et al*. (2022) existem poucos trabalhos na literatura que utilizaram o método DFA com a abordagem de janelas deslizantes aplicado a dados climatológicos. Diversas pesquisas como Koscielny-Bunde (1998); Chen, Lin e Fu (2007); Brito, Silva Filho e Zebende (2015); Zebende *et al*. (2018); Iqbal (2020); Zebende *et al*. (2021); Rodrigues, Filho e Guedes (2022), estudaram a autocorrelação de séries climatológicas por

meio do DFA e/ou $\rho_{DCCA}$, porém poucos com procedimento da análise dinâmica por meio das janelas deslizantes.

Como exemplos de pesquisas nesta área com aplicação dessas duas técnicas temos Dos Anjos *et al*. (2015), que utilizaram o DFA e DCCA com janelas deslizantes para modelar séries de velocidade do vento e radiação solar; Santos *et al*. (2022) em série temporal de velocidade do vento em alguns municípios do Estado da Bahia, Brasil; Palmeira *et al*. (2022), avaliaram a evolução de alguns poluentes atmosféricos e sua relação com variáveis climatológicas e Vafaeipour *et al*. (2014) que aplicaram a técnica de janelas deslizantes, porém combinado com redes neurais artificiais para previsão de séries temporais de velocidade do vento.

Os resultados de correlação cruzada negativa encontrados para a Temperatura e Umidade, modelados através do $\rho_{DCCA}$ corroboram com os obtidos por Brito, Silva Filho e Zebende (2015), para a mesma área de estudo, indicando um padrão de comportamento em Feira de Santana. Tratando-se de outros locais, em Wuhan, China, Fan, Liu e Wang (2019), encontraram em suas pesquisas correlação de persistência de longo alcance por meio do método Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (Análise de Flutuação Multifractal sem Tendência). Em Belo Horizonte, no sudeste do Brasil, o $\rho_{DCCA}$ aponta correlação cruzada negativa independente da escala analisada (Vassoler e Zebende, 2012). Em contrapartida, nas regiões a leste da montanha Taihang na China, foi observado correlação positiva quando se analisa na escala de tempo anual (Piao e Fu, 2016).

Como pode ser observado nos trabalhos supracitados, diversas pesquisas estudam o comportamento da correlação entre dados de temperatura e umidade, mas, poucos analisam esses dados associados também a radiação solar, nesse sentido, a presente pesquisa se destaca ao agregar mais uma variável climatológica neste conjunto (Radiação solar) e além disso, analisando de forma dinâmica por meio das janelas deslizantes.

Nossas descobertas referentes a correlação cruzada múltipla para a Temperatura do ar, Umidade relativa do ar e Radiação solar convergem com os encontrados por Brito, Araújo e Zebende (2019), em suas pesquisas, estudando as mesmas variáveis nos municípios de Cruz das almas, Salvador e Barreias obtiveram DMC variando de fraca a muito forte, além disso, para longas escalas de tempo, Barreiras e Cruz das Almas apresentam maior correlação cruzada múltipla se comparados a Salvador. Em contrapartida, Afuecheta e Omar (2021)

estudando a estrutura de dependência entre as variáveis climáticas precipitação e temperatura e as variáveis relacionadas à cultura, como produtividade e quantidade de produção em nove países da África Oriental, encontraram múltiplas correlações cruzadas variando de muito fracas a fracas dependendo do país, escala de tempo (*n*) e variáveis.

É importante relatar que os dados utilizados nesta pesquisa, por se tratarem de dados mensurados por estações climatológicas automáticas, estão sujeitos a interrupções na coleta dos dados. Porém, segundo Zebende, Brito e Castro (2020), os métodos utilizados neste estudo são eficazes diante dessa limitação.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa buscou mensurar e caracterizar a correlação cruzada entre séries temporais climatológicas do município de Feira de Santana, BA em diferentes escalas de tempo, através de uma análise exploratória e dinâmica (procedimento das janelas deslizantes), utilizando métodos renomados (DFA, DCCA, $\rho_{DCCA}$ e DMC) e comprovados sua robustez.

De modo geral, os resultados obtidos para ambos os tamanhos das janelas (w = 365 e w = 1000 dias) foram semelhantes, porém, quando aumentamos o tamanho da janela, podemos observar uma suavização nas séries, pois maior será a quantidade de subamostras sucessivas obtidas das séries e consequentemente maior a convergência para significância estatística.

Com base em nossos achados, é possível afirmar que os coeficientes de correlação cruzada utilizados neste estudo, que são específicos para mensurar correlações bivariadas e multivariadas entre séries temporais, podem ser empregados como um critério adicional na seleção de variáveis para modelos estatísticos que visem modelar as variações do clima ou do ambiente em função do tempo.

Espera-se que as informações geradas por este estudo sirvam de subsídio para a formulação de políticas públicas voltadas a um planejamento municipal mais eficiente e sustentável, considerando a vulnerabilidade dos recursos naturais e a crescente necessidade de adaptação e mitigação dos impactos das mudanças climáticas. Ademais, almeja-se que esta

pesquisa estimule novas investigações direcionadas à análise de dados climatológicos em outras localidades brasileiras, tomando como referência a metodologia aqui adotada.

Diante do atual cenário de mudanças climáticas e da necessidade de aprimoramento das metodologias de análise capazes de subsidiar políticas públicas voltadas à mitigação de seus impactos, os resultados deste estudo corroboram a literatura quanto à eficácia dos métodos aplicados na modelagem de dados climatológicos. Em síntese, espera-se que a problemática aqui abordada contribua para a ampliação do debate científico e promova o desenvolvimento de novas pesquisas voltadas à compreensão da complexidade dos fenômenos climáticos.

## REFERÊNCIAS


AFUECHETA, E.; OMAR, M. H. Characterization of variability and trends in daily precipitation and temperature extremes in the Horn of Africa. **Climate risk management**, v. 32, n. 100295, p. 100295, 2021.

ANTENEODO, C. Processos estocásticos. Anais da V Escola do CBPF. : v. ll , 2005.

ANTUNES DA SILVA MAIA, H. A. et al. Perfil epidemiológico dos casos de leishmaniose visceral em Feira de Santana, Bahia, no período de 2001 a 2015. **Revista de saúde coletiva da UEFS**, v. 8, n. 1, p. 70–74, 2018.

BRITO, A. DE A.; ARAÚJO, H. A. DE; ZEBENDE, G. F. Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient applied to solar radiation, air temperature and relative humidity. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, 2019.

BRITO, A. DE A.; SILVA FILHO, A. M; ZEBENDE, G. F. Análise temporal de dados climatológicos de Feira de Santana (BA). **Conjuntura & Planejamento**, n.189, p.50-59, 2015.

CARBONE, A.; CASTELLI, G.; STANLEY, H. E. Time-dependent Hurst exponent in financial time series. Physica A, 344(1–2), 267–271. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.06.130, 2004.

CHEN, X.; LIN, G.; FU, Z. Long-range correlations in daily relative humidity fluctuations: A new index to characterize the climate regions over China. **Geophysical research letters**, v. 34, n. 7, 2007.

DA SILVA FILHO, A. M.; ZEBENDE, G. F.; GUEDES, E. F. Analysis of intentional lethal violent crimes: A sliding windows approach. **Physica A**, 567(125653), 125653. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125653, 2021.

DA SILVA, M. F. et al. Quantifying cross-correlation between Ibovespa and Brazilian blue-chips: The DCCA approach. **Physica A**, v. 424, p. 124–129, 2015.

DE OLIVEIRA, A. M. et al. **O uso da técnica de sensoriamento remoto para a localização de lagoas no município de Feira de Santana – B A**. 2007. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.19.56/doc/2939-2946.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2024.

DIAS, R. et al. **The impact of covid-19 on exchange rate volatility: An econophysics approach**. 6th LIMEN Conference Proceedings (part of LIMEN conference collection). **Anais**...Association of Economists and Managers of the Balkans, Belgrade, Serbia, 2020.

DOS ANJOS, P. S. et al. Long-term correlations and cross-correlations in wind speed and solar radiation temporal series from Fernando de Noronha Island, Brazil. **Physica A**, v. 424, p. 90–96, 2015.

FAN, Q.; LIU, S.; WANG, K. Detecting the auto-correlation between daily temperature and relative humidity time series. **Fractals**, v. 27, n. 02, p. 1950003, 2019.

FERREIRA DE LIMA, N. et al. Correlação de longo alcance temporal da velocidade do vento nos municípios de Ceará-Mirim e Natal no Rio Grande Do Norte. **Holos**, v. 8, p. 56, 31 dez. 2017.

FERREIRA, E. C. DE O. S. Modelagem espaço-temporal de variáveis climatológicas no estado da Bahia: uma abordagem com janelas deslizantes. 2021. 109 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem em Ciência da Terra e do Ambiente) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2021.

FERREIRA, P. et al. A sliding windows approach to analyse the evolution of bank shares in the European Union. **Physica A**, v. 490, p. 1355–1367, 2018.

FILHO, A. M. DA S. et al. Modelagem da diferenciação do coeficiente de correlação cruzada sem tendência: uma aplicação na série temporal de veículos furtados e veículos roubados em Salvador-Ba. Em: **Ciências Tecnológicas, Exatas e da Terra e seu Alto Grau de Aplicabilidade**. [s.l.], 2020.

GUEDES, E. F. et al. An econophysics approach to study the effect of BREXIT referendum on European Union stock markets. **Physica A**, v. 523, p. 1175–1182, 2019.

GUEDES, E. F. et al. **SlidingWindows: Methods for time series analysis**. **CRAN: Contributed Packages**. The R Foundation, 21 set. 2020.

GUEDES, E. F.; DA SILVA FILHO, A. M.; ZEBENDE, G. F. Detrended multiple cross-correlation coefficient with sliding windows approach. **Physica A**, v. 574, n. 125990, p. 125990, 2021.

GUEDES, E. F.; DA SILVA FILHO, A. M.; ZEBENDE, G. F. GMZTests: Statistical Tests, 2021. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=GMZTests.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025). Cidades. Disponível em:

<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/feira-de-santana/panorama>.

IPCC. *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)].* Disponível em: ⟨https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/ IPCC AR6 SYR SPM.pdf⟩, 2023.

IPCC. **AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.

IPCC. **Climate Change 2021 Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [s.l.] IPCC, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf>.

IQBAL, J. et al. Detrended cross correlation analysis (DCCA) of radon, thoron, temperature and pressure time series data. **Physica Scripta**, v. 95, n. 8, p. 085213, 7 jul. 2020.

JESUS, T. B.; SANTOS, T. N.; CARVALHO, C. E. V. Aspectos da comercialização de pescado em feiras livres do município de Feira de Santana-BA. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 159–179, 2018.

KANTELHARDT, J. W. et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. **Physica A**, 316(1–4), 87–114. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)01383-3, 2002.

KOSCIELNY-BUNDE, E. et al. Indication of a universal persistence law governing atmospheric variability. **Physical review letters**, v. 81, n. 3, p. 729–732, 1998.

KRIŠTOUFEK, L. Long-range cross-correlations: Tests, estimators and applications. 2013.

MACHADO FILHO, A.; DA SILVA, M. F.; ZEBENDE, G. F. Autocorrelation and cross-correlation in time series of homicide and attempted homicide. **Physica A**, v. 400, p. 12–19, 2014.

MACHADO, A.; ZEBENDE; GUEDES. **Análise temporal dos indicadores da indústria de transformação da Bahia: uma abordagem com métodos da mecânica estatística**. Unpublished , 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2298.1609.

MANDÚ, T. B.; DOS SANTOS GOMES, A. C.; DO VALE, R. S.; DOS SANTOS, M. S. Associação entre o índice de calor e internações por infarto agudo do miocárdio em Manaus–AM. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 15, n. 31, p. 16–28, 2019. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/44189. Acesso em: 26 nov. 2024.

MARTIN, A. C. et al. **Análise de séries temporais para previsão da evolução do número de automóveis no Município de Joinville**. 2016. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:164547801>. Acesso em: 26 nov. 2024.

OLIVEIRA, L. L. DE et al. Efeitos dos eventos extremos climáticos na variabilidade hidrológica

em um rio de Ecossistema Tropical Amazônico. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 4, p. 145–153, 27 abr. 2020.

PALMEIRA, A. et al. Long-term correlations and cross-correlations in meteorological variables and air pollution in a coastal urban region. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14470, 2022.

PEIRIS, S.; HUNT, R. Revisiting the autocorrelation of long memory time series models. **Mathematics**, v. 11, n. 4, p. 817, ISSN 2227-7390. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.3390/math11040817⟩, 2023.

PENG, C.-K. et al. Mosaic organization of DNA nucleotides. **Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics**, v. 49, n. 2, p. 1685–1689, 1994.

PIAO, L.; FU, Z. Quantifying distinct associations on different temporal scales: comparison of DCCA and Pearson methods. **Scientific reports**, v. 6, p. 36759, 2016.

PODOBNIK, B.; STANLEY, H. E. Detrended Cross-Correlation Analysis: A New Method for Analyzing Two Nonstationary Time Series. **Physical Review Letters**, v. 100, n. 8, 27 fev. 2008.

PODOBNIK, Boris; JIANG, Zhi-Qiang; ZHOU, Wei-Xing; STANLEY, H. Eugene. Statistical tests for power-law cross-correlated processes. Physical Review E, [S. l.], v. 84, n. 6, p. 066118, dez. 2011. DOI: 10.1103/PhysRevE.84.066118. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.84.066118.

PRADO, M. F. DE. Desenvolvimento de uma metodologia para a obtenção de informações sobre o saldo de radiação a partir da temperatura do ar em ecossistemas naturais. 2017. 78 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Cuiabá, 2017.

REIS, R. S. R. Feira de Santana: aspectos históricos da urbanização sob a ótica da mobilidade urbana. **Sitientibus**, n. 56, p. 19–27. Disponível em: https://doi.org/10.13102/sitientibus.v0i56.4630, 2017.

RIBAS JUNIOR, N. S.; GUEDES, E. F.; DIAS, R.; SILVA FILHO, A. M. da. Sea level on the Brazilian coast: A sliding windows approach. Journal of South American Earth Sciences, v. 153, p. 105360, fev. 2025. DOI: 10.1016/j.jsames.2025.105360. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105360.

RODRIGUES, P.; FILHO, F. O.; GUEDES, E. **Networks Analysis Of Brazilian Climate Data Based On The DCCA Cross-Correlation Coefficient**. 28 fev. 2022.

ROGERS, J. S. et al. The role of climate and population change in global flood exposure and vulnerability. **Nature Communications**, v. 16, n. 1, p. 1287, ISSN 2041-1723. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1038/s41467-025-56654-8⟩, 2025.

SAMPAIO, J., SILVA FILHO, A. M., QUINTELLA, R. & ZEBENDE, G. F. Uma análise estatística dos indicadores de criminalidade em Salvador. **Revista Conjuntura & Planejamento**, 161, 40–49 (2008).

SANTOS, E. C. O. et al. Autocorrelation of wind speed: A sliding window approach. **Physica A**, v. 607, n. 128213, p. 128213, 2022.

SANTOS, E. C. O.; DIAS, R.; GALVÃO, R.; GUEDES, E. F.; SILVA FILHO, A. M. da. Joint Analysis of Solar Radiation and Wind Speed: Approach with Sliding Windows. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, 18(10), 1–28. Disponível em: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-108, 2024.

SANTOS, R. A. DOS et al. Estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Feira de Santana (Ba). **Revista brasileira de agricultura irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1617–1626, 2017.

SANTOS, R. A. DOS; MARTINS, D. L.; SANTOS, R. L. Balanço hídrico e classificação climática de köppen e thornthwaite no município de Feira de Santana (Ba) / Water balance and köppen climate classification and thornthwaite in the municipality of Feira de Santana (Ba). **Geo UERJ**, n. 33, p. e34159, 2018.

SENA, A. et al. Medindo o invisível: análise dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável em populações expostas à seca. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 21, n. 3, p. 671–684, mar. 2016.

SILVA FILHO, A. M. da; ZEBENDE, G. F.; CASTRO, A. P. N. de; GUEDES, E. F. Statistical test for Multiple Detrended Cross-Correlation Coefficient. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, v. 562, p. 125285, jan. 2021. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125285.

SILVA FILHO, Aloísio Machado da. Autocorrelação e correlação cruzada: teorias e aplicações. Orientador: Gilney Figueira Zebende. 2014. 127 f. Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2014.

SOUSA, T. da S.; SILVA, N. D. da; SILVA FILHO, A. M. da. Análise espaço-temporal das áreas de remanescentes florestais em Feira de Santana: Influências sobre a estrutura térmica do município. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 34, p. 104–128. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revista_clima/article/view/87732, 2024.

TOLEDO, O. C. et al. Temporal Analysis of the Flows of the Rivers that form the Hydrographic Basin of Moquegua (Peru). **Fluctuation and noise letters**, v. 21, n. 06, 2022.

VAFAEIPOUR, M. et al. Application of sliding window technique for prediction of wind velocity time series. **International journal of energy and environmental engineering**, v. 5, n. 2–3, 2014.

VASSOLER, R. T.; ZEBENDE, G. F. DCCA cross-correlation coefficient apply in time series of air temperature and air relative humidity. **Physica A**, v. 391, n. 7, p. 2438–2443, 2012.

WALLECZEK, J. (ED.). **Self-organized biological dynamics and nonlinear control: Toward understanding complexity, chaos and emergent function in living systems**. [s.l.] Cambridge University Press, 2000.

WANG, F.; XU, J.; FAN, Q. Statistical properties of the detrended multiple cross-correlation coefficient. **Communications in nonlinear science & numerical simulation**, v. 99, n. 105781, p. 105781, 2021.

ZEBENDE, G. F. DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. **Physica A**, v. 390, n. 4, p. 614–618, 2011.

ZEBENDE, G. F. et al. Uma visão hora a hora da autocorrelação em dados de temperatura e umidade relativa do ar na Bahia. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 29, p. 99–112, 13 out. 2021.

ZEBENDE, G. F. et al. ρDCCA applied between air temperature and relative humidity: An hour/hour view. **Physica A**, v. 494, p. 17–26, 2018.

ZEBENDE, G. F.; BRITO, A. A.; CASTRO, A. P. DCCA cross-correlation analysis in time-series with removed parts. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, 545, 123472. https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123472, 2020.

ZEBENDE, G. F.; DA SILVA FILHO, A. M. Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 510, p. 91–97, nov. 2018.

ZEBENDE, G. F.; DA SILVA, M. F.; MACHADO FILHO, A. DCCA cross-correlation coefficient differentiation: Theoretical and practical approaches. **Physica A**, v. 392, n. 8, p. 1756–1761, 2013.

ZEBENDE, G. F.; FERNANDEZ, B. F.; PEREIRA, M. G. Analysis of the variability in the sdB star KIC 10670103: DFA approach. **Monthly notices of the Royal Astronomical Society**, v. 464, n. 3, p. 2638–2642, 2017.

ZEBENDE, G. F.; SANTOS DIAS, R. M. T.; DE AGUIAR, L. C. Stock market efficiency: An intraday case of study about the G-20 group. **Heliyon**, v. 8, n. 1, p. e08808, 2022.